

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»**

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

КАФЕДРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Направление 44.04.01 – Педагогическое образование
Магистерская программа: образование в области физика

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

**СОЗДАНИЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ ПО
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕДУРАМ «ИССЛЕДОВАНИЕ
ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ БЛИЖНЕГО И ДАЛЬНОГО
КОСМОСА»**

Работа завершена:

“ ” _____ 2016 г. _____ Д.А. Хамидуллина

Работа допущена к защите:

Научный руководитель

д.ф.-м.н., доцент

“ ” _____ 2016 г. _____ Ю.А. Нефедьев

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н., доцент

“ ” _____ 2016 г. _____ А.В. Мокшин

Казань 2016

Содержание

Введение.....	3
Глава I.История астрометрии.....	5
§1.1.История возникновения звездных каталогов и систем координат.....	5
Глава II. Фундаментальные системы координат	14
§2.1. . Фундаментальная система координат.....	14
§2.2. Исходные звездные каталоги положений и их ошибки.....	23
§2.3.Определение поправок ориентировки фундаментальной системы координат.....	32
§2.4.Развитие фундаментальной системы координат.....	44
Глава III. Введение в инерциальную систему координат	55
§3.1.Фотографические каталоги положений, собственных движений и параллаксов звезд.....	55
§3.2.Инерциальная система координат.....	62
§3.3.Проблема абсолютизации собственных движений звезд.....	69
§3.4. Определение параметров прецессионного вращения.....	77
§3.5. Использование длиннобазового радиоинтерферометра для целей фундаментальной астрометрии.....	86
Заключение.....	97
Литература.....	100

Введение

Актуальность темы исследования. Составление описаний звездного неба и получение из наблюдений положений звезд производилось еще на заре развития науки и культуры во всех странах древнего мира, поскольку без этого невозможно решать практические задачи, связанные с практической астрономией, и изучать видимое движение небесных тел. Поэтому в данной работе собраны сведения о развитии темы инерциальных систем, а эта тема актуальна на все времена.

Целью данной работы является создание методического пособия по разделу физики «механика», для студентов и преподавателей Института Физики КФУ.

Задачи:

1. Создание методического пособия на основании главы «Построение фундаментальной и инерциальной систем координат» книги «Общая астрометрия» В.В.Подобед, В.В.Нестеров.
2. Дополнение данной методички новыми данными об исследованиях в области астрометрии и составление вопросов, тестов для лучшей усвояемости и проверки полученных знаний.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Имеются книги, по которым возможно изучить астрометрию, но они в малом количестве и малодоступны. Наше методическое пособие предусматривает самостоятельное изучение темы студентом, легкую усвояемость благодаря проверочным материалам и общедоступность, т.к. методичка будет опубликована как электронное издание в библиотеке им.Лобачевского КФУ. В данном пособии собраны как исторические сведения по инерциальным системам, так и современные данные.

Научная ценность и практическая значимость заключается в том, что после опубликования методички на основе данной работы, ее смогут использовать как преподаватели так и студенты для изучения курса Астрометрии в Институте физики. До настоящего времени методичек по данному курсу создано не было.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на итоговой конференции кафедры астрономии и космической геодезии Института физики КФУ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 100 страницах, включая 20 рисунков, 2 таблиц, одного приложения и списка литературы из 7 наименований.

ГЛАВА I. ИСТОРИЯ АСТРОМЕТРИИ

§1.1. История возникновения звездных каталогов и систем координат

Составление описаний звездного неба и получение из наблюдений положений звезд производилось еще на заре развития науки и культуры во всех странах древнего мира, поскольку без этого невозможно было решать практические задачи, связанные с астрономией, и изучать интригующее видимое движение небесных светил. Среди этих работ следует отметить не дошедший до нас каталог зодиакальной зоны Аристилла и Тимохариса, двух известных астрономов Древней Греции, наблюдения которых помогли открыть явление предварения равноденствий или прецессию.

Первым каталогом, сыгравшим значительную роль в развитии астрономии, явился каталог эклиптических долгот и широт видимых звезд для эпохи 123 г. до н. э., составленный на основе собственных наблюдений величайшим астрономом древности Гиппархом. Поводом к составлению этого каталога послужило появление новой звезды. Каталог Гиппарха является первым дошедшим до нас каталогом звездных положений, поскольку он был воспроизведен знаменитым Птолемеем, жившим два с половиной столетия позднее Гиппарха, в его труде, известном под арабским названием Альмагест. Седьмая и восьмая книги Альмагеста содержат каталог Гиппарха, долготы которого были исправлены Птолемеем за прецессию, открытую и вычисленную Гиппархом из наблюдений ряда астрономических явлений. Каталог Гиппарха — Птолемея содержит данные для 1025 звезд и считается отнесенным к эпохе 138 г. н. э. Однако при редукции долгот Птолемею использовал не самое удачное значение прецессии по долготе из известных в то время, вследствие чего его долготы ошибочны в среднем на один градус и относятся к более ранней на 75 лет эпохе. Это свидетельствует о том, что Птолемею не производил перенаблюдений каталога Гиппарха, ибо при существовавшей точности астрономических измерений $\pm 15'$, эта ошибка была бы им обнаружена.

Альмагест Птолемея был в течение четырнадцати столетий единственной книгой по астрономии, к авторитету которой обращались во всех необходимых случаях. Однако каталог звездных положений не мог сохранить необходимую точность и удовлетворять возрастающим требованиям науки и практики. Поэтому он подвергался неоднократным ревизиям и перенаблюдениям. Переводы труда Птолемея на арабский и иные языки, начиная с 827 года, явились основой для создания астрономических таблиц и каталогов, содержащих положения звезд списка Гиппарха — Птолемея. Чаще положения звезд просто переводились на новую эпоху с более точным значением прецессии, реже частично исправлялись по собственным наблюдениям. Отметим известных арабских астрономов — создателей астрономических таблиц — Альбатения (X в.) и Аль-Сухи (X в.).

Первое полное перенаблюдение каталога Гиппарха — Птолемея через шестнадцать столетий после его создания было произведено великим узбекским астрономом Улугбеком (1394— 1449), который убедился на основе выполненных наблюдений в неточности координат многих звезд в каталоге Птолемея. Звездный каталог Улугбека, занимавший четвертую книгу его таблиц и содержащий положения 1017 звезд для эпохи 1437,5, превысил по точности существовавшие до него каталоги. Координаты в каталоге Улугбека имели точность порядка $\pm 5'$. Прогресс развития астрономии на востоке закончился работами Улугбека. В Испании издаются так называемые Альфонсовы таблицы, составленные по указанию короля Кастилии Альфонса X для эпохи 1252,4 и пришедшие на смену Толедским таблицам 1080 г.

Началом развития фундаментальной астрометрии как науки о получении точных положений светил и создании небесной системы координат астрономия обязана Тихо Браге (1546—1601).

Тихо Браге со своими ассистентами отличился во всех разделах наблюдательной астрономии, произведя многочисленные наблюдения Солнца, Луны, планет, комет и в первую очередь неподвижных, как их тогда

называли, звезд. Наблюдения Тихо Браге производились главным образом на квадрантах и армиллярных сферах и имели предельную точность глазомерных измерений $\pm 1—2'$. Первое издание его каталога, содержащее наблюдения 777 звезд, начатое в Ураниборге, было закончено в 1602 г., в Праге, уже после смерти Тихо Браге. Кеплер в своих Рудольфинских таблицах переиздал в 1627 г. этот каталог, расширив его содержание до 1005 звезд на основании личной переписки с Тихо Браге. Заметим, что наблюдения Ротмана на Кассельской обсерватории позволили образовать каталог положений 1004 звезд для эпохи 1594 г.

XVII век был переломным в деле составления звездных каталогов: начинается переход к более точной реализации небесной системы координат — экваториальной системе, разрабатываются инструментальные принципы для ее определения. Первым каталогом, содержащим прямые восхождения и склонения звезд наряду с эклиптическими координатами, был каталог Гевелия 1564 звезд для эпох 1661 и 1701 гг., полученный по наблюдениям взаимных расстояний звезд с шестифутовым секстантом. Новые инструменты, созданные О. Рёмером — пассажный инструмент и меридианный круг, снабженные астрономической трубой, послужили дальнейшему повышению точности звездных каталогов.

В 1675 г. в Англии была основана знаменитая Гринвичская обсерватория. Систематические наблюдения звезд и тел Солнечной системы, ведущиеся в течение всего существования обсерватории до настоящего времени, являлись и являются основой для проведения астрономических исследований и для создания исходных звездных каталогов в первую очередь. Первым директором Гринвичской обсерватории был Джон Флемстид (1646—1720), который составил по своим наблюдениям каталог 2935 звезд, более обширный и точный, чем каталоги его предшественников. Точность каталога Флемстида достигала $\pm 10''$.

Знаменитый астроном Джеймс Брайдлей (1693—1762) был третьим директором Гринвичской обсерватории. Его имя связано с

усовершенствованием редуccionных вычислений, учитывающим открытые им эффекты во вращении Земли — явления абберации света и нутации земной оси. Это повысило точность реализации координатной системы. После оборудования Гринвичской обсерватории стенным квадрантом и пассажным инструментом Бадлей провел большой и высококачественный ряд наблюдений, содержащий 60 000 отдельных наблюдений звезд за период 1750—1762 гг., опубликованных в двух томах уже посмертно, в 1798 и 1805 гг. Наибольшие погрешности наблюдений Бадлея по оценке Бесселя составляют 1^s по прямому восхождению и $4''$ по склонению.



Рис.1.1.1 Джеймс Бадлей (1693—1762)

Развитие мореплавания и открытие новых земель в южном полушарии Земли поставили задачу определения координат звезд южного полушария неба, необходимых для целей навигации и картографии. Первый список положений 136 звезд южного неба, составленный моряком Петером Теодором по наблюдениям многих мореплавателей XVI столетия, включая Америго Веспуччи, приведен Кеплером в Рудольфинских таблицах. Первый каталог южного неба, содержащий 341 звезду, был опубликован в 1679 г. по наблюдениям Эдмунда Галлея, второго директора Гринвичской обсерватории, выехавшего для этой цели на остров Святой Елены. Каталог

Галлея был перенаблюдён Абрамом Шарпом в 1726 г., причем им выведены и экваториальные координаты для этих звезд.

Последующая работа по широкому изучению южного неба была предпринята Парижской обсерваторией (основанной в 1667 г.), которая не проводила до этого больших каталожных работ, а главным образом была занята проблемой изучения фигуры Земли и геодезическими работами. Ученая экспедиция на мыс Доброй Надежды (1750—1754) под руководством Никола Луи де Лакайля провела систематическое обозрение южного неба, охватывавшее свыше 10 000 звезд. Эта работа завершилась выходом в 1763 г. каталога «Южное звездное небо», содержавшего 2000 звезд. Наблюдения остальных звезд были обработаны и изданы Британским Обществом лишь в 1845 г. Из числа работ Парижской обсерватории следует также упомянуть большие зонные наблюдения 47 390 звезд северного неба до 9—10 звездной величины от -35° до 80° по склонению, проведенные с 1778 г. Лаландом и увидевшие свет в 1847 г.

Прежде чем перейти к каталожным работам XIX столетия — эпохи создания современной фундаментальной астрометрии — следует упомянуть работы еще двух известных астрономов — Тобиаса Майера (1723—1762) и Невиль Маскелайна (1732—1811). Тобиас Майер на Геттингенской обсерватории разработал теорию пассажного инструмента и получил каталог 998 зодиакальных звезд, изданный в 1775 году. Сопоставление положений из этого каталога с наблюдениями Рёмера и Лакайля позволили обнаружить наличие у значительного числа звезд собственных движений. Пятый директор Гринвичской обсерватории Невиль Маскелайн известен созданием каталога 36 ярких зодиакальных звезд, предназначенного для дневных наблюдений Солнца с целью привязки каталогов к точке весеннего равноденствия.

Все каталоги до эпохи Бадделя имеют лишь историческое значение вследствие их низкой точности. Они создавались на различных инструментах, разными методами, обработаны и опубликованы различным

образом. Это обстоятельство затрудняет их сравнительную оценку. Высокое качество наблюдений Бадделя для эпохи 1755 г. позволило использовать их при построении фундаментальных каталогов. Для этой цели они были переобработаны с современными редуцированными величинами дважды: Бесселем, опубликовавшим каталог 3268 звезд в 1818 г., и Ауверсом в 1882 г. Последний переобработал также каталог Майера 990 звезд для эпохи 1755 г., каталог Пиацци 7646 звезд для эпохи 1800,0 и каталог 4243 околополярных звезд для эпохи 1810,0 Грумбриджа.

Первая половина XIX столетия ознаменована созданием многих обсерваторий, новых совершенных инструментов и развертыванием работ по созданию исходных каталогов на основе разработанного меридианного принципа наблюдений. Нет никакой возможности осветить деятельность каждой обсерватории и дать перечень всех созданных исходных каталогов XIX века. Охарактеризуем лишь наиболее значительные работы по меридианной астрометрии.

В первую очередь следует выделить ряды исходных каталогов, которые регулярно с середины XIX века начали получать на Гринвичской и Пулковской обсерваториях.

Наблюдения экваториальных координат звезд на Гринвичской обсерватории производились отдельно на пассажном инструменте и стенном круге до 1860 г., когда седьмой директор Гринвичской обсерватории Джордж Эри ввел в действие меридианный круг для совместных определений прямых восхождений и склонений звезд. Гринвичская школа получения звездных каталогов, созданная Эри, основана на производственном подходе к данной задаче. Эри была разработана детальная инструкция по проведению наблюдений и их обработке, которой следовали на протяжении многих десятилетий. Он исходил из того принципа, что инструментальные ошибки могут быть полностью исключены на основе проведенного один раз исследования инструмента. Это привело к созданию ряда регулярно получаемых однотипных исходных каталогов, но не могло не

сказаться на их точности, которая всегда уступала точности Пулковских каталогов, созданных на более совершенных принципах.

Пулковская обсерватория была основана в 1839 году и с этого времени стали регулярно с интервалом около двадцати лет выходить ее каталоги фундаментальных звезд. Основатель Пулковской обсерватории В. Я. Струве (1793—1864) организовал наблюдения ярких звезд, руководствуясь разработанными Бесселем принципами. Пулковские каталоги того времени далеко превосходили по точности как в случайном, так и систематическом отношении каталоги других обсерваторий, благодаря тщательному исследованию инструментальных ошибок и изучению их изменений со временем, ослаблению и исключению их влияния путем специальной организации наблюдательного процесса наряду с сохраненным раздельным методом абсолютных определений координат на пассажном инструменте и изобретенном Струве вертикальном круге. Это наглядно видно из сравнительной характеристики Пулковских и Гринвичских каталогов, приведенной на рис. 2.2.2.

Работы по созданию каталогов начинают организовываться и проводиться в возрастающем объеме на обсерваториях мира, многие из которых создаются при университетах Старого и Нового света. Из числа обсерваторий, занимавшихся определением координат звезд, перечислим Николаевскую, Казанскую, Берлинскую, Парижскую и Вашингтонскую обсерватории, обсерватории при университетах в Тарту, Або (Турку), Кембридже, Страсбурге, Оксфорде, а также Гарвардскую, Ликскую и Цинциннатскую обсерватории.

Помимо наблюдения ярких, фундаментальных звезд проводятся наблюдения и более слабых звезд дифференциальными методами. Здесь можно отметить серию дифференциальных каталогов Пулковской обсерватории, содержащих звезды списка Бадделя.



Рис. 1.1.2 Василии Яковлевич Струве (1793—1864)

Большие зонные наблюдения звезд 9—10-й величины северного полушария и экваториальной области были проведены в середине XIX столетия. В результате были получены каталоги 62 530 звезд от -15° до $+45^\circ$ по склонению для 1825,0 (Бессель), 26 425 звезд от $+45^\circ$ до $+80^\circ$ для 1842,0 (Аргеландер) и 3735 звезд от $+80^\circ$ до $+90^\circ$ для 1855,0 (Кэррингтон). Эти каталоги, не основанные на какой-либо фундаментальной системе, представляют в настоящее время лишь историческую ценность. Создание каталогов большего числа звезд на основе распространения первоклассной фундаментальной системы стало возможным лишь с конца XIX и начала XX столетия.

Обсерватории, исторически сложившиеся в Северном полушарии Земли, практически не могли наблюдать звезды южнее -30° по склонению. Первоначально наблюдения южного неба носили экспедиционный характер. Отметим наряду с упомянутыми выше каталогами Галлея и Лакайля еще каталог 7385 звезд В. Ричардсона по наблюдениям 1822—1826 гг. на обсерватории Параматта (Новый Южный Уэльс), опубликованный в Лондоне в 1835 г.

С образованием в 1820 г. Капской обсерватории на мысе Доброй Надежды начались регулярные наблюдения южных звезд. Капская обсерватория создала серию звездных каталогов, являющихся основой для изучения южного неба. Работы Капской обсерватории получили особое развитие с 1880 г., когда ее директором стал известный Давид Гилл. Серия каталогов была получена во второй половине XIX столетия на обсерватории Сантьяго в Чили. Наблюдения южных звезд производились также на обсерватории Мадрас (Индия) и Мельбурн (Австралия).

Накопление большого наблюдательного материала к последней четверти XIX века, когда были получены сотни каталогов положений звезд для отдельных эпох, поставили задачу вывода на базе их совокупности высокоточной фундаментальной системы. Начало формирования первоклассных фундаментальных каталогов показало большую важность получения исходных каталогов, особенно абсолютным методом. Отсутствие унификации в организации наблюдений и в их обработке продолжалось до конца XIX столетия, когда создание первоклассных фундаментальных систем позволило объективно оценивать достоинства отдельных каталогов. Это привело к широко развившейся к середине XX века тенденции в организации кооперативных работ обсерваторий разных стран по созданию каталогов, о чем будет упомянуто при описании современных фундаментальных систем (см. §2.4).

Вопросы:

1. *Что вы можете рассказать о звездном каталоге Гиппарха?*
2. *Ученые-астрономы каких стран в основном участвовали в создании каталогов?*
3. *Какие звездные каталоги вам известны? Чем они примечательны?*

ГЛАВА II. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

§2.1. Фундаментальная система координат

Проблема построения фундаментальной системы небесных координат объединяет целый ряд подчас независимых задач, решаемых различными методами и по наблюдениям различных небесных светил. Основной задачей является вывод фундаментальной системы координат путем объединения исходных звездных каталогов. К ней тесно примыкает задача уточнения ориентировки фундаментальной системы, производимого на основе наблюдений за движением тел Солнечной системы. Уточнение системы собственных движений может производиться по наблюдениям галактик. Содержание проблемы построения фундаментальной системы координат можно упрощенно рассматривать как определение для некоторой существующей фундаментальной системы поправок положений $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$, поправок ориентировки системы $\Delta\alpha_0$ и $\Delta\delta_0$ и поправок системы собственных движений $\Delta\mu_\alpha$ и $\Delta\mu_\delta$.

Создание опорной системы для фотографических наблюдений является задачей распространения фундаментальной системы на большее число звезд. Не говоря о практической значимости, эта задача имеет принципиальное значение в деле объединения многочисленных визуальных и фотографических наблюдений, произведенных за последние сто лет. Установление связи фундаментальной и инерциальной систем является сложной и до сих пор не вполне удовлетворительно решенной задачей. Всему этому многообразию вопросов и будут посвящены дальнейшие параграфы. Начнем с основополагающего вопроса построения фундаментальной системы координат.

Фундаментальная система координат задается, как это уже отмечалось, совокупностью данных, включающей для некоторого числа равномерно распределенных по небесной сфере звезд средние

экваториальные координаты начальной эпохи и изменения этих координат со временем как вследствие прецессии, так и вследствие собственных движений звезд. Эти данные, оформленные в виде фундаментального каталога, позволяют воспроизводить фундаментальную систему для любой эпохи.

Фундаментальный каталог является результатом сопоставления и объединения многих исходных звездных каталогов, полученных на различных обсерваториях и в различные эпохи. Наблюдения должны заполнять некоторый интервал времени для вывода изменений координат. Поскольку величину прецессии принимают за известную, то задача формально сводится к выводу собственных движений. Ошибка в принятом значении прецессии не исказит изменения координат в целом, поскольку выведенные с принятым значением прецессии собственные движения будут искажены на величину ошибки принятого значения прецессии с обратным знаком, которая при вычислении изменений координат исключится. Наличие ошибок в исходных каталогах и стремление получить наиточнейшую фундаментальную систему усложняет задачу и делает ее неформальной.

Проблема заключается в таком объединении данных исходных каталогов, чтобы:

- 1) уменьшить влияние систематических и случайных ошибок каталогов на выводимые средние положения звезд. От исключения ошибок, в особенности систематических, зависит геометрическая точность новой выводимой системы;

- 2) вывести наивероятнейшие значения собственных движений звезд. От этого зависит продолжительность существования фундаментальной системы координат в пределах принятой точности ее воспроизведения.

Построение нового фундаментального каталога в настоящее время является улучшением уже существующей фундаментальной системы, т. е. сводится к нахождению малых поправок к данным имеющегося фундаментального каталога. При этом стремятся увеличить число звезд,

фиксирующих систему координат. Улучшение фундаментальной системы производится в двух направлениях:

1. Улучшение в случайном отношении, производимое первоначально с тем, чтобы в последующем точнее произвести:

2. Улучшение в систематическом отношении, т. е. собственно вывод новой фундаментальной системы.

Иногда ограничиваются решением первой задачи и при объединении каталогов ставят целью добиться ослабления лишь случайных ошибок, а система нового каталога сохраняется прежней. Полученные таким образом каталоги называются сводными.

С повышением требования к точности фундаментальной системы развивается и совершенствуется методика ее образования. Вывод первого фундаментального каталога Бесселя сводился к простому осреднению положений звезд из нескольких каталогов, сопровождавшемуся выводом собственных движений звезд. В последующем при построении фундаментальной системы стали вводить в рассмотрение веса отдельных каталогов и изучать их систематические разности. К концу XIX столетия усилиями школ Ауверса, Ньюкомба и Босса была создана методика вывода фундаментальной системы, в основном применяемая и в настоящее время.

Следует заметить, что процесс создания нового фундаментального каталога есть процесс весьма сложный, громоздкий и теоретически не разработанный. Он опирается на эмпирический прием исключения систематических ошибок каталогов в предположении, что они малы и в разных каталогах проявляют себя как случайные ошибки. Чтобы улучшить дело с выводом новых фундаментальных систем координат, необходимо резко повысить точность исходных каталогов на основе развития новых инструментальных принципов и методов наблюдения, разработать математическую теорию исключения и выравнивания систематических и случайных ошибок каталогов при их объединении. В частности, анализ

систематических разностей каталога следует производить, применяя современные статистические методы на ЭВМ.

Рассмотрим схему построения фундаментального каталога. Обозначим используемые исходные каталоги через $K_1, K_2, K_3, \dots, K_m, \dots, K_n$; примем, что m первых каталогов являются абсолютными, а последующие $n - m$ — m относительными. Пусть $t_1, t_2, t_3, \dots, t_m, \dots, t_n$ эпохи равноденствия каталогов, а $t'_1, t'_2, t'_3, \dots, t'_m, \dots, t'_n$ эпохи наблюдения. Задача создания нового фундаментального каталога ставится для упрощения вычислений как задача улучшения существующего фундаментального каталога K_0 , эпоху равноденствия которого обозначим через t_0 . Будем подразумевать под обозначением x_i и x_0 одну из координат звезды (прямое восхождение или склонение) из каталогов K_i и K_0 соответственно.

Предварительно все положения звезд исходных, каталогов с помощью принятого значения прецессии и собственных движений из улучшаемого фундаментального каталога переводятся с эпохи равноденствия и с эпохи наблюдения каждого исходного каталога на эпоху равноденствия фундаментального каталога по следующим соотношениям:

$$x_i^0 = x_i + pr_x(t_0 - t_i) + \mu_x(t_0 - t'_i),$$

где x_i^0 — положение звезды в i -том каталоге, приведенное на эпоху и равноденствие фундаментального каталога.

Теперь можно образовать по общим звездам разности координат Δx_i каждого исходного каталога и улучшаемого: $\Delta x_i = x_i - x_i^0$, которые используются для вывода поправок в случайном отношении.

Затем, осредняя разности Δx_i внутри дискретных интервалов значений аргументов систематических ошибок, получают систематические разности для каждого исходного каталога с улучшаемым. Так, например, величины $\Delta \delta_i$ осредняют для склонений каждого каталога по узким, обычно пятиградусным зонам склонения и получают систематические разности вида $\Delta \delta_{\delta}$. Вычитая затем $\Delta \delta_{\delta}$ из разностей склонений $\Delta \delta_i$ в соответствии со склонением каждой звезды, образуют величины $\Delta \delta_i - \Delta \delta_{\delta}$.

Осредняя последние внутри каждого часа прямого восхождения, получают величины $\overline{\Delta\delta_i - \Delta\delta_s}$, которые считаются систематическими разностями вида $\Delta\delta_s$. Полученные дискретные значения для каждой систематической разности выравниваются аналитически или графически, с тем чтобы можно было вычислить в соответствии с формулой (1) суммарную систематическую разность для каждой звезды в каждом каталоге. Исключая эту систематическую разность из положений в каждом каталоге, тем самым приводят исходные каталоги к системе улучшаемого каталога.

Сначала, как это уже говорилось, производится улучшение фундаментальной системы в случайном отношении. Для этой цели используются все исходные каталоги, как абсолютные, так и относительные. Поскольку все каталоги приведены к единой системе, то положения для данной звезды по всем каталогам будут различаться только вследствие случайных ошибок и для каждой звезды можно написать n уравнений вида

,

где x_i^0 — положение звезды, приведенное к системе улучшаемого каталога, Δx_0 и $\Delta \mu_x$ — случайные поправки координаты и собственного движения звезды для каталога K_0 соответственно, а Δx_i — поправки положения в каждом каталоге; последние можно рассматривать как невязки уравнений и поэтому основную систему для определения Δx_0 и $\Delta \mu_x$ можно переписать так: $\Delta x_0 + \Delta \mu_x (t_i' - t_0) = x_i^0 - x_0$. Решая подобные системы условных уравнений по числу звезд способом наименьших квадратов, находят поправки Δx_0 и $\Delta \mu_x$ в случайном отношении по обеим координатам для каждой звезды каталога K_0 , улучшая тем самым фундаментальную систему координат в случайном отношении. Невязки условных уравнений по всем звездам исходного каталога характеризуют точность данного каталога в случайном отношении по внешнему согласию и позволяют назначить веса каталогов в случайном отношении. Решая повторно системы условных уравнений с выведенными весами, получают окончательные значения поправок Δx_0 и $\Delta \mu_x$.

Исправив найденными поправками все каталоги (за поправки исходных каталогов принимают невязки уравнений), приступают к выводу новой системы, т.е. к улучшению фундаментального каталога в систематическом отношении. Для этой цели используются независимо полученные абсолютные каталоги звезд $K_1, K_2, K_3, \dots, K_m$. Выведенные ранее систематические разности $\overline{x_i^0 - x_0}$ по всем видам систематических ошибок исправляют средними поправками в случайном отношении.

Улучшение фундаментального каталога в систематическом отношении заключается в нахождении поправок за все виды систематических ошибок для каталога K_0 на основании изучения систематических разностей с ним всех исходных абсолютных каталогов, систематические ошибки которых рассматриваются как случайные величины. Например, для некоторой зоны по склонению значение поправки вида $\Delta\alpha_\delta$ находится из системы уравнений, образованных по аналогии с ранее написанными:

$$(\Delta\alpha_\delta)_i = (\Delta\alpha_\delta)_0 + (\Delta\mu_\alpha)_\delta(t'_i - t_0) \quad (2)$$

где $(\Delta\alpha_\delta)_i$ находится из соответствующего осреднения разностей $\alpha_i - \alpha_0$, а $(\Delta\alpha_\delta)_0$ и $(\Delta\mu_\alpha)_\delta$ есть систематические поправки системы положений и системы собственных движений фундаментального каталога. Система уравнений решается с весами, если возможно оценить различие в точности исходных абсолютных каталогов в систематическом отношении.

Обычно определяются поправки системы положений вида $\Delta\alpha_\alpha, \Delta\alpha_\delta, \Delta\alpha_m, \Delta\delta_\alpha, \Delta\delta_\delta$ и поправки системы собственных движений $(\Delta\mu_\alpha)_\alpha, (\Delta\mu_\alpha)_\delta, (\Delta\mu_\delta)_\alpha, (\Delta\mu_\delta)_\delta$ фиксированных равномерно идущих значений аргумента, что позволяет интерполировать их значения при образовании поправки для каждой конкретной звезды. Окончательные значения систематических поправок для звезд улучшаемого каталога равны следующим суммам отдельных проинтерполированных значений систематических ошибок каталога K_0 :

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_\alpha + \Delta\alpha_\delta + \Delta\alpha_m, \quad \Delta\mu_\alpha = (\Delta\mu_\alpha)_\alpha + (\Delta\mu_\alpha)_\delta,$$

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{\alpha} + \Delta\delta_{\delta},$$

$$\Delta\mu_{\delta} = (\Delta\mu_{\delta})_{\alpha} + (\Delta\mu_{\delta})_{\delta}.$$

Определение отдельных видов систематических ошибок производится, как правило, не по всем каталогам, а по группам каталогов, выбранных из расчета наилучшего выявления той или иной систематической ошибки. Так, в последнее время для вывода поправок системы положений привлекаются наиточнейшие каталоги, полученные за последнее столетие. Каталоги прошлого столетия используются для вывода поправок системы собственных движений, если они образуют с каталогами настоящего столетия длительные ряды наблюдений, произведенные на одном и том же инструменте. В дальнейшем будут иметь значение лишь каталоги XX века.

Для того чтобы ослабить влияние ошибок старых каталогов, можно, например, поступить следующим образом. Примем в качестве средней эпохи t_0 среднюю весовую эпоху для новых каталогов $t_0 = \frac{\sum_p \omega_i t_i}{\sum_p \omega_i}$, где p — число новых каталогов, а ω_i — веса каталогов в случайном отношении. Составим теперь нормальные уравнения для системы (2), написанной как для всех q каталогов, так и отдельно для p новых каталогов. Для этого достаточно уравнения умножить на соответствующий вес и сложить.

$$\sum_q \omega_i (\Delta\alpha_{\delta})_i = (\Delta\alpha_{\delta})_0 \sum_q \omega_i + (\Delta\mu_{\alpha})_{\delta} \sum_q \omega_i (t'_i - t_0),$$

$$\sum_p \omega_i (\Delta\alpha_{\delta})_i = (\Delta\alpha_{\delta})_0 \sum_p \omega_i.$$

Из последнего уравнения непосредственно находится поправка положений, подставляя которую в первое нормальное уравнение, можно найти и поправку собственных движений. Подобный подход возможен и для вывода поправок в случайном отношении.

Окончательные значения для координат и собственных движений нового фундаментального каталога получают исправлением старых значений этих величин найденными поправками в систематическом и в случайном отношениях.

Представление о точности современных фундаментальных систем дает рис.2.1.1, на котором изображены кривые сравнения каталогов FK3 и

FK4 по некоторым систематическим ошибкам для двух эпох 1950,0 и 2000,0. На рисунке наглядно видно ухудшение точности фундаментальных каталогов со временем вследствие влияния ошибок системы собственных движений. Перейдем теперь к описанию вывода поправок ориентировки фундаментальной системы.

Вопросы:

1. *Какие каталоги называются сводными?*
2. *Опишите процесс создания фундаментального каталога.*
3. *Для каких целей используются каталоги прошлых столетий?*

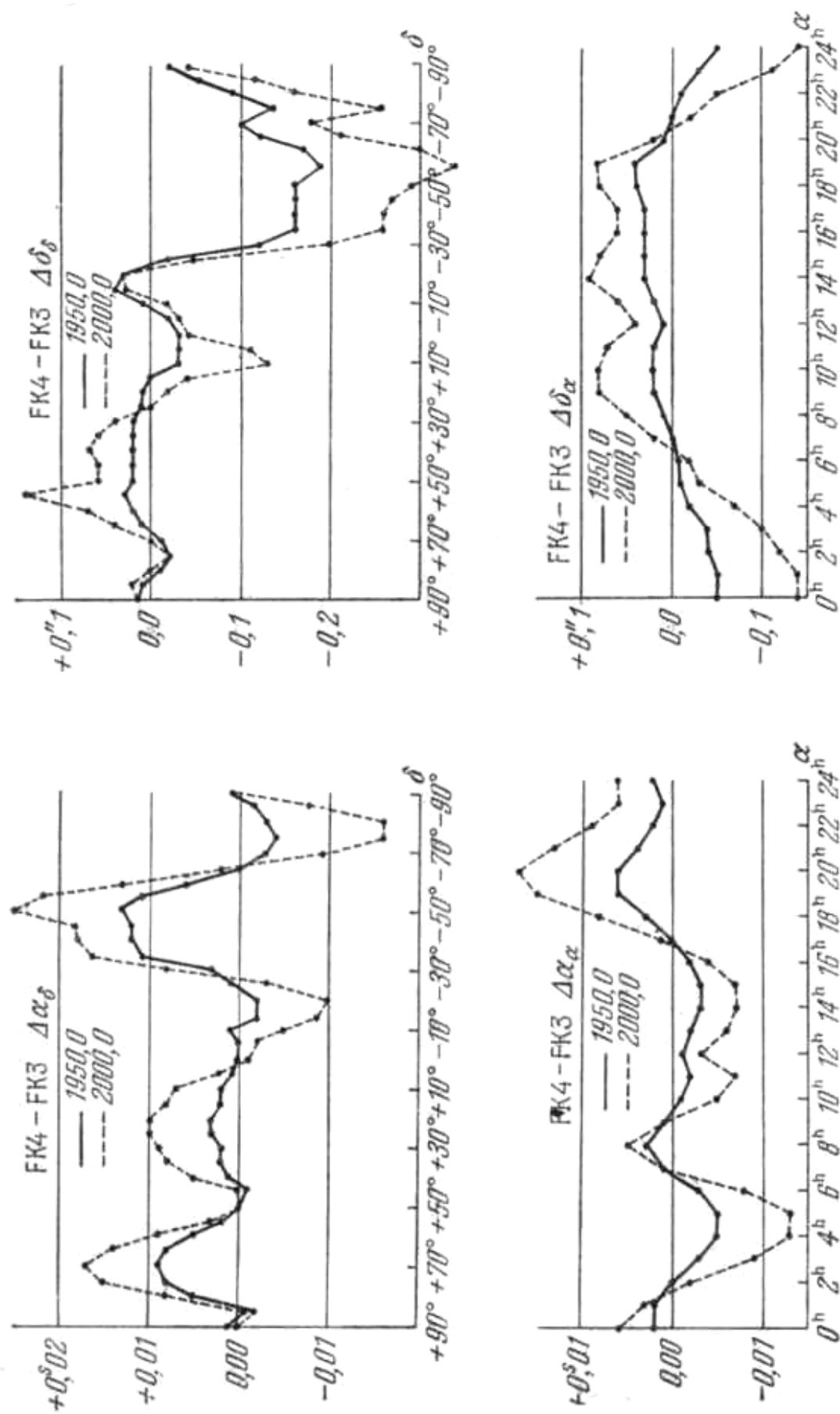


Рис. 2.1.1. Систематические разности фундаментальных систем

§2.2. Исходные звездные каталоги положений и их ошибки

Результаты определений координат звезд представляются в виде исходных звездных каталогов, содержащих индивидуальные и осредненные данные наблюдений на данном инструменте за данный, относительно короткий период времени. Исходные каталоги получаются после исправления наблюденных координат за явления, связанные с вращением Земли. Они задают наблюденную систему средних экваториальных координат для отдельных эпох. Для того чтобы вывести практически пригодную для любой эпохи систему координат, исходные каталоги объединяются в производные каталоги. Этим достигается, с одной стороны, повышение точности образуемой системы, а с другой, — выводятся изменения координат со временем. Полученные производные каталоги задают широко используемую практически и научно фундаментальную систему координат, учет вращения которой позволяет перейти к инерциальной системе координат.

Переход от наблюденной системы координат к инерциальной через фундаментальную систему представляет собой сложный комплекс астрометрических проблем. Решение этих проблем опирается, помимо наблюдений звезд, на дополнительные ряды наблюдений тел Солнечной системы и галактик, и его не во всех частях можно считать оптимально разработанным. Рассмотрим в этой главе последовательно все этапы решения этого комплекса проблем, а сейчас в первую очередь как создаются исходные звездные каталоги положений — основной материал для установления системы небесных координат.

Из ряда наблюдений, проведенных на данном инструменте в данном месте на земном шаре, получают экваториальные координаты звезд целесообразно составленного списка. Каждая звезда наблюдается в течение ряда наблюдений не один раз с целью ослабления влияния случайных ошибок. Наблюдения звезд стараются производить в разных условиях: при разных положениях инструмента, в разных кульминациях, с участием разных

наблюдателей. Возникающие вследствие этого различия наблюдаемых данных для разных групп звезд изучаются и по возможности исключаются из каждого наблюдения, что позволяет ослабить влияние систематических ошибок на вычисляемые координаты звезд.

Каждое наблюдение звезды дает ее видимые координаты на момент наблюдения. Необходимо так осреднить эти координаты для каждой звезды и представить данные в такой форме, чтобы в дальнейшем использование исходных каталогов было возможно более удобным. Поэтому координаты, полученные для отдельных моментов, следует привести к началу какого-либо Бесселева года, т. е. дать в единой системе координат. Приведение к началу Бесселева года достигается сначала переводом наблюдаемых координат с момента наблюдения к началу года наблюдений учетом влияния абберрации, нутации и прецессии, а затем учетом одной прецессии — на принятое равноденствие каталога; когда требуется, учитываются и параллаксы звезд. В настоящее время согласно постановлению Международного Астрономического союза принята единая система средних экваториальных координат для равноденствия 1950,0.

Равноденствие исходного каталога, таким образом, показывает, каким положением среднего экватора и эклиптики задается сетка средних экваториальных координат, относительно которой приводятся координаты звезд в исходном каталоге. Равноденствие каталога не следует путать с эпохой наблюдения каталога, под которой понимается средняя эпоха наблюдения отдельных звезд каталога.

Полученные в результате приведения к единой координатной системе отдельные положения звезд осредняются, иногда с весами. На основании этих окончательных значений координат звезд и составляется исходный каталог звездных положений, который содержит для некоторого списка звезд полученные из наблюдений данные, позволяющие задать среднюю экваториальную систему координат для некоторой средней фиксированной эпохи наблюдений. Эпохи наблюдений для отдельных звезд каталога, как

правило, незначительно различаются, однако это не имеет принципиального значения.

Исходный каталог имеет обычно следующую структуру. Звезды каталога располагаются в порядке возрастания прямых восхождений и нумеруются по порядку. Для каждой звезды приводится звездная величина согласно какому-либо фотометрическому каталогу. Затем даются прямые восхождения и склонения, полученные осреднением отдельных наблюденных значений, а также средние эпохи наблюдения этих координат по каждой звезде. Иногда приводятся выведенные на основании внутреннего согласия отдельных наблюдений средние квадратические ошибки координат каждой звезды. Кроме того, для облегчения сравнения полученных данных с данными других каталогов для каждой звезды приводится вычисленная поданным Ньюкомба годовая прецессия по прямому восхождению и по склонению, ее вековые изменения, а также номера звезд по другим источникам. В примечаниях даются особые признаки звезды: переменность, кратность, название в созвездии или обстоятельства наблюдения. Иногда приводится спектральный класс, например, по гарвардской классификации.

Исходные звездные каталоги положений в зависимости от примененного метода наблюдений делятся на абсолютные и относительные. Первые содержат меньшее число звезд, — обычно порядка тысячи, что объясняется трудоемкостью абсолютных наблюдений. Относительные каталоги положений могут быть получены как визуальным, так и фотографическим методом. Относительные визуальные каталоги, как правило, содержат порядка 10—25 тысяч звезд, фотографические же в несколько раз большее число звезд, достигающее иногда по всем зонам склонения порядка 150—200 тысяч. Для решения частных задач создаются каталоги и с меньшим числом звезд.

Исходные каталоги звездных положений используются как материал для:

- 1) создания наиточнейшей фундаментальной системы координат— построения фундаментальных каталогов;
- 2) распространения фундаментальной системы на большое число звезд и получения опорных каталогов для фотографических наблюдений;
- 3) создания обзорных каталогов большого числа звезд для изучения строения Галактики и отдельных ее областей.

Рассмотрим вопрос об оценке точности исходных каталогов положений звезд, получаемых визуальным методом.

Оценка точности каталогов звездных положений есть, с одной стороны, очень важная задача, позволяющая установить степень достоверности заключенной в них информации, а следовательно, и результатов исследований, опирающихся на данные каталоги; с другой стороны, есть задача весьма сложная, ввиду отсутствия идеального эталона сравнения, что делает многочисленные критерии оценки ошибок каталогов неполноценными и в известной степени искусственными. Отсутствие единого простого критерия точности звездного каталога положений вызывает необходимость при решении разных задач опираться на различные по своему характеру оценки точности, что не позволяет иногда производить строгое сопоставление результатов различных исследований.

Ошибки каталогов подразделяются на систематические и случайные. Отсюда и две оценки точности: в систематическом и случайном отношении. Это подразделение ошибок, с одной стороны, достаточно резкое, — систематические ошибки каталога действуют закономерным образом на положения конкретной группы звезд, а случайные ошибки, как это считается, влияют независимо на индивидуальные координаты отдельных звезд, с другой стороны, эти ошибки не всегда могут быть разграничены и часто к систематическим ошибкам приходится применять критерии случайных ошибок и наоборот, что не всегда можно строго обосновать.

Критерии подхода к оценкам могут быть различными. Здесь следует выделить критерий оценки по внутреннему согласию или оценку внутренней

точности каталога. В этом случае оценка производится лишь на основании данных наблюдаемого каталога. Привлечение других каталогов позволяет оценить внешнюю точность каталога по согласию его данных с данными других каталогов. По внутренней сходимости оцениваются преимущественно случайные ошибки каталога. По внешней, — лучше оцениваются его систематические ошибки.

Систематические ошибки каталогов являются ошибками, искажающими одновременно координаты либо для звезд некоторого участка небесной сферы, либо для звезд, имеющих общий признак. Ошибки, действующие на участке небесной сферы, плавно изменяются при переходе к соседним участкам и являются функциями экваториальных координат. Ошибки, характерные для подгруппы звезд, имеют своим аргументом звездную величину, спектральный класс и т.п. Как показала практика, систематические ошибки каталогов достаточно хорошо представляются выражениями:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \Delta\alpha_0 + \Delta\alpha_\alpha + \Delta\alpha_\delta + \Delta\alpha_m + [\Delta\alpha_{sp}], \\ \Delta\delta = [\Delta\delta_0] + \Delta\delta_\alpha + \Delta\delta_\delta + [\Delta\delta_m] + [\Delta\delta_{sp}], \end{cases} \quad (1)$$

где значки указывают на аргумент, а в скобках стоят реже изучаемые ошибки. Систематические ошибки первоклассных систем не превышают величины $0^s,01$ по прямому восхождению и $0'',1$ по склонению. Естественно, у исходных каталогов эти величины могут быть больше в несколько раз.

Для систематических ошибок собственных движений приняты выражения:

$$\begin{aligned} \Delta\mu_\alpha &= (\Delta\mu_\alpha)_\alpha + (\Delta\mu_\alpha)_\delta + [(\Delta\mu_\alpha)_m], \\ \Delta\mu_\delta &= (\Delta\mu_\delta)_\alpha + (\Delta\mu_\delta)_\delta + [(\Delta\mu_\delta)_m], \end{aligned}$$

которые являются, по сути дела, изменениями соответствующих систематических ошибок координат со временем.

Первые три члена в представлениях систематических ошибок (1) искажают геометрию координатной сетки, что наглядно изображено на рис. 2.2.1. Постоянные члены α_0 и δ_0 суть соответственно поправки нуль-пункта системы прямых восхождений и поправки системы склонений для экваториальной зоны. Последние члены, зависящие от индивидуальных характеристик звезд, имеют в основном значение для фотографических каталогов, поскольку отражают влияние уравнения блеска и цвета. Можно отметить следующие причины появления систематических ошибок: аномальная рефракция и гнутые трубы проявляют себя в ошибках вида $\Delta\delta_\delta$, ошибки цапф и боковое гнутие в ошибках $\Delta\alpha_\delta$, сезонные влияния в ошибках $\Delta\alpha_\alpha$ и $\Delta\delta_\alpha$. За последнее время обнаружены более сложные зависимости систематических ошибок от экваториальных координат и поэтому они стали изучаться по отдельным участкам небесной сферы, т.е. как функции двух переменных $\Delta\alpha = A(\alpha, \delta)$ и $\Delta\delta = D(\alpha, \delta)$.

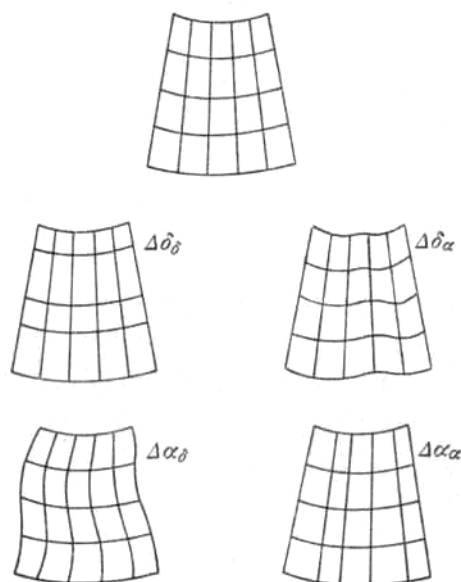


Рис. 2.2.1. Систематические ошибки каталогов

Систематические ошибки каталога определяют его систему и ввиду отсутствия безошибочного эталона не могут быть определены непосредственно. Однако, имея два каталога с достаточным количеством общих звезд, можно определить разности систематических ошибок или

систематические разности каталогов по тому или другому аргументу, т.е. произвести сравнение каталогов.

В случае сравнения с первоклассной системой или многими каталогами можно судить об относительной точности системы данного сравниваемого каталога. Получение систематических разностей позволяет привести отдельные каталоги на одну систему исправлением положений всех звезд в каталоге найденными из сравнения систематическими разностями. Представление о ходе и величине систематических разностей современных наилучших каталогов дает рис. 2.1.1.

Случайные ошибки каталогов являются следствием случайных ошибок наблюдений и считаются подчиняющимися законам нормального распределения. Внутренняя точность каталога в случайном отношении оценивается по сходимости нескольких наблюдений координат данной звезды. Средняя квадратическая ошибка одного наблюдения прямого восхождения и склонения вычисляется соответственно по следующим формулам:

$$\varepsilon'_{\alpha} = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta \alpha^2}{N-m}}, \quad \varepsilon'_{\delta} = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta \delta^2}{N-m}},$$

где $\Delta \alpha$ и $\Delta \delta$ — отклонения отдельных определений координат данной звезды от их средней приведенной в каталоге величины, N — общее число отклонений $\Delta \alpha$ и $\Delta \delta$, m — число использованных звезд.

Средняя квадратическая ошибка одного наблюдения для современных каталогов хорошего качества, полученных на меридианных кругах, приблизительно равна для прямого восхождения $\varepsilon'_{\alpha} \cos \delta \approx \pm 0^{\text{с}}, 015$ и для склонения $\varepsilon'_{\delta} \approx \pm 0^{\text{с}}, 3$. Так как обычно производится от 4 до 8 наблюдений, то соответствующая точность положения будет $\varepsilon_{\alpha} \cos \delta \approx \pm 0^{\text{с}}, 005 - \pm 0^{\text{с}}, 008$ и $\varepsilon_{\delta} \approx \pm 0,10 - \pm 0^{\text{с}}, 15$.

Величины $\varepsilon_{\alpha} \varepsilon_{\delta}$ показывают зависимость от числа наблюдений, несколько отклоняющуюся от законов нормального распределения:

$$\varepsilon^2(n) = \varepsilon^2(\infty) + \frac{\varepsilon'^2}{n},$$

где $\varepsilon(\infty)$ есть ошибка при бесконечно большом числе наблюдений. Таким образом, на практике случайные ошибки не могут быть значительно уменьшены за счет увеличения числа наблюдений, ибо величина $\varepsilon(\infty)$, характеризующая наличие систематических ошибок каталогов, ставит предел этому уменьшению. Оценить величину $\varepsilon(\infty)$ можно лишь из сравнения двух каталогов, т.е. из оценки внешней точности каталога в случайном отношении.

Для этой цели после приведения каталогов на одну систему образуют разности $\Delta\alpha \cos \delta$ и $\Delta\delta$ экваториальных координат для каждой общей звезды в каталогах. Величина средней квадратической ошибки разности для каждой координаты в отдельности находится по формуле

$$\varepsilon_{I-II}^2 = \frac{\sum \Delta^2}{n}, \quad \text{где } \Delta = \Delta\alpha \cos \delta, \quad \text{либо } \Delta = \Delta\delta.$$

В знаменателе отсутствует единица, ибо истинное значение разности равно нулю. С другой стороны, величина ε_{I-II} является суммой средних квадратических ошибок каталогов, т.е. $\varepsilon_{I-II}^2 = \varepsilon_I^2 + \varepsilon_{II}^2$. Это соотношение позволяет получить ε_I , если величина ε_{II} , изучена или известна из других исследований. Анализируя величины ε_I для разного числа наблюдений и зная среднюю квадратическую ошибку одного наблюдения ε' из внутренней оценки точности, можно определить $\varepsilon(\infty)$ и оценить степень исключения систематических ошибок.

На рис. 2.2.2 приведены величины, характеризующие точность визуальных каталогов в случайном отношении для обеих координат и для разных исторических эпох. Повышение точности наблюдений объясняется улучшением качества инструментов и совершенствованием методики наблюдения и обработки. При оценке точности каталогов надо помнить, что ее характеристика складывается из случайных ошибок внутри системы каталога и ошибок самой системы. В случае сводных каталогов необходимо еще учитывать случайные и систематические ошибки собственных движений. Перейдем к обзору некоторых характерных рядов наблюдений, послуживших созданию исходных каталогов.

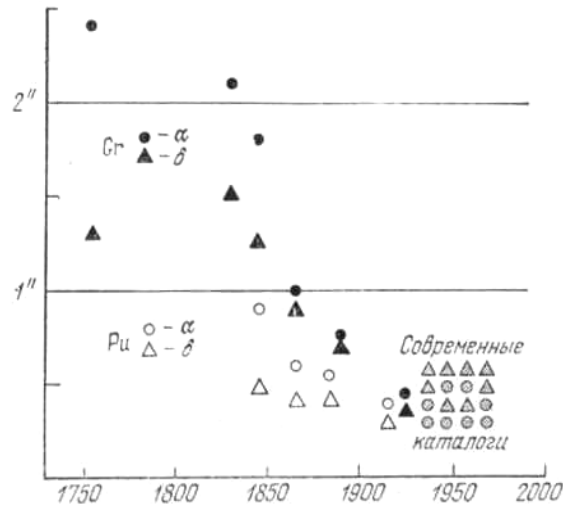


Рис. 2.2.2. Точность каталогов положений звезд в случайном отношении

Вопросы:

1. В чем суть исходных звездных каталогов?
2. Для каких целей координаты звезд, полученные для отдельных моментов, приводят к началу Бесселева года?
3. Какую структуру имеют исходные звездные каталоги?
4. В чем причина систематических ошибок координат звезд? И как с ними борются?

§ 2.3. Определение поправок ориентировки фундаментальной системы координат

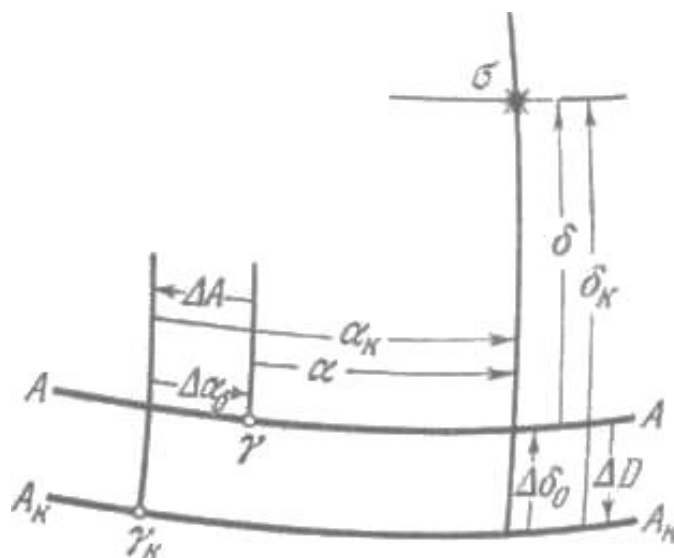


Рис. 2.3.1. Поправки ориентировки фундаментальной системы

Поправки ориентировки фундаментальной системы координат являются поправками ее нуль-пунктов и включают поправку равноденствия и поправку экватора. Рисунок 6 поясняет смысл этих величин. Точками γ_K и γ изображены соответственно положение точки равноденствия, задаваемое каталогом, и безошибочное истинное положение самой точки весеннего равноденствия для этой же эпохи. Для некоторой звезды σ из каталога каталожное прямое восхождение α_K , отсчитываемое от γ_K , связано с истинным прямым восхождением соотношением: $\alpha = \alpha_K - \Delta\alpha_0 = \alpha_K + \Delta A$, где $\Delta\alpha_0$ есть поправка равноденствия каталога, а ΔA — поправка системы прямых восхождений каталога. Нетрудно видеть, что $\Delta A = -\Delta\alpha_0$. Аналогично вводится поправка экватора каталога $\Delta\delta_0$ и поправка системы склонений каталога ΔD , связанные соотношением $\delta = \delta_K - \Delta\delta_0 = \delta_K + \Delta D$ (см. рис. 2.3.1), где $A_K A_K$ и $A A$ есть положение небесного экватора, задаваемое каталогом, и истинное положение небесного экватора для той же эпохи. Поправки ориентировки, как нетрудно видеть, показывают, на сколько надо сдвинуть точку весеннего равноденствия и экватор, задаваемые каталогом, чтобы они заняли свои истинные положения.

Следует отметить некоторое принципиальное различие поправки равноденствия и поправки экватора. Поправка равноденствия определяет общую поправку ко всем прямым восхождениям, т.е. является величиной, на которую смещена координатная сетка как единое целое. Поправка экватора относится только к экваториальной зоне и ею следует исправлять склонения звезд, расположенных лишь около экватора. Система склонений в полюсе обычно считается безошибочной, поскольку положение полюса фиксируется достаточно уверенно из наблюдений звезд в верхней и нижней кульминациях. Поэтому принимают, что поправка системы склонений по мере перехода от экваториальной зоны к соседним убывает по некоторому закону, достигая нулевого значения в полюсах.

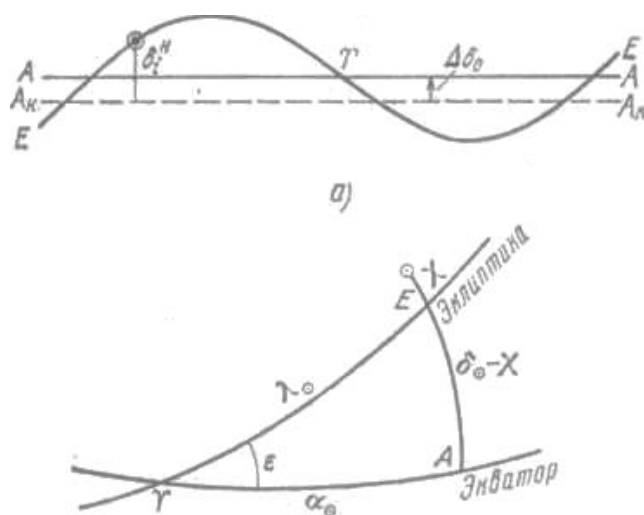


Рис. 2.3.2. К определению поправок нуля-пункта из наблюдений Солнца

Определение поправок ориентировки фундаментальной системы невозможно по наблюдению одних только звезд. Точка весеннего равноденствия задается пересечением плоскости экватора и эклиптики и ничем на небе не отмечена. Плоскость эклиптики не связана с расположением звезд на небе, а плоскость экватора не может быть зафиксирована из наблюдений звезд столь же уверенно, как положение полюсов. Поэтому поправка равноденствия и поправка экватора находятся косвенно из наблюдений тел Солнечной системы. Тихо Браге еще в XVI

столетии предложил сопровождать получение каждого звездного каталога рядами наблюдений Солнца для вывода поправки равноденствия. Так и поступали на протяжении нескольких столетий, пока к концу XIX столетия требования к точности положения точки весеннего равноденствия не возросли настолько, что задача уточнения ее положения наряду с задачей определения поправки экватора выделились в самостоятельную проблему.

Недостаточная точность визуальных наблюдений Солнца вследствие большого углового размера, яркости и воздействия его теплового излучения на инструмент заставили обратиться к наблюдениям больших планет, которые имеют меньшие угловые размеры и могут наблюдаться ночью. С развитием более точных методов позиционных наблюдений перешли к фотографическим определениям положений малых планет. Последние особенно удобны для измерения, ибо их изображения на астронегативе имеют звездообразный вид. Рассмотрим принцип определения поправок ориентировки фундаментальной системы по наблюдениям Солнца и по наблюдениям планет, классические основы которых разработаны Ньюкомбом.

Для вывода поправок $\Delta\alpha_0$ и $\Delta\delta_0$ по наблюдениям Солнца параллельно с получением экваториальных координат звезд на меридианных инструментах определяются прямые восхождения и склонения Солнца в системе наблюдаемого каталога. На рис. 2.3.2, а изображена эклиптика EE , небесный экватор AA и экватор A_k , задаваемый каталогом.

Каждое наблюденное склонение Солнца δ_i^H может быть представлено как $\delta_i^H = \delta_i^\odot + \delta_0$, где $\delta_i^\odot$ — истинное значение склонения Солнца. Если наблюдения Солнца ведутся равномерно в течение года, то в среднем за год можно записать так:

$$\frac{1}{n} \sum \delta_i^H = \frac{1}{n} \sum (\delta_i^\odot + \delta_0) = \frac{1}{n} \sum \delta_i^\odot + \Delta\delta_0$$

где n — число наблюдений. Поскольку при условии учета возмущений видимый путь Солнца представляется большим кругом, то $\sum \delta_i^\odot$ и

поправка экватора оказывается равной $\Delta\delta_0 = \frac{1}{n} \sum \delta_i^H$. Неравномерность наблюдений во времени может быть учтена соответствующим образом.

Следующее очевидное соотношение:

$\alpha_i^\odot = \alpha_i^H - \Delta\alpha_0 = \alpha_\varepsilon + \Delta\alpha_\varepsilon$ связывает поправку нуль-пункта прямых восхождений с величинами: истинным прямым восхождением Солнца $\alpha_i^\odot$, наблюдаемым α_i^H , эфемеридным α_ε ; последнее требует поправки $\Delta\alpha_\varepsilon$. Отсюда имеем: $\Delta\alpha_0 = \Delta\alpha - \Delta\alpha_\varepsilon$, где $\Delta\alpha = \alpha_i^H - \alpha_\varepsilon$. Величина $\Delta\alpha$ находится из сравнения наблюдаемых прямых восхождений Солнца с их эфемеридными значениями. Величина $\Delta\alpha_\varepsilon$ находится из выравнивания внутри года наблюдаемых склонений Солнца.

Для этого возьмем логарифмическую производную от выражения $\sin\delta = \sin\varepsilon \sin\lambda$, получаемого из треугольника γEA (см. рис. 2.3.2,б) и перейдем к конечным приращениям; тогда будем иметь

$$\frac{\Delta\delta}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\Delta\varepsilon}{\operatorname{tg} \varepsilon} + \frac{\Delta\lambda}{\operatorname{tg} \lambda};$$

воспользовавшись выражениями $\operatorname{tg} \delta = \sin \alpha \operatorname{tg} \varepsilon$ и $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \lambda \cos \varepsilon$, из того же треугольника получим: $\Delta\delta = \Delta\varepsilon \sin \alpha + \Delta\lambda \sin \varepsilon \cos \alpha$. Обозначим неизвестную поправку наклона экватора к эклиптике $\Delta\varepsilon$ через y , величину $\Delta\lambda \sin \varepsilon$ через z и, добавляя неизвестную $x = \Delta\delta_0$ — поправку экватора каталога, получим основное уравнение:

$$\Delta\delta = x + y \sin \alpha + z \cos \alpha.$$

Осредняя данные наблюдений $\Delta\delta = \delta_i^H - \delta_\varepsilon$ за год по месяцам, получим двенадцать уравнений, решая которые по способу наименьших квадратов находим неизвестные. Нетрудно показать, что в среднем за год $\overline{\Delta\lambda_\varepsilon} = \overline{\Delta\alpha_\varepsilon}$ и, следовательно, интересующая нас величина $\overline{\Delta\alpha_\varepsilon}$ равна $\frac{\varepsilon}{\sin \varepsilon}$. Зная $\overline{\Delta\alpha_\varepsilon}$ и образовав ее разность со средней за год величиной наблюдаемых значений, найдем поправку равноденствия каталога $\Delta\alpha_0 = \overline{\Delta\alpha} - \overline{\Delta\alpha_\varepsilon}$, а величина x даст непосредственно поправку экватора.

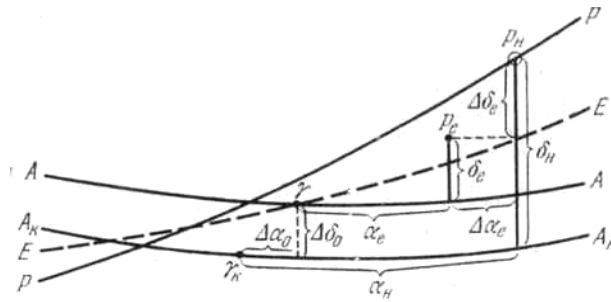


Рис 2.3.3. К определению поправок ориентировки из наблюдений планет.

В случае наблюдения планеты предполагается, что имеется достаточно точная теория движения и определены элементы орбиты, позволяющие вычислить эфемеридные значения ее координат. Разности наблюдаемых и эфемеридных значений координат планеты интерпретируются как следствие ошибок системы координат, относительно которой производились наблюдения и неточностей элементов орбит планеты и Земли, использованных при вычислении эфемерид.

Истинные значения экваториальных координат планеты могут быть представлены следующим образом:

$$\alpha = \alpha_N - \Delta\alpha_0 = \alpha_e + \Delta\alpha_e,$$

$$\delta = \delta_N - \Delta\delta_0 = \delta_e + \Delta\delta_e,$$

где α_e, δ_e и $\Delta\alpha_e, \Delta\delta_e$ — эфемеридные значения координат и их поправки (рис. 2.3.3).

Отсюда

$$\alpha_N - \alpha_e = \Delta\alpha_0 + \Delta\alpha_e = \Delta\alpha_0 + (\Delta\alpha_e)_{\text{З}} + (\Delta\alpha_e)_{\text{П}},$$

$$\delta_N - \delta_e = \Delta\delta_0 + \Delta\delta_e = \Delta\delta_0 + (\Delta\delta_e)_{\text{З}} + (\Delta\delta_e)_{\text{П}}.$$

Последние члены в скобках есть ошибки эфемерид, происходящие вследствие ошибок элементов орбиты Земли и ошибок элементов орбиты планеты. Влияние ошибок элементов орбиты планеты может быть представлено согласно теории ошибок следующим образом:

$$(\Delta\alpha_e)_P = \frac{\partial \alpha}{\partial \Omega} \Delta\Omega + \frac{\partial \alpha}{\partial i} \Delta i + \frac{\partial \alpha}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial \alpha}{\partial e} \Delta e + \frac{\partial \alpha}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial \alpha}{\partial M_0} \Delta M_0,$$

$$(\Delta\delta_p)_p = \frac{\partial\delta}{\partial\Omega}\Delta\Omega + \frac{\partial\delta}{\partial i}\Delta i + \frac{\partial\delta}{\partial\alpha}\Delta\alpha + \frac{\partial\delta}{\partial e}\Delta e + \frac{\partial\delta}{\partial\omega}\Delta\omega + \frac{\partial\delta}{\partial M_0}\Delta M_0,$$

где каждый член отражает влияние одного из элементов орбиты, а производные есть функции, известные из теории движения планеты. Для Земли, орбита которой определяется пятью элементами: ϵ , a' , e' , ω' , , можно записать аналогичные соотношения. Обозначая элементы орбиты планеты и Земли через E_i и E'_i соответственно, запишем основные уравнения в общем виде:

$$\begin{cases} \alpha_H - \alpha_E = \Delta\alpha_0 + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial\alpha}{\partial E_i} \Delta E_i + \sum_{i=1}^5 \frac{\partial\alpha}{\partial E'_i} \Delta E'_i, \\ \delta_H - \delta_E = \Delta\delta_0 + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial\delta}{\partial E_i} \Delta E_i + \sum_{i=1}^5 \frac{\partial\delta}{\partial E'_i} \Delta E'_i, \end{cases} \quad (3)$$

Решение этих уравнений требует применения электронно-вычислительных машин и производится в несколько приближений. Сначала по всему материалу определяются общие неизвестные поправки элементов орбиты Земли, а затем по наблюдениям каждой планеты находятся поправки элементов их орбит в первом приближении. Последующее совместное решение всех уравнений позволяет определить главные неизвестные — поправку равноденствия и поправку экватора. Такова схема обработки — на практике все обстоит значительно сложнее. Рассмотрим теперь, как получаются координаты тел Солнечной системы из наблюдений.

Наблюдение тел Солнечной системы — самого Солнца, больших и малых планет, — с целью получения их положений относительно звездного фона производится визуальным и фотографическим методами. Выведенные положения используются для уточнения теории движения, улучшения ориентировки фундаментальной системы координат, определения астрономических постоянных. Большую значимость позиционные наблюдения планет и их спутников приобрели в связи с исследованием космоса и запуском космических аппаратов в пределы Солнечной системы. В будущем для решения перечисленных задач будут привлекаться также и расстояния до тел Солнечной системы, полученные радио- и светолокационными методами.

В настоящее время визуальные меридианные наблюдения тел Солнечной системы сохраняют свое значение лишь для Солнца и внутренних планет Меркурия и Венеры. Визуальные наблюдения Солнца, Меркурия и Венеры производятся днем обычно дифференциальным методом, причем в качестве опорных звезд выбираются наиболее яркие звезды эклиптического пояса небесной сферы, видимые днем в меридианные инструменты. Еще в прошлом для этой цели были с особым старанием выведены точные координаты 36 звезд, получивших название звезд Маскелайна. До и после наблюдения объекта наблюдаются несколько опорных звезд, по которым определяются параметры установки инструмента.

При наблюдении Солнца наведения нитей окулярного микрометра меридианного инструмента производятся на края изображения диска Солнца и отсчет на его центр получается как среднее арифметическое из наведений на диаметрально противоположные точки края изображения. В случае наблюдения Меркурия наведение обычно производится на центр видимого диска. Наблюдения Венеры осложняются явлением ее фаз, требующим учета ущербности диска, что необходимо также и для Меркурия. Точность дневных наблюдений Солнца, Венеры и Меркурия на порядок хуже точности ночных визуальных наблюдений звезд в силу влияния солнечного тепла на инструмент, большого видимого поперечника диска Солнца и плохого качества изображений Меркурия и Венеры, наблюдаемых на небольшом угловом удалении от Солнца. Следует отметить, что наблюдения Солнца, Меркурия и Венеры в настоящее время производятся главным образом для уточнения орбит.

Фотографический метод, более точный, чем визуальный, с успехом применяется для позиционных наблюдений тел Солнечной системы. Этим методом наблюдаются, за исключением Солнца и Меркурия, все планеты — большие и малые, спутники планет и Луна. Методика фотографических наблюдений тел Солнечной системы достаточно разнообразна из-за их

большого фотометрического диапазона, а также большей яркости планет и Луны по сравнению с блеском опорных звезд.

Наиболее просто обстоит дело в случае малых планет. Наблюдения, измерения и обработка астронегативов с их изображениями ничем не отличаются от таковых при определении положений отдельных звезд. Необходимо получать несколько астронегативов с изображением малой планеты в течение ночи, либо производить несколько экспозиций на одном астронегативе, чтобы отождествить ее изображение по его смещению относительно изображений звезд. Изображения малых планет получаются звездообразными и измеряются аналогично звездам. Блеск малых планет, используемых в астрономических целях, близок к $10\text{--}12^m$, поэтому не возникает ошибки уравнения блеска в силу привязки к опорным звездам примерно той же величины. В случае выбора опорных звезд спектрального класса, близкого к спектральному классу Солнца, ослабляется и влияние атмосферной дисперсии.

Значительная яркость больших планет — Урана, Нептуна, Сатурна, Юпитера и Марса, а также Венеры доставляет известную трудность и заставляет использовать некоторые приемы для ослабления светового потока от планеты с тем, чтобы за время экспозиции, необходимой для получения изображений опорных звезд, изображение планеты на астронегативе не было передержанным и непригодным для измерения из-за большого ореола. В случае наблюдения спутников планет ореол вокруг изображения планеты замыкает изображения слабых спутников. Ослабление светового потока планеты, попадающего на эмульсию фотопластинки, достигается с помощью местного фильтра, откидной заслонки или вращающегося секторного obturatora. Иногда производят локальное понижение чувствительности эмульсии фотопластинки на участке, где впоследствии получается изображение планеты. Измерения дисков планет на астронегативе также требуют особого подхода и, в частности, специальной сетки нитей в измерительном приборе для ослабления личных ошибок и измерения.

Наиболее сложны наблюдения Луны и Венеры, поскольку к затруднениям, возникающим вследствие их большой яркости, добавляется быстрое движение этих небесных светил относительно звезд, смазывающее изображение даже при коротких экспозициях. Была изобретена специальная кассета с медленно поворачивающимся перед пластинкой плоскопараллельным фильтром. Вращение фильтра около оси, перпендикулярной к направлению движения светила, компенсирует смещение изображения по пластинке и оставляет изображение Луны или Венеры неподвижным относительно звездного фона (см. § 48 «Общая астрометрия» В.В.Подобед, В.В.Нестеров). Поскольку фильтр делается весьма плотным, то происходит ослабление светового потока светила и уравнивание продолжительности экспозиции для светила и звезд. Измерение изображения диска Луны, а также иногда и Венеры, с целью определения координат его центра производится путем наведения на точки края диска. Известную трудность представляет учет неровности края для Луны и учет фазы для Венеры.

Экваториальные координаты планеты выводятся методами фотографической астрометрии по измерению некоторого числа опорных звезд. Метод редукции Тернера используется наряду с методом Шлезингера. Точность определения положений тел (Солнечной системы) фотографическим методом относительно системы опорных звезд характеризуется примерной средней квадратической ошибкой: для звезд $\pm 0",15$, больших планет $\pm 0",25$, малых планет $\pm 0",15$, Луны $\pm 0",35$.

Определения поправок ориентировки существовавших до настоящего времени фундаментальных систем производились по наблюдениям Солнца, Луны и больших планет. Учитывая отмечавшиеся выше методические неудобства наблюдения этих светил, Ф. Дайсон в 1928 году предложил использовать для решения этой задачи малые планеты. Это предложение было поддержано советскими астрометристами в 1932 году, когда

Б.В.Нумеров разработал теоретические основы определения ориентировки фундаментальной системы применительно к наблюдениям малых планет.

Многочисленность малых планет и их не слишком замедленное сравнительно с Солнцем движение (все прямые восхождения они проходят за 2,5 года) позволяет создать рациональную программу наблюдений из некоторого числа малых планет, рассчитанную на период около десяти лет и покрывающую наблюдениями экваториальную зону в пределах $\pm 30^\circ$ по склонению (см. рис. 2.3.4). Последнее делает возможным включение в основные уравнения (3) помимо постоянных поправок ориентировки, периодических членов типа $a \sin \alpha + b \cos \alpha$ по обеим координатам, характеризующих ошибки фундаментальной системы вида $\Delta \alpha_\alpha$ и $\Delta \delta_\alpha$ в экваториальной зоне.

Теоретические исследования показали, что решение основных уравнений в случае малых планет есть задача весьма сложная и выполняемая только с помощью ЭВМ. Большое число неизвестных и существование зависимостей между ними требует длительных наблюдений специально подобранных малых планет. Анализ весов неизвестных показал, что имеются опасения в менее уверенном определении поправки равноденствия по сравнению с поправкой экватора. Кроме того, коэффициенты периодических членов систематических ошибок фундаментальной системы плохо разделяются с некоторыми другими неизвестными. Практической трудностью является привязка наблюдений малых планет к единой системе координат ввиду отсутствия единого опорного каталога для фотографических определений, что вынуждает использовать отдельные каталоги, недостаточно уверенно воспроизводящие фундаментальную систему.

За последние десятилетия проведены ряды наблюдений малых планет, среди которых следует отметить завершенную программу 15 избранных планет Брауэра и программу советских наблюдений 10 избранных малых планет; обработка этих наблюдений завершается.

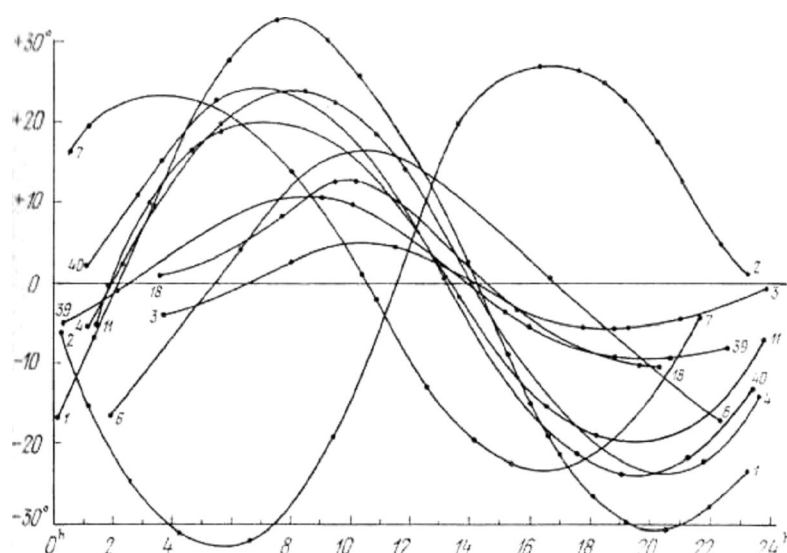


Рис. 2.3.4. Распределение по небу оппозиций десяти избранных малых планет.

В таблице 2 приведены результаты наиболее значительных работ по определению поправок ориентировки фундаментальных систем за XX столетие. Для возможности сравнения результатов поправки равноденствия даются относительно системы Ньюкомба N_1 , а поправки экватора относительно системы NFK, выведенной Петерсом. Хорошее совпадение результатов показывает возможность решения проблемы определения поправок ориентации фундаментальных систем на достаточно высоком уровне из позиционных наблюдений тел Солнечной системы.

Таблица 1

Поправка равноденствия и поправка экватора по некоторым определениям				
Объект наблюдений	Период наблюдений	$\Delta\alpha_0$ к N_1	$\Delta\delta_0$ к NFK	Исследователь
$\odot$	1903—1915	$+0^s,045$	—	Идельсон
$\odot, \text{♀}, \text{♂}, \text{♂}$	1750—1920	$+0,038$	—	Морган
$\text{♂}, \text{♀}, \odot, \text{♂}, \text{♂}, \text{♂}$	1894—1930	—	$-0'',18$	Морган
$\odot, \text{♂}, \text{♀}$	1900—1926	$+0,050$	—	Карштедт
$\odot, \text{♂}, \text{♀}$	1900—1926	—	$-0,20$	Хайнеман
♀	1750—1949	$+0,039$	$-0,17$	Данком
Церера, Паллада	1949—1955	$+0,052$	$-0,25$	Джексон
Юнона, Веста				
Церера, Паллада	1949—1962	$+0,043$	$-0,22$	Ясуда
Юнона, Веста				

Вопросы:

- 1. Какие проблемы возникли в конце XIX столетия к требованиям точности?*
- 2. Наблюдения каких объектов дают высокую точность при определении поправок ориентировки фундаментальной системы?*
- 3. Какие различия имеются при определении поправок ориентировки фундаментальной системы по наблюдениям Солнца и по наблюдениям планет Солнечной системы?*
- 4. Какой метод наблюдений наиболее популярен в настоящее время и дает большую точность?*

§2.4. Развитие фундаментальной системы координат

Как уже упоминалось, первый фундаментальный каталог был создан Бесселем в начале XIX столетия осреднением своих наблюдений (каталоги 1815 и 1825 гг.) и переработанных им наблюдений Бадделя, привлеченных для вывода собственных движений. На основании фундаментального каталога Бессель составил так называемые «Кенигсбергские таблицы» (TR), содержащие средние и видимые места 36 экваториальных звезд Маскелайна и двух близполюсных звезд для периода времени с 1750,0 по 1850,0. Улучшение фундаментальной системы Бесселя произвел по новым каталогам Вольферс, который учел средние систематические разности этих каталогов. На основании новой системы были опубликованы таблицы 47 звезд для периода 1860—1880 гг.

Современные фундаментальные системы обязаны своим появлением и развитием работам трех астрономических школ: Ньюкомба, Ауверса и Босса. И хотя цели, поставленные этими школами, были различны: определение астрономических постоянных и уточнение теории движения больших планет (Ньюкомб), создание каталога положений звезд 9—10-й звездной величины (Ауверс), изучение нашей звездной системы (Босс), работы этих школ, начавшиеся в семидесятых годах прошлого столетия, привели к созданию методов построения фундаментальных каталогов путем изучения случайных и систематических ошибок отдельных каталогов и явились предпосылками для дальнейшего совершенствования и развития полученных фундаментальных систем.

Первый каталог Ньюкомба, обозначаемый N_1 , был издан в 1872 г. и содержал прямые восхождения 32 экваториальных звезд (30 звезд Маскелайна, Сириус и Процион). Он составлен в два приближения объединением сначала двенадцати наилучших абсолютных каталогов, а затем еще четырнадцати дополнительных каталогов. Замечательным является вывод поправки равноденствия по наблюдениям Солнца за период 1750—1869 гг. Ньюкомб нашел поправку к прямым восхождениям

Кенигсбергских таблиц Бесселя $\Delta A_{TR} = +0^s, 016$. Равноденствие Ньюкомба принималось неизменным до 1935 г. во всех фундаментальных системах, когда оно было исправлено по исследованиям Карштедта (см. табл. 1).

В 1898 г. вышел второй фундаментальный каталог Ньюкомба, содержащий прямые восхождения и склонения 1257 звезд преимущественно зодиакальной зоны, полученные на основании 43 абсолютных каталогов. Фундаментальная система Ньюкомба N_2 имела большое значение для создания фундаментальных астрономических постоянных. Все Астрономические ежегодники, кроме Берлинского, около 1900 г. перешли на систему N_2 . Дальнейшего развития фундаментальные каталоги Ньюкомба не получили.

Первым международным кооперативным астрометрическим предприятием было организованное Германским Астрономическим обществом создание каталогов AGK (Astronomischer Gesellschaft Katalog). Это предприятие поставило задачу получения точных положений и собственных движений всех доступных визуальным меридианным наблюдениям звезд «Боннского обозрения» (BD), составленного Аргеландером в 1863 г. до склонения — 2° и продолженного затем до — 23° . Все звезды 9—10-й звездной величины были распределены между обсерваториями-участниками и наблюдались узкими зонами по склонению, откуда каталоги AGK иногда называют зонными. От России в данной работе приняли участие Казанская и Николаевская обсерватории.

Для однородности получаемых зонных каталогов необходимо было создать фундаментальный каталог опорных звезд. Этот каталог, опубликованный в 1879 г. и обозначаемый FC, явился первым фундаментальным каталогом Ауверса. В него вошли 539 звезд до — 10° по склонению, положения и собственные движения которых, выведенные по восьми, преимущественно Пулковским и Гринвичским каталогам, в дальнейшем были исправлены за случайные ошибки.

В связи с распространением зонных наблюдений на южное небо Ауверс составил каталог A_{303} (1889 г.) для 303 звезд со склонением от -2° до -23° и каталог A_5 (1897 г.) для 499 звезд в пределах от -20° до -82° , 6 склонения. Значительную роль в образовании систем этих южных фундаментальных каталогов играли наблюдения Капской и Кордовской обсерваторий. Каталоги FC, A_{303} и A_5 были объединены Петерсом к 1907 году с учетом новых рядов наблюдений в фундаментальный каталог NFK, который содержал положения для 925 звезд, распределенных по всему небу. Система каталога NFK, основанная на 90 каталогах, существовала до 1940 года.

Предприятие AGK закончилось выпуском на протяжении 1890-1910 годов пятнадцати каталогов положений 144 218 звезд для эпохи 1875,0. К 1924 году были закончены еще пять каталогов от -2° до -23° по склонению и содержащих 43 830 звезд до девятой величины. Точность каталогов AGK характеризуется ошибкой $\pm 0'',50$ по склонению и $+0^s,030$ secδ по прямому восхождению. Сравнение с позднейшими наблюдениями показало, что каталоги AGK обладают большими систематическими ошибками, в частности, уравниванием блеска. Сравнительно недавно закончены зонные каталоги для остальной части южного неба по наблюдениям в Кордове и Ла-Плате.

В 1924 году Астрономическое общество приняло решение о проведении фотографических перенаблюдений зонных каталогов. Для выполнения этой работы, получившей индекс AGK₂, необходимо было образовать новую фундаментальную систему и создать в этой системе опорный каталог слабых звезд для фотографических определений.

Новая фундаментальная система FK3 была выведена Копффом к началу тридцатых годов. Для улучшения системы NFK было использовано 77 каталогов, полученных в период с 1900 по 1930 гг. Помимо тщательного изучения и исправления систематических ошибок была улучшена ориентировка каталога NFK. Положение точки весеннего равноденствия

было исправлено на $0^s, 048$ по наблюдениям Солнца и больших планет. Была также учтена поправка экватора $+0'', 20$.

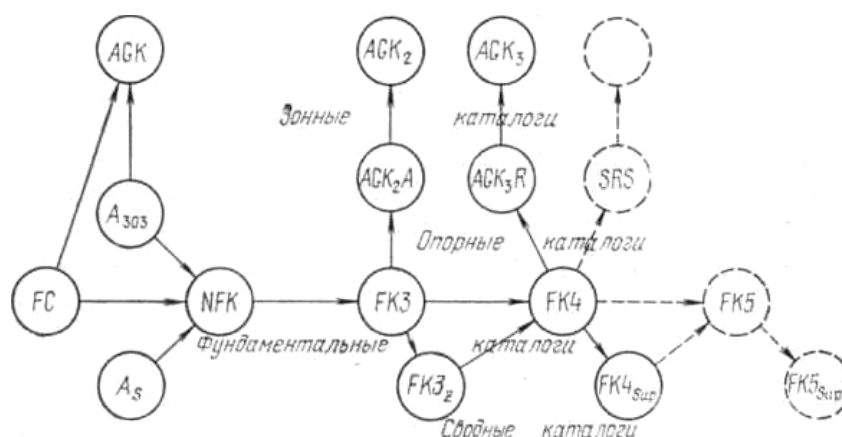


Рис. 2.4.1. Каталоги предприятия AGK.

Каталог FK3 содержит по всему небу 873 основные (использованные для вывода системы) и 662 дополнительные звезды ($FK3_z$), привлеченные для распространения системы. Средние квадратические ошибки положений и собственных движений звезд FK3 в случайном отношении невелики: так, ошибки прямых восхождений для эпохи 1900,0 и 1950,0 соответственно равны $\pm 0^s,002$ и $\pm 0^s,005$, а ошибки склонений — $\pm 0'',03$ и $\pm 0'',08$. В отношении систематических ошибок каталог FK3 также был достаточно хорош. По рекомендации Парижского съезда Международного Астрономического союза (1935 г.) система FK3 была принята в качестве основной фундаментальной системы для астрономических и геодезических работ всего мира и использовалась в Астрономических ежегодниках до 1964 года.

Опорный каталог AGK_2A , предназначенный для фотографических наблюдений, и содержащий 13 747 звезд $7,5-9^m,0$ от Северного полюса до -4° по склонению, был получен в системе каталога FK3 по дифференциальным меридианным наблюдениям семи обсерваторий, включая Пулково. Фотографические перенаблюдения зонных каталогов были

проведены в 1928—1932 гг. на трех специально изготовленных зонных астрографах (диаметр объектива 160 мм, фокусное расстояние 206 см). В результате обработки астронегативов с использованием опорного каталога AGK₂A были получены каталоги AGK₂Бергедорфа и Бонна, содержащие в системе FK3 положения для 180 000 звезд северного неба от +90° до —2° склонения. Средняя квадратическая ошибка каждой координаты в каталогах AGK₂ близка к ±0",15. Фотографические перенаблюдения зонных каталогов южного неба велись и ведутся на Йельской и Капской обсерваториях.

В 1952 г. на съезде МАСвРиме было одобрено начало работы по созданию новой фундаментальной системы FK4, которая предназначалась в качестве опорной системы для повторного фотографического перенаблюдения зонных каталогов AGK₃, а также быть основой для широтных и долготных определений по плану Международного геофизического года. Каталог FK4 был завершен Фрике и опубликован в 1963 г. Вывод системы положений каталога FK4 основан на абсолютных каталогах XX столетия, а для вывода системы собственных движений привлечены ряды каталогов, полученные на обсерваториях, регулярно наблюдавших с середины прошлого столетия. Это обеспечило первоклассную точность каталога FK4, который содержит 1535 звезд. Погрешность системы FK4 имеет тот же предел, как и случайная погрешность внутри системы (рис. 2.4.2). Случайная погрешность положений и собственных движений каталога FK4 характеризуется соответственно средними квадратическими ошибками: $\varepsilon_{\alpha} \cos \delta \approx \pm 0,001—0^s,002$ и $100 \cos \delta \approx \pm 0,005—0^s,012$ для прямого восхождения и $\varepsilon_{\delta} \approx \pm 0,02—0",03$ и $100 \varepsilon_{\mu_{\delta}} \approx \pm 0,10—0",15$ для склонения. Южные звезды имеют несколько меньшую точность. Каталог FK4 принят в качестве международной основы для Астрономических ежегодников с 1964 г.

Ранее предполагалось, что список звезд FK4 будет расширен за счет звезд, входящих в список FK3_{Sup}, однако к моменту формирования FK4 число

наблюдений этих дополнительных звезд было все еще недостаточно для использования их при выводе новой фундаментальной системы. Поэтому ограничились простым переводом координат 1987 ярких звезд до $7^m,0$ на систему FK4, и был образован каталог FK4_{Sup}. Звезды FK4 и особенно списка FK4_{Sup} успешно наблюдаются на многих обсерваториях мира, с тем, чтобы впоследствии на их основе образовать новую фундаментальную систему FK5, опирающуюся уже на 3500 звезд, что важно для практических целей использования фундаментального каталога. Имеются планы привлечения и слабых звезд в состав каталога FK5, который должен быть составлен к 1980 г.

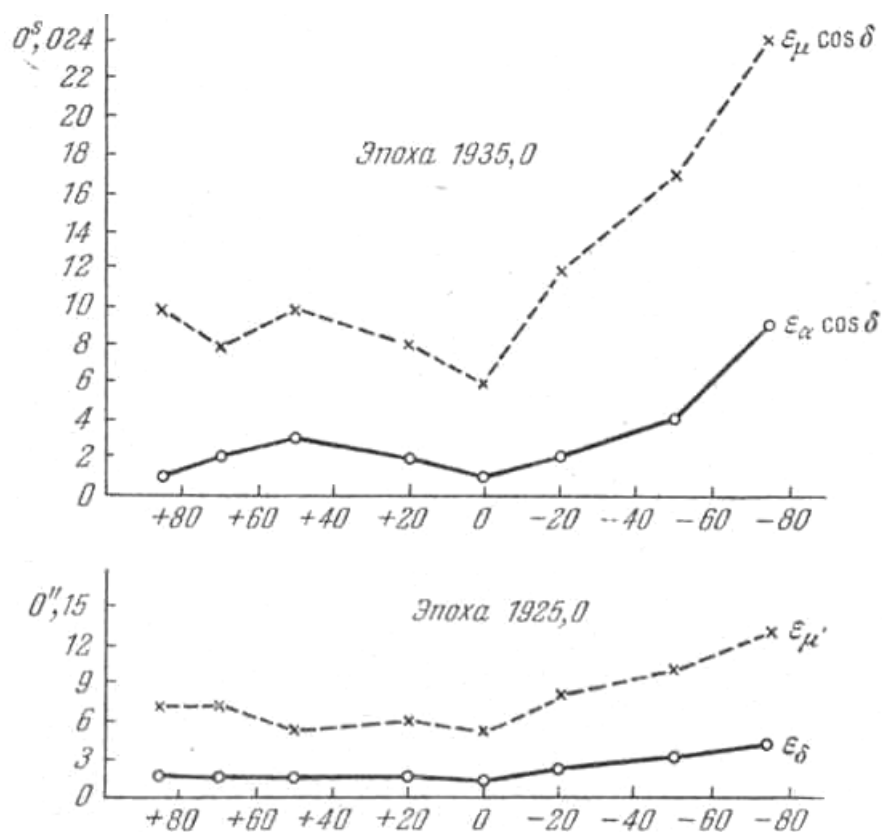


Рис. 2.4.2. Средние квадратические ошибки системы FK4.

В 1955 г. начались работы по фотографическим перенаблюдениям зонных каталогов, необходимые для последующего объединения всех зонных каталогов в сводный каталог. В период 1957—1958 гг. на зонных астрографах Бергедорфской и Боннской обсерваторий производились фотографические наблюдения для образования каталога AGK3. Для

обработки фотографических наблюдений был создан сводный опорный каталог AGK3R по меридианным наблюдениям одиннадцати обсерваторий мира, в том числе Пулковской и Николаева. Каталог AGK3R содержал положения 21 499 слабых звезд 7,5—9,0 звездной величины до -5° по склонению в системе FK4 с высокой точностью ($\varepsilon_\alpha = \pm 0^s,005 \sec \delta$, $\varepsilon_\delta = \pm 0'',12$). К 1971 году был получен каталог AGK₃, содержащий 180 000 звезд.

Школа Ауверса придерживалась принципа создания наиточнейшей фундаментальной системы, опираясь на относительно ограниченное число наиболее часто наблюдавшихся ярких звезд. В противоположность этому Босс поставил задачу создания фундаментального каталога, содержащего максимальное число звезд с целью получения основы для кинематических исследований в нашей Галактике и в первую очередь для изучения движения Солнца и галактического вращения.

Список звезд созданного Боссом каталога GC (General Catalogue) содержит 33 342 звезды, включая все звезды до 7,0 звездной величины и несколько тысяч более слабых звезд, обеспеченных ранее произведенными наблюдениями, необходимыми для вывода собственных движений. Предварительная фундаментальная система PGC была выведена на основе наблюдений (6188 звезд, затем было произведено ее улучшение, после чего все остальные звезды были переведены на эту систему. Для большого числа слабых звезд были организованы специальные наблюдения с одним и тем же инструментом в северном и южном полушариях Земли. Каталог GC появился в свет в 1937 г. Большое число звезд и произведенное сравнение каталога GC более чем с 350 другими каталогами обеспечили удобство использования фундаментальной системы GC для звездно-астрономических исследований. Однако каталог GC характеризуется неоднородной точностью: данные для ярких звезд близки по точности к FK3, слабые же звезды имеют значительно меньшую точность. Существенным недостатком каталога GC являются плохие собственные движения звезд, которые к 1970 г. сильно ухудшили качество фундаментальной системы (рис. 2.4.3).

Советские астрономы выдвинули в начале тридцатых годов предложение о создании каталога слабых звезд КСЗ. Первые фундаментальные системы использовались в основном для изучения движения тел Солнечной системы и для выполнения геодезических работ. Поэтому фундаментальные каталоги содержали только яркие звезды, удовлетворяющие этим задачам. Развитие фотографических методов наблюдения привело к необходимости создания фундаментальной системы, опирающейся непосредственно на слабые звезды, с тем, чтобы затем, распространив эту новую систему на большое число слабых звезд, получить опорный каталог, отвечающий всем требованиям фотографических определений.

Работа по созданию каталога слабых звезд КСЗ, которая была активно начата в СССР после Великой Отечественной войны по инициативе и под руководством М. С. Зверева, включает в себя несколько задач.

Первой предполагалось создание фундаментального каталога слабых звезд ФКСЗ. Равномерно распределенные по всему небу звезды этого каталога общим числом 945 характеризуются визуальной звездной величиной от 7,5 до 8,5, малым полным собственным движением, не превышающим 0",02 в год, спектральным классом Gi K. Выбранная звездная величина обеспечивает максимальную точность визуальных наблюдений слабых звезд, малое собственное движение — вероятное наибольшее удаление от Солнечной системы, что выгодно для кинематических исследований в Галактике, спектральный класс — большую звездную фотографическую величину. Проведены многочисленные наблюдения первых эпох звезд ФКСЗ до -30° по склонению на всех астрометрических обсерваториях Советского Союза и некоторых обсерваториях социалистических стран.

В дальнейшем после получения вторых эпох предстояло объединить все эти наблюдения на основе выведенной фундаментальной системы слабых звезд каталога FK5. Наличие в основном относительных

наблюдений звезд ФКСЗ в системе ярких звезд позволит лишь улучшить в рамках фундаментальной системы FK4 связь ярких и слабых звезд.

Следующей задачей являются меридианные наблюдения основного списка Каталога слабых звезд КСЗ в системе FK4. Звезды Каталога слабых звезд выбирались так, чтобы для обеспечения фотографических определений на любую площадь неба и 25 квадратных градусов приходилось 12 звезд. Список 15 000 звезд до -30° склонения обладает большой однородностью: визуальные звездные величины заключены в пределах 7,5 — 9,1 звездной величины, спектральные классы в основном от класса G до K, полные годовые собственные движения не превышают $0", 04$. В наблюдениях каталога КСЗ участвуют все советские обсерватории и некоторые зарубежные. Продолжение списка КСЗ на южное небо составила Капская обсерватория. Список звезд КСЗ полностью входит в состав AGK₃R, а список Капской обсерватории — в список SRS (SouthReferenceStars), наблюдающийся на обсерваториях южного полушария Земли.

В конце работ по плану КСЗ новая система положений и собственных движений должна быть улучшена по фотографическим наблюдениям малых планет и галактик, произведенным и относительно звезд КСЗ. Программа наблюдения малых планет предусматривает наблюдение десяти избранных малых планет, а программа наблюдений галактик содержит 300 площадок до -90° склонения, включающих более 450 галактик до 14,0 величины. Окончание всех работ по Каталогу слабых звезд с учетом необходимости наблюдений вторых эпох следует ожидать через 10 — 15 лет.

Вопросы:

1. *Расскажите о школах, легших в основу современных фундаментальных систем.*
2. *В чем особенность каталога FK4.*

3. Упомяните о недостатках в представленных в главе фундаментальных каталогах.
4. Какая особенность имеется у современных каталогов?

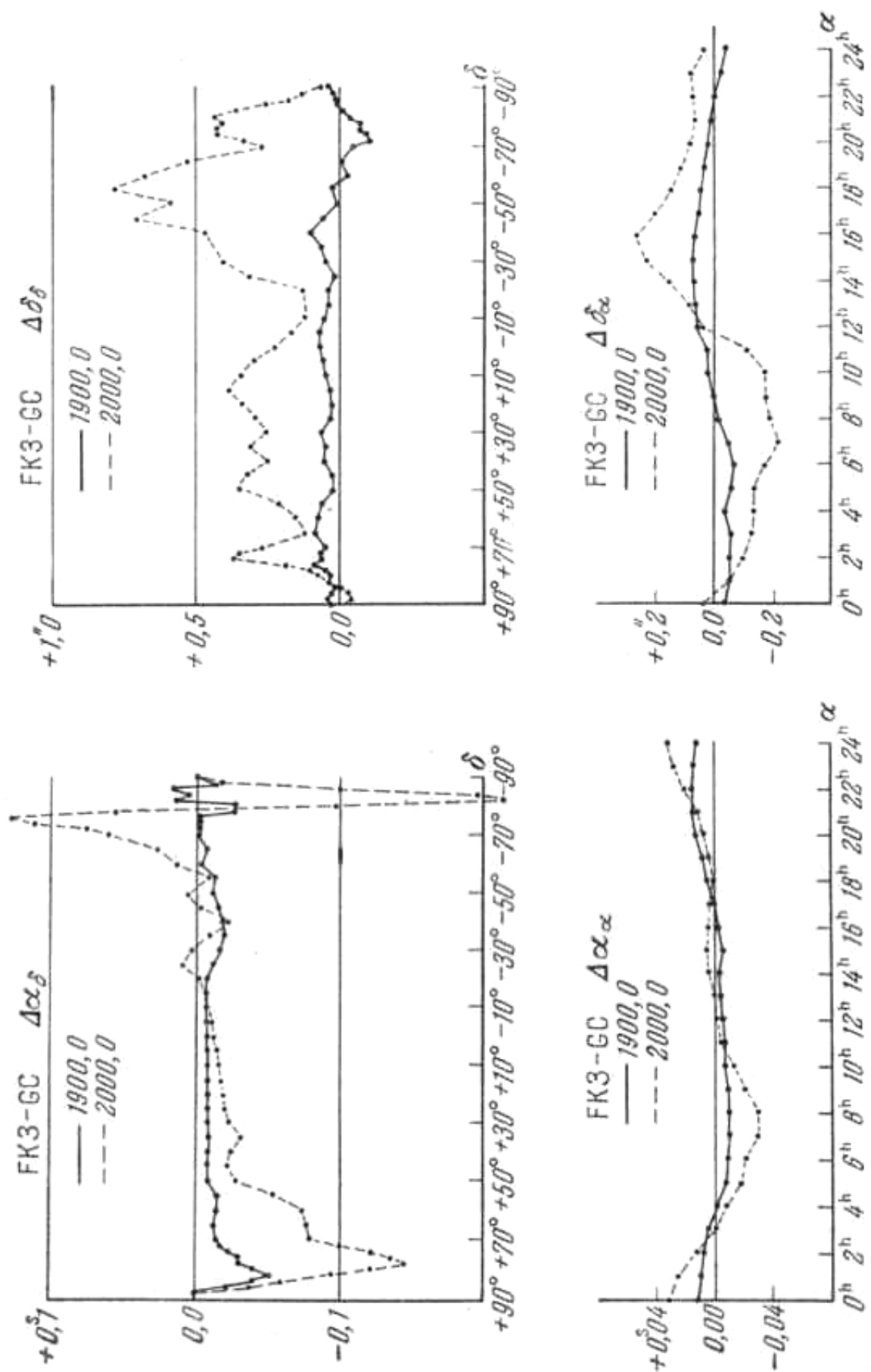


Рис. 2.4.3. Влияние ошибок собственных движений на систематические разности каталогов FK3-GC

ГЛАВА III. ВВЕДЕНИЕ В ИНЕРЦИАЛЬНУЮ СИСТЕМУ КООРДИНАТ

§ 3.1. Фотографические каталоги положений, собственных движений и параллаксов звезд

Конец прошлого столетия ознаменован началом работ по массовому определению звездных характеристик. Преимущества фотографического метода для этих целей столь очевидны, что наблюдения визуальным методом сохранили значение лишь для создания опорной системы, необходимой основы фотографических определений. Фотографическим методом определяются положения, собственные движения и параллаксы значительно более слабых звезд, чем те, которые доступны визуальным наблюдениям.

Предприятия по созданию фотографических обзорных каталогов положений звезд северного неба AGK2 и AGK3 были освещены в предыдущем параграфе, здесь же мы охарактеризуем другие работы в этом направлении.

Первая Международная астрофотографическая конференция в 1887 г. в Париже приняла решение о составлении карты всего неба фотографическим путем. Это предприятие, в котором приняли участие восемнадцать обсерваторий (в том числе Пулковская и Ташкентская), получило наименование «Карта неба» (Carte du Ciel). Для выполнения этой грандиозной работы были изготовлены так называемые, нормальные астрографы (диаметр объектива 340 мм, масштаб $1''$ в мм, поле $2^\circ \times 2^\circ$). На основании обработки взаимно перекрывающихся астронегативов планировалось: а) получить точные положения всех звезд до $11^m,0$; б) составить карты звездного неба для всех звезд до $14^m,0$. Выполнение этой большой работы затянулось на многие десятилетия и лишь к 60-м годам текущего столетия закончено составление последних звездных карт и каталогов. Поскольку попытка создать общую опорную систему не увенчалась успехом, каталоги отдельных обсерваторий построены на

различных фундаментальных системах, в том числе и на системах прошлого столетия.

Широкое распространение в астрономической практике имеют так называемые Йельские каталоги. В 1914 г. Шлезингер в Йельском университете (г. Нью-Хавен, США) начал фотографические перенаблюдения звезд зонных каталогов на широкоугольных астрографах, один из которых имел поле 140 квадратных градусов на пластинке размером 48×58 см. К настоящему времени получены положения со средней квадратической ошибкой $\pm 0",15$ более чем для 150 000 звезд зон, почти полностью перекрывающих склонения от -35° до $+90^\circ$. Дефектом Йельских каталогов являются большие систематические ошибки отдельных зон, превышающие в отдельных случаях секунду дуги. Это явилось следствием недостаточной точности опорных каталогов и неоднородности их систем, полученных на различных меридианных инструментах. В настоящее время начато получение вторых эпох Йельских каталогов с целью вывода однородных собственных движений.

Фотографические зонные наблюдения для получения каталогов южного неба от -30° склонения и южнее проводятся на Капской обсерватории. Однако эта работа еще не завершена. Каталоги южного неба составлялись также и в Мельбурне.

Таким образом, к настоящему времени имеется большое количество точных положений для 300 000 звезд до $9^m,0$. Карты неба содержат богатейшую информацию для звезд до $11^m,0$. Насущная задача астрометристов — свести все эти разрозненные наблюдения в единую систему, в первую очередь для создания однородного опорного каталога положений и собственных движений, пригодного для любых фотографических определений. Попыткой создания такого каталога является сводный каталог 258 997 звезд (SAO), полученный Смитсоновской астрофизической обсерваторией. Положения из каталогов GC, AGK₂, Йельских, Капских и Мельбурнских переведены на систему FK4, а

собственные движения большинства звезд получены сравнением AGK_1 и AGK_2 . Формальный подход не смог обеспечить однородной точности как в случайном, так и в систематическом отношении. Однако каталог SAO широко используется при определении координат ИСЗ, особенно в США.

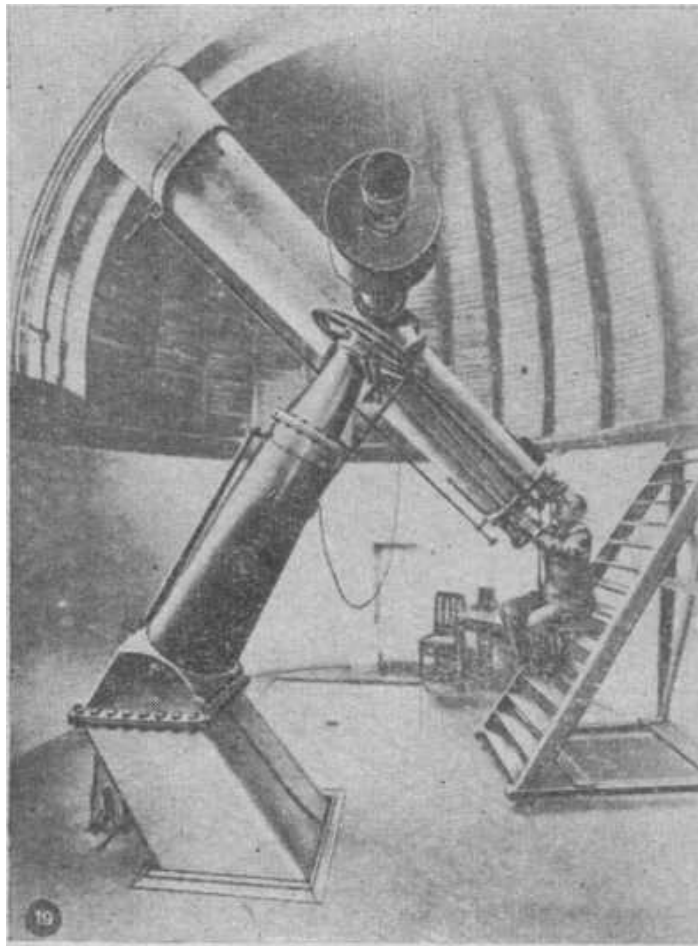


Рис. 3.1.1. Нормальный астрограф Пулковской обсерватории.

Определение собственных движений звезд из сравнения экваториальных координат для двух или нескольких эпох, полученных по визуальным или фотографическим наблюдениям, не отличается от вывода собственных движений при создании фундаментального каталога, надо лишь по возможности аккуратно привести все наблюдения на одну систему. Эти определения дают собственные движения в системе опорного каталога. Иногда их называют абсолютными, однако этот термин следует употреблять в случае привязки к инерциальной системе, а не к системе какого-либо фундаментального каталога.

Развитие фотографических методов наблюдения позволило определять для сотен тысяч звезд относительные собственные движения (относительно группы опорных звезд на астронегативе) путем сравнения положений на астронегативах разных эпох. Абсолютизация собственных движений представляет собой специальную задачу (см. §8). Точность определения относительных собственных движений по фотографическим пластинкам зависит в некоторой степени от фокусного расстояния использованного астрографа и разности эпох астронегативов; в среднем она характеризуется величиной средней квадратической ошибки $\pm 0,003$ — $\pm 0'',005$.

Собственные движения для большого числа звезд до $10^m,0$ получены сравнением новых фотографических положений со старыми визуальными. Подобная работа проделана в Йельском университете, где собственные движения 144 000 звезд списка AGK выведены из разности фотографических положений Йельских каталогов и зонных каталогов AGK₁. Аналогичная работа проведена на Капской обсерватории, где получены собственные движения для 34 000 звезд сравнением фотографических положений с положениями из меридианных каталогов южных обсерваторий.

Все эти собственные движения имеют сравнительно небольшую точность ввиду больших ошибок старых меридианных наблюдений, а в случае применения Йельских каталогов еще и вследствие ошибок координат опорных звезд, использованных для вывода фотографических положений. Средняя квадратическая ошибка всех этих собственных движений заключена в пределах $\pm 0,010$ — $\pm 0'',020$.

Из чисто фотографических определений собственных движений следует отметить каталоги собственных движений, полученные из сравнений первых эпох пластинок предприятия «Карта неба» с астронегативами новых эпох. Собственные движения до $11,0$ — $12^m,0$ были определены таким образом в Гринвиче (зона $\pm 90^\circ$ — $\pm 65^\circ$), Тулузе ($+5^\circ$ — $+7^\circ$), на мысе Доброй Надежды (-40° — -50°). На ряде обсерваторий также ведутся работы в этом

плане. При разности эпох около 60 лет собственные движения выводятся из наблюдений на нормальных астрографах со средней квадратической ошибкой порядка $\pm 0'',003$.

К числу подобных каталогов принадлежат фотографические каталоги собственных движений звезд в избранных площадках Каптейна, полученные в Гронингене (5200 звезд до $11^m,5$ в 24 избранных площадках, $\epsilon_\mu = \pm 0'',005$), Пулкове (18 000 звезд до $14^m,8$ в 74 избранных площадках, $\epsilon_\mu = \pm 0'',007$) и Радклиффе (32 400 звезд до $15^m,2$ в 115 избранных площадках, $\epsilon_\mu = \pm 0'',006$). На обсерватории Мак-Кормик выведены собственные движения звезд по пластинкам, полученным для определения параллакс. Первый каталог содержит 17 900 звезд ярче $13^m,3$ для 341 избранной площадки, а второй 11 300 звезд до $12^m,5$ для 441 избранной площадки. Средняя квадратическая ошибка собственных движений равна соответственно $\pm 0'',009$ и $\pm 0'',008$.

Относительные собственные движения для отдельных звезд и групп звезд (например, собственные движения звезд скоплений, переменных звезд и др.) определяются в большом количестве на всех обсерваториях, имеющих астрографы. Среди этих каталогов следует отметить Каталог собственных движений звезд в Плеядах, опубликованный Герцшпрунгом, и каталоги звезд с большим собственным движением Лейтена. Отдельные определения собственных движений объединены в «Лексиконе собственных движений» (EBL₂), изданном в 1936 г.

Как уже указывалось, определение тригонометрических параллакс принадлежит к числу астрометрических задач, предъявляющих высокие требования к точности наблюдений, поскольку измеряемые величины всегда составляют доли секунды дуги. Трудность и непроизводительность визуальных наблюдений привели к тому, что единственным каталогом параллакс звезд, полученным визуальным методом и удовлетворяющим современным требованиям, является опубликованный в 1912 г. каталог параллакс 243 звезд Элкина, полученный из гелиометрических измерений (см. § 49 «Общая астрометрия» В.В. Подобед, В.В. Нестеров).

В настоящее время фундаментальные ряды определений параллакс звезд производятся исключительно фотографическим методом с использованием наиболее длиннофокусных (7—20 м) астрографов или рефракторов, снабженных кассетой Ричи. Успешное применение рефлекторов на обсерватории МаунтВилсон и малое поле длиннофокусных астрографов привели к созданию астрометрических рефлекторов. За последние годы на Вашингтонской обсерватории специально для определения параллакс создан параболический рефлектор.

Отдельные ряды полученных звездных параллакс неоднократно объединялись в сводные каталоги. К числу первых относятся каталог Каптейна 1910 г., содержащий параллакс для 1000 звезд, каталог Шлезингера 1924 г., содержащий данные для 1870 звезд, каталог Чеккини 1931 г., содержащий данные для 3975 звезд.

В 1935 г. Шлезингер выпустил сводный каталог, содержащий 3500 тригонометрических параллакс звезд. Кроме этого, в каталоге приведены значения спектральных и динамических параллакс общим числом около 6500. В 1952 г. Йельской обсерваторией был издан составленный Л. Дженкинс общий каталог тригонометрических параллакс, который содержит редуцированные на единую систему значения параллакс для 5822 звезд. Через десять лет было опубликовано дополнение к общему каталогу тригонометрических параллакс звезд, содержащее данные еще для 577 звезд, а также новые определения для ряда ранее измеренных звезд.

Опубликованные параллакс имеют среднюю квадратическую ошибку около $\pm 0'',009$. Однако следует отметить, что уже при составлении первых сводных каталогов были замечены систематические расхождения между определениями, произведенными на разных инструментах, достигающие по абсолютной величине порядка $0'',003$ и которые приходится учитывать при образовании общей системы сводного каталога параллакс.

Программы параллактических определений в прошлом преследовали, как правило, цель определения параллакс всех ярких звезд до некоторой

звездной величины. В результате параллаксы определены для всех звезд до 5,5 звездной величины. За последний период программы определений звездных параллаксов включают обычно группы звезд, объединенных общим признаком и интересующих звездную астрономию: белые карлики, красные гиганты, звезды Вольф — Райе и др. Точность определения параллаксов повысилась: так, по наблюдениям на рефлекторе с фокусным расстоянием 15 метров по 45 пластинкам за четыре года Странд получил значения параллаксов со средней квадратической ошибкой $\pm 0,006$ — $0'',007$, а иногда $\pm 0'',004$. Наблюдения параллаксов за последние годы ведутся весьма интенсивно. Лейтенантом опубликован сводный каталог параллаксов для 17 000 звезд.

Вопросы:

1. *Что вам известно о проекте «Карта неба»?*
2. *В каких обсерваториях проводились наблюдения для этого проекта?*
3. *Какие методы, инструменты применялись для определения звездных параллаксов при составлении каталогов?*

§3.2. Инерциальная система координат

Абсолютная система координат, употребляемая для построения основ механики, считается со времени Ньютона привязанной к системе «неподвижных звезд» и, следовательно, неподвижной и пространстве. Развитие астрономии показало, что «неподвижных» звезд не существует. Поэтому встала проблема установления такой системы координат, которая позволила бы решать многочисленные задачи, связанные с изучением движений во Вселенной и в первую очередь в Галактике, с построением теории движения тел в Солнечной системе и, особенно, поступательно вращательного движения Земли, с расчетом и коррекцией полета искусственных космических аппаратов. Система координат, пригодная для этой цели, должна быть инерциальной, т. е. должна обладать только прямолинейным равномерным движением без вращения. Создание такой системы является в настоящее время кардинальной задачей астрономии, основную роль в решении которой играют астрометрия и небесная механика.

Создание инерциальной системы координат методически удобно разделить на два этапа: создание фундаментальной системы координат и определение вращательного движения созданной фундаментальной системы. Особой задачей является установление масштаба по осям, опирающееся на измерение расстояний во Вселенной, и создание масштабных единиц. Заметим, что при создании фундаментального каталога на основе наблюдений звезд в разные эпохи знание прецессии не является принципиальным, поскольку принятое ее значение используется лишь для практически удобного разделения наблюдаемых изменений положений звезд на часть, в основном зависящую от собственного движения и на закономерно изменяющуюся по небесной сфере часть, зависящую в основном от прецессионного вращения фундаментальной системы. Фундаментальная система координат является наиточнейшей системой, поскольку опирается на многочисленные высокоточные наблюдения звезд и улучшается привлечением наблюдений тел Солнечной системы и галактик. Она

необходима для решения многих связанных с наблюдениями проблем и практических задач астрономии и других смежных наук.

Теоретически фундаментальная система средних экваториальных координат, главная плоскость и нуль-пункт которой задаются вращением и орбитальным движением Земли, обладает только прецессионным вращением. Практически эта система выводится на основании наблюдений звезд и поэтому реальное вращение фундаментальной системы, помимо прецессионного, включает влияние движения Солнца, систематической компоненты и систематических ошибок определения собственных движений, а также влияние других, в частности, релятивистских эффектов. Определение абсолютного вращения фундаментальной системы позволило бы перейти к инерциальной системе координат. Этот путь построения инерциальной системы не лишен ряда условностей и недостатков, хотя и является в настоящее время наиточнейшим.

Точность создания инерциальной системы координат обуславливается тремя факторами:

1. Установлением фундаментальной системы координат.
2. Созданием теории движения тел Солнечной системы и теории вращательно-поступательного движения Земли.
3. Определением значений астрономических постоянных.

Существуют два подхода в создании инерциальной системы координат: эмпирический и теоретический. Но ни тот, ни другой не позволяют при современном развитии вопроса решить проблему до желаемой точности. Практически приходится комбинировать оба эти подхода.

Теоретический подход к проблеме заключается в следующем. Опираясь на теорию движений в Солнечной системе и на конкретные наблюдения тел Солнечной системы, выводят инерциальную систему координат, задаваемую эфемеридными положениями тел Солнечной системы. В принципе такая система координат будет зависеть от значения

постоянной тяготения. Однако построить инерциальную систему подобным путем не удастся, ибо астрономические постоянные, входящие в качестве параметров в теорию движения, требуют уточнения. Ошибки фундаментальной системы, в которой производятся наблюдения тел Солнечной системы, и непосредственные ошибки самих наблюдений усложняют задачу. Практически теория движения применительно к данной задаче также разработана недостаточно. Все это делает невозможным применить теоретический подход в полном объеме. Он применяется, как увидим ниже, лишь для определения вращения фундаментальной системы координат вследствие прецессии от планет.

Эмпирический подход заключается в определении вращательного движения фундаментальной системы координат из наблюдений звезд или галактик, не задаваясь физическими законами вращения фундаментальной системы. Из наблюдаемых величин выделяют влияние этого вращения, представляя его закономерности эмпирическими, а в некоторых случаях и теоретически обоснованными формулами, и находят параметры этих соотношений, описывающих вращение фундаментальной системы.

Необходимость прибегать к эмпирическим приемам обусловливается, с одной стороны, невозможностью вычислить по теоретическим формулам постоянную лунно-солнечной прецессии вследствие невозможности вычислить моменты инерции Земли, являющейся неоднородным упругим телом (здесь сказывается незнание распределения масс внутри тела Земли); с другой стороны, вращение фундаментальной системы координат, опирающейся на звезды в качестве реперов, является также следствием систематических ошибок собственных движений звезд, которые возникают как из-за недостаточной их абсолютизации, так и наличия галактического вращения и других движений, носящих систематический характер. Таким образом, из наблюдений одних только звезд невозможно строгим образом без допущений перейти к инерциальной системе координат.

Реализация искомой инерциальной системы координат на практике может осуществляться принципиально тремя способами, в зависимости от того, какие небесные объекты приняты в качестве реперов, ее фиксирующих: галактики, звезды или тела Солнечной системы. Эти группы объектов в некотором приближении являются изолированными материальными системами, занимающими ограниченную область пространства, центр масс которых можно считать движущимся равномерно и прямолинейно. В будущем возможна фиксация инерциальной системы с помощью искусственных небесных тел, однако в настоящее время длительных и легко воспроизводимых реализаций инерциальной системы координат, опирающейся на эти тела, еще не осуществлено.

В зависимости от условий, налагаемых на комплекс реперов, можно условно выделить три подхода к реализации инерциальной системы координат: геометрический, кинематический и динамический. Следует сразу отметить, что на современном уровне развития теории и практики все эти подходы в чистом виде применены быть не могут. Дело осложняется, с одной стороны, учетом движения реперов, в первую очередь планет, с другой стороны, поскольку наблюдения производятся с Земли, учетом поступательно-вращательного движения Земли.

Геометрический подход предполагает неизменность направлений на выбранные небесные реперы. Ранее за такие объекты принимали «неподвижные» звезды, а после открытия их собственных движений и с развитием фотографических методов наблюдений таковыми можно считать галактики. Еще Лаплас в 1790 г. предложил использовать внегалактические туманности в качестве реперов для привязки координатной системы. Располагаясь за пределами нашей Галактики, эти объекты, по современным данным, обладают собственными движениями менее $0'',0001$ в год, что существенно меньше точности определений собственных движений звезд. Поэтому направления на галактики можно считать неизменными, по крайней мере в течение одного столетия.

Галактики являются трудными объектами для позиционных наблюдений. Положение галактики на астронегативе (а наблюдать их в большом количестве можно только фотографически), за которое принимают центр изображения ядра галактики, зависит от продолжительности экспозиции, чувствительности эмульсии, характеристик объектива и ряда других причин вследствие сложной, а подчас и несимметричной геометрической и цветовой структуры участков туманности, окружающей ее ядро. Поэтому на современном этапе до появления новых методов наблюдения невозможно создать систему координат, опирающуюся на одни только галактики. Развитие радиоинтерферометрических методов позволит использовать для создания подобной системы радиогалактики.

Кинематический подход предполагает равенство нулю суммы движений опорных реперов. С его помощью строится инерциальная система координат, опирающаяся на звезды. В отличие от геометрического подхода, эта система сильно зависит от индивидуальных свойств реперов. Так, определение вращательного движения фундаментальной системы, являющейся основой для решения проблемы при втором подходе, и в особенности определение постоянной прецессии, все еще зависит от выбранного комплекса звезд. Этим объясняется известная неоднозначность решения задачи на современном этапе.

Большим подспорьем являются наблюдения галактик относительно фундаментальных звезд, что позволяет изучить систематические ошибки в собственных движениях звезд, тем самым приблизить их к абсолютным. Заманчиво было бы определить постоянную прецессии по абсолютным наблюдениям галактик, поскольку изменения их наблюдаемых абсолютных средних экваториальных координат происходят только от прецессионного изменения координатной сетки. Однако трудности наблюдения галактик вынуждают использовать их лишь для улучшения собственных движений, либо применять их относительные положения, что не освобождает

определение постоянной прецессии от влияния условия о равенстве нулю суммы собственных движений используемых опорных звезд.

Динамический подход строится на основе выполнения закона Ньютона: сила, действующая на массу, вызывает ускорение. За реперы в этом подходе принимаются тела Солнечной системы, аналитические теории движения которых строятся на основе наблюдательных данных. Написав уравнения, связывающие параметры вращения Земли с данными о фигуре и распределении масс Земли, и зная взаимные силовые функции Земли и планет, можно было бы изучить и учесть поступательно-вращательное движение Земли и определить в пространстве положение осей прямоугольной инерциальной системы координат. Однако фактически в настоящее время ни числовые значения параметров, входящих в уравнения, ни структура самих уравнений не являются в достаточной степени известными. Поэтому этот путь построения инерциальной системы координат не дает той точности, которая может быть достигнута иными подходами.

Расхождение в инерциальных системах, полученных по кинематическому и динамическому подходам, составляло после классических работ Ньюкомба во вращении одной системы относительно другой около $7''$ в столетие. Усилиями ряда ученых относительное вращение систем было уменьшено до $2''$ в столетие, в основном за счет совершенствования динамического подхода. Это достигнуто улучшением теории движения планет, уточнением планетных масс, учетом отклонения от закона Ньютона (учет релятивистских эффектов), учетом физических факторов, воздействующих на движение планет. Динамический подход в силу своей теоретичности и ожидаемой высокой точности радиоастрономических измерений расстояний до планет является весьма перспективным. Массовые астрометрические и радиоастрометрические наблюдения больших малых и малых планет являются по этой причине весьма важными.

Определение вращения фундаментальной системы координат, зависящего не только от прецессионного вращения, на современном этапе с достаточной точностью еще не решено. Из всей проблемы выделились несколько отдельных задач, решаемых более или менее удовлетворительно. Наиболее разработанными и важными являются две задачи: определение параметров прецессионного вращения и улучшения системы собственных движений, к рассмотрению которых и перейдем.

Вопросы:

1. *Что такое инерциальная система координат?*
2. *Какие объекты являются реперами в геометрическом подходе?*
3. *Какие еще имеются системы для создания инерциальной системы? В чем их особенности?*

§3.3. Проблема абсолютизации собственных движений звезд

Собственные движения звезд фундаментального каталога не являются в полной степени абсолютными, т.е. отнесенными к инерциальной системе координат. Они искажены систематическими ошибками, которые, будучи постоянными для группы звезд, расположенной на данном малом участке неба, закономерно изменяются при переходе от одного участка небесной сферы к соседнему. Эти ошибки возникают как следствие остаточных погрешностей каталогов и неточности принятой постоянной прецессии, использованных при выводе собственных движений, так и общих закономерностей в движениях звезд.

Систематические ошибки собственных движений, деформируя со временем координатную сетку, могут привести к смещению точки весеннего равноденствия и среднего экватора каталога.

Поэтому следует улучшать систему собственных движений, что поможет также уточнить значение постоянной прецессии.

Из наблюдений одних только звезд, входящих в состав нашей Галактики, в принципе невозможно создать систему, свободную от эффекта вращения в пространстве. Движения звезд, вращение Галактики и участие в них Солнца и звезд каталога приводят к нарушению инерциальности координатной системы, определяемой фундаментальным каталогом и прецессионными величинами, даже в предположении безошибочного знания последних. Иными словами, это означает, что, имея обычным образом полученные собственные движения, нельзя вывести по ним достаточно безупречно постоянную прецессию, характеризующую вращение экваториальной системы координат. Действительно, при анализе наблюдаемых изменений координат ошибки в принятом значении прецессии искажают выводимые собственные движения и, наоборот, ошибки принимаемых собственных движений звезд искажают получаемую по ним постоянную прецессию в силу того, что обе причины изменяют координаты, в основном линейно со временем и поэтому трудно разделимы.

Все это приводит к необходимости анализировать получаемую систему собственных движений для выделения из них систематических составляющих, обусловленных движением Солнца, галактическим вращением, ошибками каталожных положений и прецессионных величин, индивидуальными особенностями в движениях звезд. Этот анализ, используя наблюдения одних звезд, можно производить лишь при наложении некоторых условий. Развитие фотографических методов позволило привлечь для решения этой проблемы и наблюдения галактик. Рассмотрим, из каких компонент складывается видимое собственное движение звезд.

Видимое собственное движение звезды на небесной сфере является следствием двух движений: движения Солнца и движения самой звезды. Первая компонента называется параллактической составляющей, а вторая — пекулярной.

Предположение о том, что собственное движение звезды содержит отраженное движение Солнца, было впервые высказано в 1742 г. Брадлеем и впоследствии подтверждено работами Гершеля, который вывел формулу параллактического смещения для звезд вследствие движения Солнца в пространстве. Если (рис. 3.3.1) V — линейное перемещение Солнца в пространстве за год, A — направление на апекс его движения, r — расстояние до звезды, λ — расстояние по дуге большого круга от апекса до звезды, то μ_r — параллактическое угловое смещение звезды за год вследствие движения Солнца, равно

$$\mu_r = 206\,265 \frac{V}{r} \sin \lambda.$$

Влияние движения Солнца на собственное движение по прямому восхождению и по склонению было выведено Эри и представляется в виде:

$$\Delta\mu''_{\alpha} \cos \delta = \pi X \sin \alpha - \pi Y \cos \alpha,$$

$$\Delta\mu''_{\delta} = \pi X \cos \alpha \sin \delta + \pi Y \sin \alpha \sin \delta - \pi Z \cos \delta,$$

где π — параллакс звезды, X , Y , Z — компоненты скорости движения Солнца в пространстве.

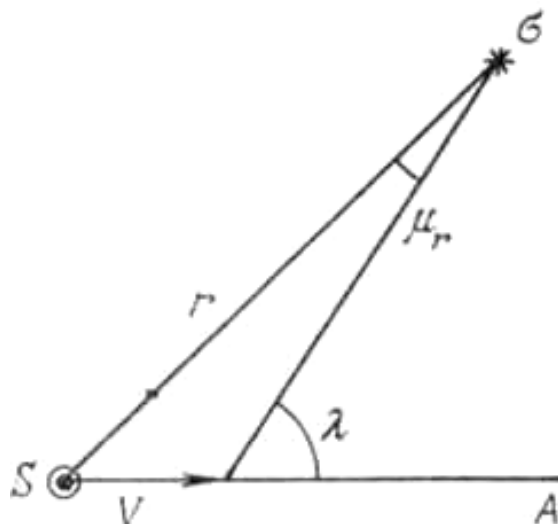


Рис. 3.3.1. К движению Солнца в пространстве.

Пекулярное собственное движение звезд является следствием их индивидуального движения в пространстве и содержит компоненту, вызываемую галактическим вращением, которая при анализе собственных движений выделяется недостаточно уверенно.

Эффекты влияния галактического вращения и систематических ошибок собственных движений звезд могут быть сняты, если привязать систему собственных движений к галактикам— практически неподвижным объектам.

Фотографические наблюдения галактик могут использоваться для определения систематических поправок полученным из меридианных наблюдений собственным движениям звезд фундаментального каталога с целью абсолютизации системы его собственных движений. Для этого фотографирование галактик производится в две эпохи и обычным методом определяется годовое кажущееся смещение по прямому восхождению и склонению галактики относительно группы опорных звезд, для которых должно быть известно собственное движение в системе улучшаемого фундаментального каталога.

Взятое с обратным знаком кажущееся движение галактики относительно группы опорных звезд есть не что иное, как среднее собственное движение $\overline{\mu_T}$ этой группы звезд относительно галактики,

принимаемой за неподвижную. Если $\overline{\mu}_*$ есть среднее собственное движение группы опорных звезд в системе фундаментального каталога, то систематическая поправка системы собственных движений для данной области будет $\overline{\Delta\mu} = \overline{\mu_T} - \overline{\mu}_*$. При обработке астронегативов, естественно, получаются компоненты этой величины по прямому восхождению и по склонению, т.е. поправки:

$$\overline{\Delta\mu_\alpha} = \overline{\mu_\alpha^T} - \overline{\mu_\alpha^*} \text{ и } \overline{\Delta\mu_\delta} = \overline{\mu_\delta^T} - \overline{\mu_\delta^*}$$

Эти поправки абсолютизируют собственные движения звезд, расположенных вблизи галактик. Неравномерное распределение галактик по небу не позволяет получить эти поправки для всех звезд фундаментального каталога и их приходится условно интерполировать.

Для того чтобы согласовать получаемые поправки системы собственных движений с принятой величиной прецессии фундаментального каталога, необходимо наложить на эти поправки условие равенства нулю суммы поправок по всему небу. Таков принцип использования галактик для абсолютизации собственных движений, который на практике осложняется изучением зависимости величины систематических поправок от положения на небесной сфере и от звездной величины.

Пригодные для астрометрических целей галактики должны быть симметричными и иметь резкое ядро, чтобы положение центра их изображений на астронегативе мало зависело от времени экспозиции и светочувствительности эмульсии пластинки. Применение светосильных астрографов облегчает выбор таких галактик, поскольку позволяет наблюдать более слабые объекты. Заметим, что при выводе собственных движений необходимо использовать пары астронегативов, полученные на одном и том же инструменте в однотипных условиях; тогда при одновременном измерении пар пластинок, например, на компараторе, возможно одинаковым образом оценивать положение центра изображения галактики и исключить в разности ошибку наведения, зависящую от структуры изображения этих объектов.

Большую сложность вызывает проблема получения свободных от уравнения блеска собственных движений относительно галактик, поскольку звездная величина наблюдаемых галактик, составляющая $14,0—17^m,0$, сильно отличается от звездной величины звезд, наблюдаемых меридианными методами. Для ослабления изображений ярких звезд фотографирование производится с дифракционными решетками перед объективом астрографа. Точность измерения диффузных изображений галактик примерно в два раза ниже точности измерения изображений звезд, поэтому весьма целесообразен выбор нескольких галактик в данной области неба.

В тридцатых годах было предложено начать наблюдения галактик для целей абсолютизации собственных движений. Первыми приступили к этим наблюдениям советские астрометристы, а затем ученые США. К настоящему времени заканчивается реализация наблюдений двух программ: Пулковской и Ликской.

Наиболее стройно разработана Ликская программа наблюдений, охватывающая галактики $16^m,0$ по всему небу. Применяя на астрографе ($D=508$ мм, $F=3741$ мм) дифракционную решетку, дающую изображения первых спутников на четыре звездные величины слабее центральных изображений звезд, производят две экспозиции: одну длинную, чтобы вышли галактики $16^m,0$, а другую короткую, чтобы изображения спутников у опорных звезд $8^m,0$ получились непередежанными. По таким фотографиям, используя промежуточные звезды $12^m,0$, можно получить собственные движения ярких звезд $8^m,0$ относительно слабых галактик $16^m,0$ по измерениям изображений с одинаковыми диаметрами и, следовательно, свободные в основном от уравнения блеска.

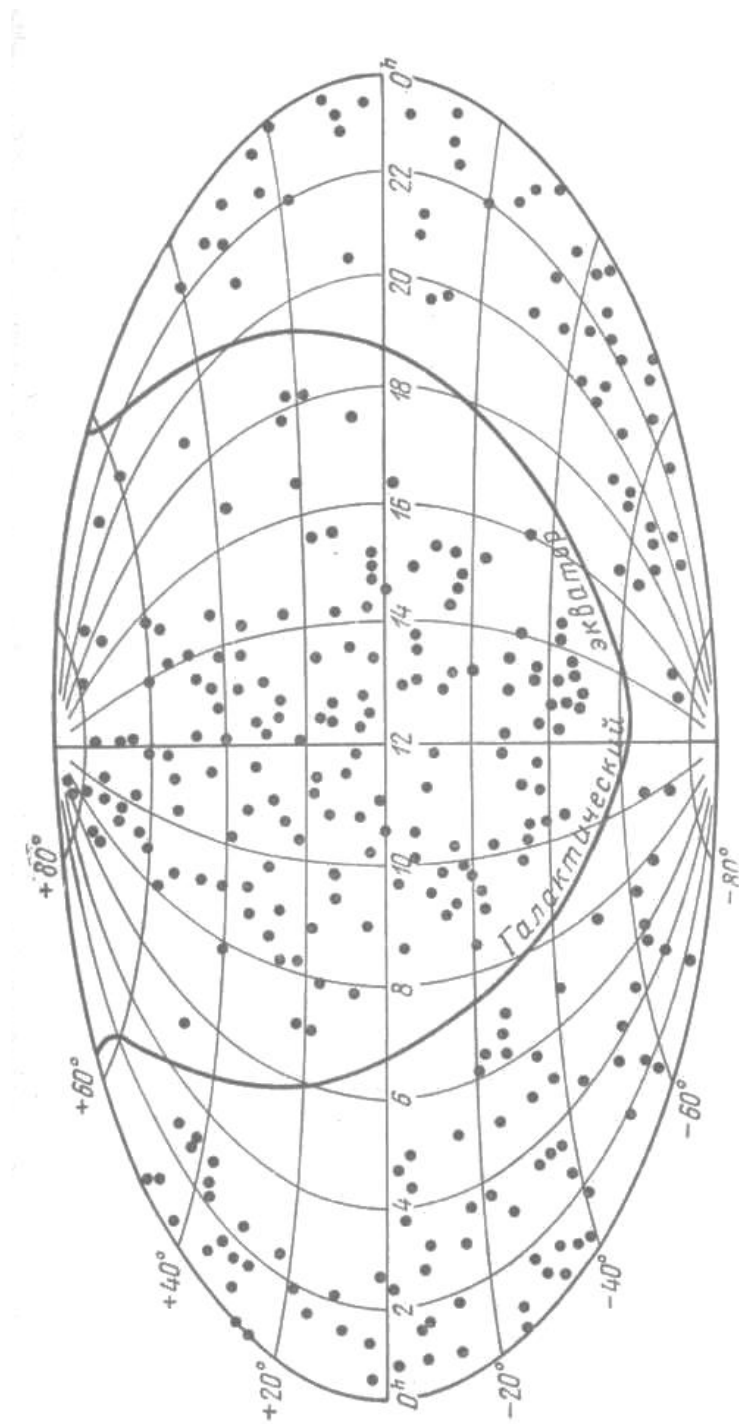


Рис. 3.3.2. Распределение галактик, наблюдаемых для астрометрических целей

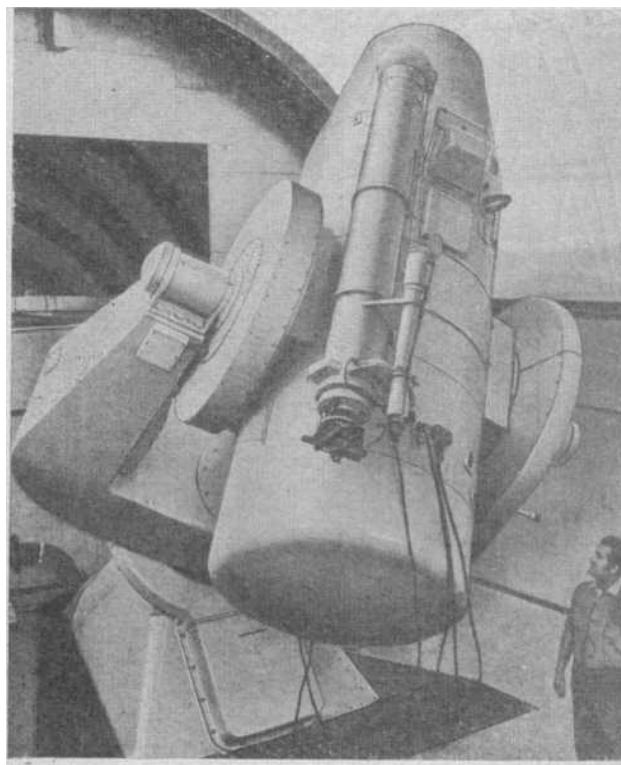


Рис. 3.3.3. Астрометрический рефлектор Пулковской обсерватории

По длительным экспозициям получают собственное движение относительно галактик группы звезд $12^m,0$, измеряя их спутники $16^m,0$, по коротким экспозициям получают относительное движение групп звезд $12^m,0$ и $8^m,0$, измеряя у последних изображения спутников $12^m,0$. Суммируя полученные по двум экспозициям результаты, находят интересные собственные движения звезд $8^m,0$ относительно галактик. Ликская программ наблюдений северного неба выполнена, получены первые эпохи для областей южного неба.

Пулковская программа наблюдений галактик включает до -90° склонения 300 площадок, содержащих более 900 галактик до $14^m,0$. Наблюдения производятся на пятнадцати астрографах советских и ряда зарубежных обсерваторий. В основном наблюдения для северного неба завершены. Составлена и выполняется программа наблюдений галактик на 143 площадках южного неба экспедицией Пулковской обсерватории на новом астрометрическом рефлекторе системы Максудова (рис. 3.3.2 и 3.3.3) и рядом южных обсерваторий. Предварительные измерения и обработка

позволила в качестве первого результата получить значения поправки к постоянной прецессии (см. табл. 2).

Вопросы:

- 1. Что есть некулярная составляющая движения звезды?*
- 2. Для чего используются фотографические методы наблюдения галактик?*
- 3. Какие галактики подходят под астрометрические цели?*
- 4. Расскажите о Ликской и Пулковской программах наблюдений.*

§3.4. Определение параметров прецессионного вращения

Нуль-пункты экваториальной системы не остаются неподвижными на небесной сфере: они перемещаются вследствие прецессионных движений основных кругов. Определение поправок нуль-пунктов координат фундаментальной системы решается в предположении безошибочного знания прецессии, поскольку наблюдаемые в разные эпохи положения тел Солнечной системы необходимо до анализа привести к единому равноденствию. Таким образом, получаемые постоянные поправки ориентировки относятся к средней эпохе наблюдений. Следовательно, неточности прецессионных величин, равно как и систематическое влияние собственных движений, должны со временем изменять величину поправок нуль-пунктов координат. Учет этого обстоятельства практически происходит в процессе улучшения системы собственных движений и уточнения постоянной прецессии.

Движение нуль-пунктов сферической системы координат эквивалентно вращению координатной системы. Вращение фундаментальной системы координат происходит вследствие ряда причин; основной его частью является прецессионное вращение, распадающееся на лунно-солнечную прецессию и прецессию от планет, теоретически интерпретируемые механикой Ньютона (рис. 3.4.1). Кроме того, существует небольшой релятивистский эффект во вращении наблюдаемой системы координат — геодезическая прецессия, объясняемая теорией относительности.

Напомним, что годовые составляющие прецессии: в экваторе m , по склонению n и в долготе p связаны с постоянной прецессии p_1 и прецессией от планет q_1 следующими соотношениями:

.

Таким образом, для учета прецессионного вращения системы координат необходимо определить параметры p_1 и q_1 .

лунной и солнечной орбит; тогда ньютоновская постоянная прецессии представится следующим выражением:

$$p_1' = \left(HP + \frac{\mu}{1+\mu} HQ \right) \cos \epsilon'. \quad (4)$$

Для вычисления p_1' необходимо знать H и μ . Однако динамическое сжатие Земли, зависящее от главных моментов инерции Земли, полярного — A и экваториального — C , не может быть вычислено, ибо неизвестно распределение масс в теле Земли. Поэтому соотношение (4) ранее употребляли для определения динамического сжатия Земли, используя полученное эмпирическим способом значение постоянной прецессии (см. §83 «Общая астрометрия» В.В.Подобед, В.В.Нестеров). Величина $P = p_1' \sec \epsilon'$, численно равная значению скобки в выражении (4), называется постоянной прецессии Ньюкомба; она равна $54'',9066$ для эпохи 1900,0 и уменьшается на $0'',0000364$ за тропическое столетие вследствие изменения эксцентриситета земной орбиты. Постоянная прецессии Ньюкомба употребляется при расчетах задач теоретической астрономии.

Заметим, что полученная из наблюдений постоянная прецессии p_1 отличается от ньютоновской за счет релятивистского эффекта, возникающего вследствие пересечения Землей при своем движении поля тяготения Солнца, и равна $p_1 = p_1' + \theta \cdot 10^{-2}$, где согласно теории $\theta = -1'',915$ в тропическое столетие. Прецессия от планет q_1 вычисляемая на основании закона Ньютона, не требует при практическом ее использовании поправки за релятивистский эффект ввиду малости последней.

Основным наблюдательным материалом для определения постоянной прецессии классическим способом служат изменения координат звезд, получаемые при сопоставлении положений из нескольких каталогов для разных эпох наблюдения. Изменения координат звезд исправляются за систематические разности каталогов и из них исключается величина прецессионного изменения координат, вычисленная с принятым, подлежащим уточнению значением постоянной прецессии. После этого отнесенные к одному году изменения координат звезд, которые обозначим

$\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ при классическом способе определения постоянной прецессии, считаются содержащими влияние следующих трех факторов:

1. Погрешностей принятых значений прецессионных параметров Δp_1 и Δq_1 .
2. Движения Солнечной системы в пространстве.
3. Пекулярного движения звезд.

Рассмотрим математические выражения для влияния всех этих факторов.

Из формул для годичной прецессии по прямому восхождению и по склонению $\frac{d\alpha}{dt} = m + n \operatorname{tg} \delta \sin(\alpha + q)$, $\frac{d\delta}{dt} = n \cos(\alpha + q)$, где m и n — общая прецессия по прямому восхождению и прецессия по склонению, следует, что ошибки собственных движений, возникающие вследствие ошибок прецессионных параметров, должны составлять по α и δ соответственно:

$$\begin{aligned}\Delta\mu'_\alpha \cos \delta &= \cos \delta + \Delta n \sin \alpha \sin \delta, \\ \Delta\mu'_\delta &= \Delta n \cos \alpha.\end{aligned}$$

Так как $m = p_1 \cos \varepsilon' - q_1$ и $n = p_1 \sin \varepsilon'$, то, переходя к поправкам Δp_1 и Δq_1 получим:

$$\begin{cases} \Delta\mu'_\alpha \cos \delta = \Delta p_1 (\cos \varepsilon' \cos \delta + \sin \varepsilon' \sin \alpha \sin \delta) - \Delta q_1 \cos \delta, \\ \Delta\mu'_\delta = \Delta p_1 \sin \varepsilon' \cos \alpha. \end{cases} \quad (5)$$

Отметим, что в силу малости величин $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ вторые и третьи члены прецессии при современном знании изменений p_1 и q_1 вполне можно считать безошибочными.

Влияние движения Солнца, вызывающего параллактическую составляющую собственного движения звезды, может быть записано в виде, предложенном Эри:

$$\begin{cases} \Delta\mu''_\alpha \cos \delta = \pi X \sin \alpha - \pi Y \cos \alpha, \\ \Delta\mu''_\delta = \pi X \cos \alpha \sin \delta + \pi Y \sin \alpha \cos \delta - \pi Z \cos \delta, \end{cases} \quad (6)$$

где π — параллакс звезды, а $X = V_\odot \cos A_\odot \cos D_\odot$, $Y = V_\odot \sin A_\odot \cos D_\odot$, $Z = V_\odot \sin D_\odot$ — прямоугольные компоненты скорости движения Солнца $V_\odot$ в пространстве, $A_\odot$ и $D_\odot$ — прямое

восхождение и склонение апекса движения Солнца. Вывод этих формул приводится в курсах звездной астрономии.

После выделения из собственных движений по прямому восхождению и склонению долей, зависящих от ошибок прецессионных параметров и компонент скорости движения Солнца, оставшуюся часть можно считать пекулярным собственным движением звезды, возникающим вследствие присущего ей перемещения в пространстве. Некоторые исследователи выделяли также влияние галактического вращения. Однако, как показала практика, учет этого обстоятельства не сказывается на величине получаемых прецессионных поправок.

Чтобы исключить из рассмотрения неизвестные пекулярные собственные движения звезд, необходимо принять дополнительные условия, по возможности отвечающие реальному положению вещей. Таковым является предположение о случайном характере пекулярных собственных движений, что эквивалентно наложению условия равенства нулю их суммы для достаточно большого числа звезд. Тогда пекулярные собственные движения могут рассматриваться как случайные ошибки наблюдаемых изменений координат звезд, а следовательно, и как невязки системы условных уравнений:

$$\begin{cases} \mu_{\alpha} \cos \delta = \Delta\mu'_{\alpha} \cos \delta + \Delta\mu''_{\alpha} \cos \delta, \\ \mu_{\delta} = \Delta\mu'_{\delta} + \Delta\mu''_{\delta}, \end{cases} \quad (7)$$

где левые части известны из наблюдений, а правые согласно (5) и (6) суть функции неизвестных Δp_1 и Δq_1 а также X , Y и Z . При решении системы условных уравнений (7) первоначально полагали $\Delta q_1 = 0$, исходя из достаточной точности вычисления значения параметра. Однако тогда при раздельном использовании уравнений по прямому восхождению и по склонению получались несогласующиеся величины поправки постоянной прецессии. Согласования решений можно было достичь введением новой неизвестной. Поэтому уравнения (7) в развернутом виде записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \mu_{\alpha} \cos \delta = \Delta p_1 (\cos \varepsilon' \cos \delta + \sin \varepsilon' \sin \alpha \sin \delta) + \\ \quad + \pi X \sin \alpha - \pi Y \cos \alpha - \Delta E \cos \delta, \\ \mu_{\delta} = \Delta p_1 \sin \varepsilon' \cos \alpha + \pi X \cos \alpha \sin \delta + \pi Y \sin \alpha \sin \delta - \pi Z \cos \delta, \end{cases} \quad (8)$$

где Δp_1 , X , Y , Z и ΔE — неизвестные, подлежащие определению.

Замена неизвестной Δp_1 на новую неизвестную ΔE была произведена по следующим соображениям. Согласно многим исследованиям (таблица 2) величина ΔE получается близкой к одной секунде дуги. Вычисленная постоянная q_1 не может быть столь неточной, поскольку ошибки масс планет, особенно Венеры, могут дать расхождение в ее значении не более $0'',1$. Поэтому считают, что неизвестная величина ΔE равна $\Delta q_1 + \Delta \varepsilon$, где $\Delta \varepsilon$ можно интерпретировать как систематическое движение нуль-пункта прямых восхождений. Но и положение нуль-пункта прямых восхождений для разных эпох известно достаточно точно, поэтому природа величины $\Delta \varepsilon$ остается не разгаданной. Поскольку ни Δq_1 не может быть разделено с, ни $\Delta \varepsilon$ не может быть исключено, то и определение постоянной прецессии от планет из наблюдений не представляется пока возможным.

Таблица 2

Таблица значений поправок лунно-солнечной прецессии Ньюкомба Δp_1 и величины $\Delta E = \Delta q_1 + \Delta \varepsilon$ по определениям некоторых исследователей

Исследователь	100 Δp_1	100 ΔE	Материал
Вильсон и Раймонд	$+0'',94 \pm 0'',04$	$+1'',10 \pm 0'',04$	Каталог GC
Оорт	$+1,11 \pm 0,07$	$+1,14 \pm 0,07$	Каталог FK3
Вильямс и Высотский	$+1,31 \pm 0,07$	$+1,64 \pm 0,07$	Каталог FK3
Морган и Оорт	$+0,75$	$+1,09$	Система 512 дальних звезд FK4
Фрике	$+1,10 \pm 0,10$	$+1,20 \pm 0,11$	
Диквос	$+1,27 \pm 0,03$	$+1,49 \pm 0,03$	160 000 звезд

			AGK3
Фатчихин	$+1,04 \pm 0,20$	$-0,53 \pm 0,20$	779 звезд AGK3 около галактик
Василевские и Клемола	$+0,75 \pm 0,20$	$+1,21 \pm 0,20$	2560 звезд AGK3 около галактик

Принятая в настоящее время система прецессионных параметров была выведена Ньюкомбом в конце XIX столетия. Значения этих международных величин приведены в §89 («Общая астрометрия» В.В.Подобед, В.В.Нестеров); здесь же упомянем, что используемое при составлении каталогов XX столетия значение постоянной прецессии принято равным $p_1 = 50'',3733$ для эпохи 1950,0. До введения прецессии Ньюкомба достаточно широко использовалась прецессия Струве и Петерса.

В течение XX столетия был проведен обширный ряд определений поправки к постоянной прецессии по изложенной выше методике. Нет никакой возможности привести в рамках этой книги все результаты определений Δp_1 и ΔE . В таблице 3 приведены некоторые результаты, опирающиеся в основном на материалы фундаментальных каталогов, а также для сравнения даны предварительные результаты с использованием фотографических наблюдений галактик. Ревизии значений постоянной прецессии на основе наиточнейших рядов наблюдений позволяют считать безусловной необходимость исправления значений прецессионных параметров к моменту вывода новой фундаментальной системы в 80-х годах текущего столетия. Наибольшего внимания заслуживают определения поправок, выведенных на основе первоклассных фундаментальных систем и в среднем равных $\Delta p_1 = +1'',10$ и $\Delta E = +1'',20$ (на 100 лет).

Представляет значительный интерес подтверждение этих результатов по наблюдениям галактик, как уже указывалось, практически неподвижных небесных объектов. Поэтому заманчиво получить более точное значение

постоянной прецессии без наложения условий на собственные движения звезд непосредственно по абсолютным позиционным наблюдениям галактик, поскольку их наблюдаемые экваториальные координаты изменяются со временем лишь вследствие прецессионного вращения координатной сетки. Однако невозможность наблюдений галактик ввиду их малой яркости визуальными методами и невозможность получения точного положения галактик фотографическим методом ввиду влияния фотографических эффектов на их сложные по структуре изображения, не позволяют выводить поправку постоянной прецессии по позиционным наблюдениям галактик. Все же наблюдения галактик, производимые для абсолютизации собственных движений, могут быть привлечены для уточнения значения постоянной прецессии.

Действительно, если $\overline{\mu}_T$ есть среднее смещение группы звезд данной области относительно галактики, а $\overline{\mu}_*$ есть среднее каталожное значение из собственных движений этих же звезд, то разность $\Delta\overline{\mu} = \overline{\mu}_T - \overline{\mu}_*$ можно считать зависящей только от ошибки принятого значения прецессии, поскольку эффект движения Солнца и галактического вращения исключится, равно как и пекулярное собственное движение звезд. Интерпретируя эту разность согласно (8) и составляя уравнения по всему небу для обеих координат, можно определить величины Δp_1 и ΔE . Можно составлять уравнения и по каждой звезде. Например, на Пулковской обсерватории при измерении астронегативов с галактиками измерялись помимо каталожных звезд и звезды фона. По последним, считая их опорными, определяли собственные движения каталожных звезд и галактик. По исправлении полученных фотографических собственных движений каталожных звезд за движение опорных звезд относительно галактик, выведенные собственные движения сравнивались с таковыми из каталога. Образованные разности подвергались анализу описанным выше образом для вывода значений Δp_1 и ΔE .

Внедрение в астрометрию новых технических средств наблюдения, радиоастрономических, вселяют надежду, что достижение

инерциальности системы координат и, в частности, определение постоянной прецессии достигнет большего совершенства; об этом расскажем в следующем параграфе.

Расскажите про:

- 1. Лунно – солнечная прецессия и прецессия от влияния планет.*
- 2. Редукция наблюдений для определения постоянной прецессии.*
- 3. Современная система прецессионных параметров.*

§3.5. Использование длиннбазового радиоинтерферометра для целей фундаментальной астрометрии

За последнее время открытие далеких радиоисточников и развитие радиоастрономических методов определения их координат позволит, по-видимому, решить по новому ряд задач фундаментальной астрометрии, причем со значительным выигрышем в точности. Этим зарождается новое направление астрометрии — радиоастрометрия, поскольку эти методы МОГУТ быть использованы и для изучения вращения Земли. Методика получения координат и геофизических характеристик с помощью радиоинтерферометра находится в стадии пробных измерений и аппаратных разработок, дающих обнадеживающий прогноз. Технические основы метода определения координат радиоисточников с помощью радиоинтерферометра достаточно сложны и требуют специальных знаний, поэтому изложим здесь лишь вкратце с некоторыми упрощениями принцип получения наблюдательной информации с помощью этого инструмента.

Радиоинтерферометр представляет собой два радиотелескопа, разнесенные на концы некоторой базы (см. рис. 3.5.1). Каждый радиотелескоп состоит из параболической металлической антенны, собирающей космические радиоволны на расположенный в ее фокусе облучатель. Далее по волноводу колебания передаются на приемник, который их преобразует для последующей регистрации. Если плоская волна BB^* приходящая от радиоисточника, образует угол $90^\circ - \theta$ с линией базы, которая имеет длину d , то приходящие на две антенны электромагнитные колебания будут иметь разность фаз: $\Delta\theta = 2\pi \frac{d \sin(90^\circ - \theta)}{\lambda}$ или $\frac{2\pi\rho}{\lambda}$, где $\rho = d \cos \theta$ — линейная разность хода между двумя радиотелескопами.

Суточным движением радиоисточник перемещается по небесной сфере, вместе с этим изменяется угол наклона фронта волны к базе.

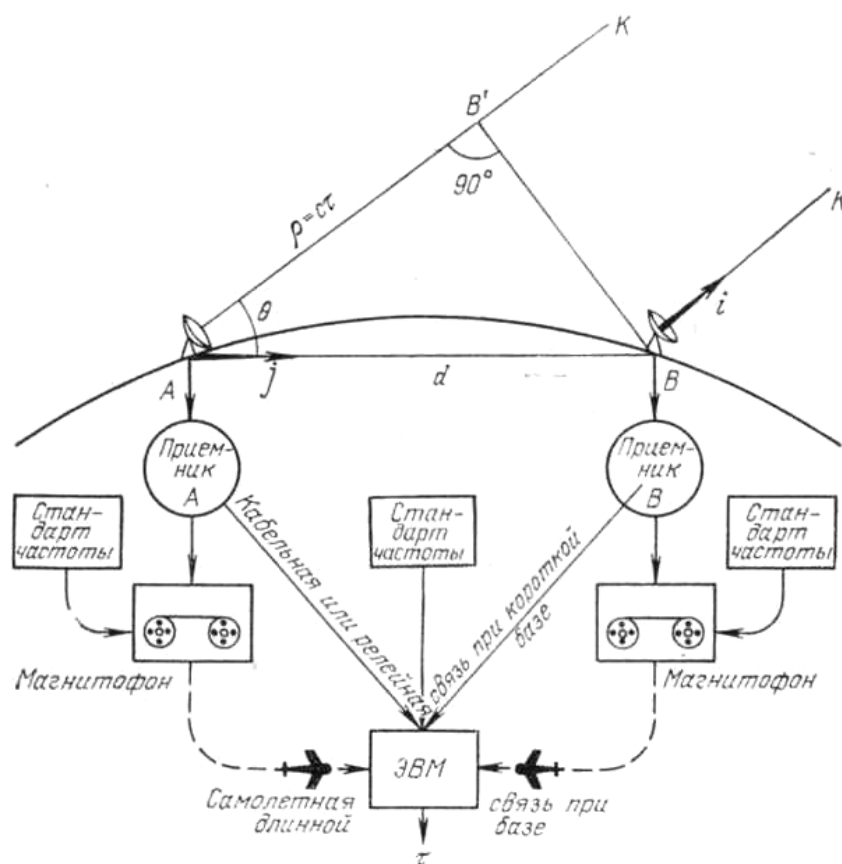


Рис. 3.5.1. Схема радиоинтерферометра.

Когда плоская волна, идущая от радиоисточника, параллельна базе, т.е. радиоисточник находится в плоскости симметрии, перпендикулярной к базе, сигналы радиотелескопов будут в одной фазе ($\Delta\theta = 0$) и сигнал будет максимальным. Когда же с изменением угла $90^\circ - \theta$ разность хода станет равной половине длины волны, то сигналы на радиотелескопах будут в противофазе ($\Delta\theta = \pi$), и сигнал будет минимальным. Следовательно, в результате интерференции радиосигналов с двух разнесенных антенн радиоинтерферометра получается периодически изменяющийся электрический выходной сигнал, имеющий максимумы при ($\Delta\theta = 0, 2\pi, \dots$) и минимумы при $\Delta\theta = \pi, 3\pi, \dots$. Полный период изменения сигнала, например, при базе $10\,000\text{ км}$ длине принимаемой волны 10 см , соответствует угловому перемещению радиоисточников на $0'',002$ (поскольку угол определяется отношением волны к длине базы). Однако точность регистрации составляет доли периода и этим характеризуется

чувствительность установки и формально возможная точность измерения с помощью радиоинтерферометра.

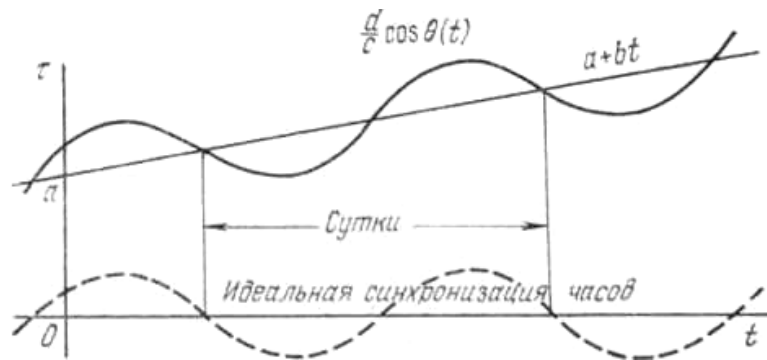


Рис. 3.5.2. График задержки сигнала радиоинтерферометра.

Линейная разность хода $\rho = ct$, где c — скорость распространения радиоволн, а t — время задержки поступления сигнала на вторую радиотелескоп, в каждый момент зависит от базы радиоинтерферометра и от расположения радиоисточника. Ее величина изменяется с суточным периодом. Для решения астрометрических задач из радиоинтерферометрических наблюдений необходимо получать время задержки радиосигнала t , которое находится из сравнения поступающих на обе антенны радиоинтерферометра сигналов от космического радиоисточника. Эта задача технически решается по-разному для короткобазовых радиоинтерферометров (d — порядка километров) и длиннбазовых (d — порядка нескольких тысяч километров).

В случае короткобазовых радиоинтерферометров радиоантенны связаны со стандартом частоты и регистрирующей аппаратурой с помощью кабельной связи. Высокочастотные сигналы, идущие от космического радиоисточника и принимаемые обеими радиоантеннами в узком диапазоне частот, с помощью стандарта частоты (атомных часов) преобразуются в сигналы более низкой частоты, которые поступают на блок обработки. Статистическая обработка с помощью корреляционного анализа позволяет получить разность хода сигналов и определить моменты их поступления на концы радиоинтерферометра. По разности моментов можно определить задержку поступления t . Изменение величины задержки со временем

изображено на нижней синусоидальной кривой (рис. 3.5.2) для незаходящего радиоисточника.

Неустойчивые характеристики кабельной связи не позволяют использовать ее для связи антенн радиоинтерферометра на больших расстояниях. Для длиннобазового радиоинтерферометра возникает проблема создания точного эталона частоты и синхронизации часов, используемых при наблюдениях на концах базы радиоинтерферометра. Появление высокоточных эталонов частоты позволяет осуществить радиоинтерферометры практически с любыми возможными на Земле базами (10 000 км) и достичь вследствие этого большего увеличения точности определений.

В случае длиннобазового радиоинтерферометра наблюдения записывают на магнитную ленту на обоих концах базы радиоинтерферометра независимо, используя разные стандарты частоты. Ленты с записями доставляются к ЭВМ для статистической обработки и получения времени задержки. Величина задержки, получаемая без принятия мер к синхронизации часов, будет иметь вид, изображенный верхней кривой рис. 3.5.2. Смещение периодической кривой на величину $a + bt$ вызывается разностью нуль-пунктов стандартов частоты a и разностью их хода b . Эти величины следует вводить в качестве неизвестных в уравнение для решаемой астрометрической задачи либо определять путем сравнения обоих стандартов с третьим, перевозимым с одного конца базы радиоинтерферометра на другой.

На точность радиоинтерферометрических измерений влияют инструментальные ошибки и атмосфера. Инструментальные ошибки, возникающие вследствие временных изменений в ориентировке антенн и температурного влияния, малы, и могут быть исследованы с точностью до 1 мм. Эти ошибки имеют большое значение для короткобазовых радиоинтерферометров. Для длиннобазовых радиоинтерферометров более существенна стабильность атомных стандартов, которая должна

обеспечивать постоянство фазового сдвига сигналов при их преобразовании в течение времени измерения. Требуемая стабильность атомных стандартов еще не достигнута, что снижает пока возможности длиннобазовых интерферометров. Предел средней квадратической ошибки определения величины $\rho = c\tau$ оценивается около $\pm 3 \text{ см}$ ($\pm 0'',001$).

Влияние атмосферы выражается в непостоянной задержке радиоволн. Влияние атмосферы в зените на разность хода оценивается в 2,5 метра, причем существенное значение имеет содержание водяных паров. Используя специально поставленные радиометрические измерения яркости неба в направлении объекта наблюдений вблизи резонансных линий, можно учесть влияние водяных паров, а используя данные о состоянии атмосферы — учесть задержку радиоволн в атмосфере в направлении на зенит. Учет влияния заряженных частиц в атмосфере на прохождение радиоволн производится путем наблюдения на разных радиочастотах для определения показателя преломления, зависящего от частоты: $n^2 - 1 = \frac{const}{f^2}$ где n — показатель преломления, а f — частота.

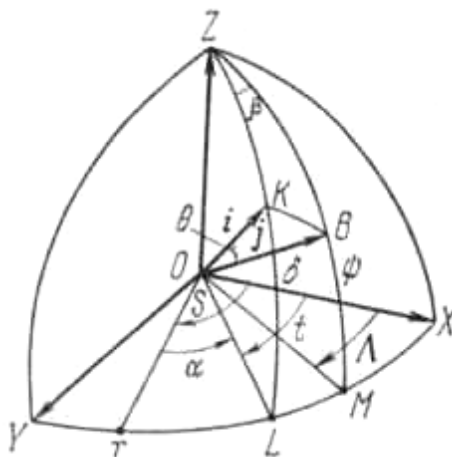


Рис. 3.5.3. К теории радиоинтерферометра.

Рассмотрим, какую информацию несет время задержки радиосигнала, как оно связано с экваториальными координатами космического радиоисточника и параметрами базы интерферометра. Для этой цели введем

единичные векторы базы j и направления на радиоисточник — i . На рис.3.5.3 изображена сфера единичного радиуса с центром O в центре Земли и векторы j и i , перенесенные в точку O . Составляющие этих векторов в геоцентрической, связанной жестко с Землей системе координат (ось X в плоскости геоцентрического меридиана пункта A , ось Z по оси вращения Земли), могут быть записаны в следующем виде, для вектора $i = \{\cos \delta \cos(s - \alpha), \cos \delta \sin(s - \alpha), \sin \delta\}$ и для вектора $j = \{\cos \Psi \cos \Lambda, \cos \Psi \sin \Lambda, \sin \Psi\}$, где α, δ — экваториальные координаты радиоисточника, s — звездное время на пункте A ; Ψ, Λ — сферические координаты, определяющие направление базы (Ψ — широта конца вектора j , а Λ — его условная долгота, считаемая от меридиана пункта A). Введем понятие времени t' , считаемого в атомной шкале. Тогда $s = s_0 + \Omega t'$, где s_0 — звездное время в момент начала счета атомного времени, а Ω — угловая скорость вращения Земли.

Величина линейной задержки сигнала есть $\rho(t') = c\tau(t') = d \cos \theta(t')$. Но поскольку в случае длиннобазового радиоинтерферометра имеется рассинхронизация часов, то следует учесть величину $a + bt'$ и тогда для временной задержки получим:

$$\tau(t') = a + bt' + \frac{d}{c} \cos \theta(t').$$

Величину $\cos \theta(t')$ можно выразить по формуле косинуса стороны KB треугольника ZKB (см. рис.) и, следовательно, величину $\frac{d}{c} \cos \theta(t')$ можно представить так:

$$\frac{d}{c} \cos \theta(t') = \frac{d}{c} \sin \Psi \sin \delta + \frac{d}{c} \cos \Psi \cos \delta \cos LOM,$$

где угол. Раскрывая $\cos LOM$ по формуле косинуса суммы углов, имеем: произведение $d \sin \Psi = d_z$ есть проекция длины базы на ось OZ , а $d \cos \Psi = d_p$ — проекция на экваториальную плоскость XOY ; тогда окончательно имеем основное уравнение для представления измеренной величины τ в виде:

$$\tau = a + bt' + \frac{d_z}{c} \sin \delta + \frac{d_p}{c} \cos \delta [\cos(s_0 - \Lambda - \alpha) \cos \Omega t' - \sin(s_0 - \Lambda - \alpha) \sin \Omega t']. \quad (9)$$

В этом уравнении сложным образом завязаны семь неизвестных: a , b , d_E , d_P , $(s_0 - \Lambda - \alpha)$, δ , Ω . Неизвестные a , b являются инструментальными параметрами, которые с усовершенствованием стандартов частоты могут быть исключены. Неизвестные d_E и d_P эквивалентны неизвестным d и Ψ , которые вместе с Λ определяют величину и ориентировку базы радиоинтерферометра. Структура неизвестного $(s_0 - \Lambda - \alpha)$ показывает, что прямое восхождение определяется с точностью до постоянной величины $\Lambda - s_0$, а величина Λ с точностью до постоянной $\alpha - s_0$.

Решение системы уравнений (9) является, по сути дела, неразработанной проблемой даже для определения той или иной группы неизвестных: высокоточных экваториальных координат — для создания системы координат; параметров базы — для геодезических целей, измерения перемещений континентов и движения полюсов; угловой скорости — для изучения неравномерности вращения Земли. Несмотря на удачные первые опыты, только начинают выясняться наивыгоднейшие условия наблюдений и ожидаемые веса неизвестных с целью разработки оптимальной наблюдательной программы и способов наблюдений, подобных способам практической астрономии. Комбинация множественных наблюдений отдельных радиоисточников или нескольких, определенным образом расположенных на небе, позволит освободиться от неподлежащих определению неизвестных и повысит вес интересующих неизвестных. Целесообразное расположение базы радиоинтерферометра также имеет значение.

Радиоисточники, наблюдаемые с помощью радиоинтерферометров, могут быть как естественные — квазары, так и искусственные. К числу последних могут относиться радиопередатчики, устанавливаемые на Луне, на искусственных спутниках Земли и Луны, на космических аппаратах, движущихся по околосолнечным орбитам.

Наблюдения искусственных радиоисточников, запущенных в пределах Солнечной системы, могут быть использованы наряду с

фотографическими и локационными наблюдениями искусственных небесных тел для решения многих задач, связанных с изучением вращения и фигуры Земли и Луны. Наблюдение подобных искусственных радиоисточников в высокоточной системе, опирающейся на квазары, сулит открытие новых эффектов в изучаемых явлениях.

Впервые обнаруженные в 1963 г. специфические естественные радиоисточники — квазары являются звездообразными объектами, которые помимо мощного радиоизлучения обладают сильным излучением и в других длинах волн. Открыто около двухсот таких радиоисточников, расположенных по всему небу с зоной избегания около галактического экватора. Большая разрешающая способность длинноволновых радиоинтерферометров позволила изучить структуру квазаров, которые, имея в среднем поперечники около $0'',01$, обладают и большими размерами, обнаруживая иногда сложность и двойственность строения. Многие из квазаров отождествлены с видимыми, вернее, получающимися на астронегативе, небесными объектами. Звездная величина последних преимущественно $16,0—18^m,0$. Если интерпретировать наблюдаемое у них красное смещение как эффект космологического разбегания, то следует признать квазары одними из самых далеких объектов, обнаруженных во Вселенной, собственные движения которых следует считать практически равными нулю.

Какова же современная точность позиционных радиоинтерферометрических наблюдений квазаров? В 1970 г. на коротковолновых радиоинтерферометрах в США были проведены две серии измерений и получены два каталога положений для 46 и 178 радиоисточников с точностью, характеризующейся по обеим координатам средней квадратической ошибкой $\pm 0'',35$; сравнение, произведенное по 28 общим квазарам, показало систематическую разность, в среднем достигающую порядка половины секунды дуги. (Заметим, что только склонения были определены абсолютным методом, а при выводе прямых

восхождений были использованы координаты отождествленных объектов, полученные фотографическими методами.) В последнее время достигнута внутренняя точность определения экваториальных координат, характеризующаяся средней квадратической ошибкой $\pm 0''{,}10$.

Следовательно, точность позиционных радиоинтерферометрических наблюдений в настоящее время сравнялась с точностью оптических методов. Однако есть все основания ожидать улучшения этой точности, полученной на радиоинтерферометрах с базами лишь в несколько километров. Практическая реализация уже теперь длиннобазового интерферометра с базой порядка 10 000 км, с одной стороны, и совершенствование стандартов частоты и регистрации радиосигналов в ближайшем будущем, с другой стороны, позволяет надеяться, что в следующие десятилетия будет достигнута принципиально возможная точность позиционных определений с радиоинтерферометром порядка $\pm 0{,}''001$. Поэтому следует ожидать в перспективе нового качественного скачка в решении ряда астрометрических проблем.

К числу этих проблем можно отнести следующие:

- 1) создание радиоастрономической инерциальной системы координат;
- 2) повышение точности существующей, оптической, системы координат;
- 3) определение постоянных прецессионного и нутационного движения земной оси;
- 4) определение геодезических параметров и геофизических характеристик.

Повышенная точность определения координат радиоисточников и их удаленность создают предпосылки к созданию более совершенной и значительно более точной инерциальной системы координат — радиоастрономической инерциальной системы, опирающейся на удаленные реперы Вселенной — квазары. Эта система, несмотря на ограниченное число

фиксирующих ее объектов, явится основой для решения многих частных задач астрометрии. Ее создание обусловлено разработкой безупречных абсолютных радиоинтерферометрических методов определения координат, учитывающих с должной точностью инструментальные ошибки и влияние атмосферы на прохождение радиоволн.

Роль существующей инерциальной системы, опирающейся на звезды, для решения многих научных и производственных задач, естественно, сохранится вследствие большого числа и практичности наблюдений фиксирующих ее реперов. Однако достижения радиоастрометрии в будущем должны быть использованы для ее улучшения. На пути этого стоит ряд трудностей, которые нужно преодолеть. К их числу относится неравномерное покрытие небесной сферы малым числом космических радиоисточников и необходимость сопоставления оптической и радиоструктур квазаров.

Хотя радиоастрономическая система координат воспроизводится с помощью сложной аппаратуры, однако, благодаря высокой точности и возможности наблюдений в любую погоду, безусловна ее выгода для изучения явлений, проявления которых в положениях реперов изменяются со временем: прецессионное и нутационные движения земной оси, движения полюсов, перемещения в земной коре и т.п. Значения многих астрономических постоянных могут быть найдены из подобных наблюдений. Перспективность радиоастрометрии несомненна. В заключение параграфа следует заметить, что развивающаяся радиоастрометрия ставит перед классической астрометрией ряд задач. К их числу в первую очередь относится получение точных положений космических радиоисточников в первоклассной фундаментальной системе координат. Возникающая задача связи слабых радиоисточников $16,0—18^m,0$ со звездами $8^m,0$ требует фотографических наблюдений промежуточных звезд $12^m,0$. Это позволит связать систему, полученную по радионаблюдениям квазаров, с существующей системой, опирающейся на оптические наблюдения звезд.

Вопросы:

- 1. Что из себя представляет радиоинтерферометр?*
- 2. В чем разница короткобазных и длиннобазных интерферометров?*
- 3. Какие ошибки влияют на точность радиоинтерферометрических измерений?*
- 4. Что измеряют с помощью радиоинтерферометров? Что в дальнейшем можно получить с помощью этой величины?*
- 5. Какие плюсы и минусы есть в радиоастрономической системе координат?*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Весь материал магистерской работы представлен и в виде методички. Данная методичка будет полезна как студентам, так и преподавателям курса Астрометрии и людям, интересующимся развитием инерциальной системы координат. Материал упорядочен по степени развития данной области физики, разделом механики. Читатели помимо изучения материала, могут после каждого параграфа проверять полученные знания, укреплять их используя для этого представленные вопросы.

Составление описаний звездного неба и получение из наблюдений положений звезд производилось еще на заре развития науки и культуры во всех странах древнего мира, поскольку без этого невозможно решать практические задачи, связанные с практической астрономией, и изучать видимое движение небесных тел. Поэтому в данной магистерской работе и методичке рассматривались следующие вопросы для полного разбора темы инерциальных систем:

1) История возникновения звездных каталогов и систем координат:
а). Основные параметры звездного каталога Гиппарха, б). Ученые-астрономы участвовавшие в создании звездных каталогов, с). Основы построения фундаментальной системы координат;

2) Фундаментальные каталоги звезд: а).Сводные каталоги звездных положений,б).Процесс создания фундаментального каталога,с).Практическое использование каталогов звездных положений;

3) Исходные звездные каталоги: а). Основные параметры исходных звездных каталогов, б). Методы приведения координат звезд, полученных для отдельных моментов, к началу Бесселева года, с).Структура исходных звездных каталогов, d). Систематические ошибки координат звезд и методы их учета;

4) Определение поправок ориентировки фундаментальной системы координат: а). Проблемы точности звездных каталогов, б). Наблюдения

небесных объектов с целью повышения точности определения поправок ориентировки фундаментальной системы координат, с). Определение поправок ориентации фундаментальной системы координат по наблюдениям Солнца и планет Солнечной системы, d). Современный метод наблюдений для определения поправок ориентировки фундаментальной системы координат с наибольшей точностью;

5) Развитие фундаментальной системы координат: а). Основные подходы при создании современных фундаментальных систем, б).

Основные параметры каталога FK4, с). Недостатки фундаментальных каталогов, d). Современные каталоги звездных положений;

б) Фотографические каталоги звездных положений, собственных движений и параллаксов звезд а). Проект «Карта неба», б). Наблюдательные методы, используемые в Астрономических обсерваториях с целью осуществления проекта «Карта неба», с). Методы и наблюдательные технологии использующиеся для определения звездных параллаксов при составлении каталогов звездных положений;

7) Инерциальная система координат: а). Понятие инерциальной системы координат, б). Описание небесных объектов, которые являются реперами геометрического подхода определения инерциальной системы отсчета, с). Методы, использующиеся для построения инерциальной системы координат;

8) Проблема абсолютизации собственных движений звезд: а). Определение пекулярной составляющей движения звезд, б). Фотографические методы наблюдения галактик, с). Параметры галактик, использующихся с целью создания астрометрических систем координат, d). Ликская и Пулковская программы астрометрических наблюдений;

9) Определение параметров прецессионного вращения: а). Лунно – солнечная прецессия и прецессия от влияния планет, б). Редукция наблюдений для определения постоянной прецессии, с). Современная система прецессионных параметров;

10) Использование длиннбазового радиоинтерферометра (РСДБ) для целей фундаментальной астрометрии: а). Основные параметры радиоинтерферометра, с). Отличие короткобазных и длиннбазных интерферометров, d). Ошибки точности производства радиоинтерферометрических измерений, е). Задачи, решаемые с использованием РСДБ астрометрии, f). Основные преимущества и недостатки радиоастрономической системы координат.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.В.Подобед, В.В.Нестеров, «Общая астрометрия», Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975.
- [2] П.И.Бакунин, Фундаментальные каталоги звезд, Гостехиздат, 1949.
- [3] В.Сурдин, Большая энциклопедия астрономии. –М.: Эксмо, 2013.
- [4] Э.В.Кононович, В.И.Мороз, Общий курс астрономии. –М.: Эдиториал УРСС, 2004.
- [5] Д.В.Загребин, Введение в астрометрию, «Наука», 1966.
- [6] Астрономический ежегодник.
- [7] В.В.Подобед, фундаментальная астрометрия, «Наука», 1968.