

**Космический
астрометрический эксперимент
ОЗИРИС**

Институт астрономии Российской Академии наук
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга
Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова
Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина

**КОСМИЧЕСКИЙ
АСТРОМЕТРИЧЕСКИЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ
ОЗИРИС**

Под редакцией Л. В. Рыхловой и К. В. Куимова



Фрязино 2005

УДК 52
ББК 22.6
К 71

Космический астрометрический эксперимент ОЗИРИС.

Под редакцией Л. В. Рыхловой и К. В. Куимова.

Фрязино: «Век 2», 2005, 350 с. ISBN 5–85099–165–4.

В книге рассмотрены научные задачи из области астрономии, которые могут быть решены с помощью космического астрометрического эксперимента. Описана также возможная конструкция космического аппарата, оптического интерферометра, предназначенного для решения этих задач. Для научных работников в области астрономии, студентов старших курсов, специалистов в области космического приборостроения.

Авторы:

А. А. Боярчук, А. В. Багров, С. И. Барабанов, Г. Т. Болгова,
С. Г. Валеев, В. Е. Жаров, А. Н. Исупов, Т. А. Калинина,
А. В. Кузьмин, К. В. Куимов, А. М. Микиша, В. Б. Пинчук,
М. С. Пширков, А. С. Расторгуев, А. П. Рыженко,
Л. В. Рыхлова, М. В. Сажин, В. Н. Семенцов, А. Г. Серегин,
М. А. Смирнов, В. К. Сысоев, Е. Н. Федосеев, О. С. Хованская,
А. М. Черепашук.

На обложке: ОЗИРИС на орбите (коллаж).

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05–02–30017д) и Института астрономии РАН.



ISBN 5–85099–165–4

- © Коллектив авторов под руководством М. В. Сажина, 2005 г.
- © «Век 2», 2005 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Предисловие редакторов	11
Глава 1. Развитие астрометрии и ее современные задачи	14
1.1. История астрометрических исследований	14
1.2. Развитие методов построения инерциальной системы координат	16
1.3. Развитие методов определения параметров вращения Земли	20
1.4. Определение астрономических постоянных	22
1.5. Современные методы астрометрических измерений	24
1.6. Требования к опорной системе в оптическом диапазоне	26
1.7. Роль HIPPARCOS в решении задач астрометрии	30
1.8. Современные небесные системы отсчета и их реализация	35
1.9. Современная земная система отсчета. Определение ПВЗ	36
1.10. Стандарты систем координат, рекомендованные IAC	38
1.11. Новые задачи астрометрии	43
Глава 2. Научные задачи микросекундной астрометрии	46
2.1. Уточнение шкалы расстояний	48

2.2.	Исследование физики и эволюции звезд	51
2.3.	Двойные звезды и поиск планетных систем . . .	51
2.3.1.	Открытие компонентов двойных и кратных звезд	52
2.3.2.	Высокоточные астрометрические наблю- дения спектрально-двойных звезд	53
2.3.3.	Наблюдения и открытие кратных протозвезд	53
2.3.4.	Динамика кратных звезд	54
2.4.	Исследование строения и кинематики галактик .	54
2.4.1.	Исследование строения Галактики	54
2.4.2.	Исследование кинематики Галактики и других галактик	54
2.5.	Другие задачи	56
Глава 3. Нестационарность пространства-времени и астрометрия		57
3.1.	Введение	57
3.2.	Определение систем отсчета в астрометрии . . .	63
3.2.1.	Системы отсчета	66
3.3.	Стабильность центра яркости внегалактических радиоисточников	69
3.4.	Отклонение света звезды в гравитационном поле других тел	71
3.5.	Эффект слабого микролинзирования	74
3.6.	Изменения координат опорных квазаров	84
3.7.	Проблема измерения параллаксов	88
3.8.	Позиционные измерения из барицентра Солнечной системы	90
3.9.	Позиционные измерения из двух положений . .	97
3.9.1.	Измерения из двух точек орбиты	97
3.9.2.	Измерение годичного параллакса	101
3.9.3.	Измерения на жесткой базе	102
3.10.	Вид уравнений в эллиптических координатах . .	105
3.11.	Вековая абберрация	112
3.12.	Статистические характеристики слабого микролинзирования	114

3.13. Статистика изменения положения изображений	116
3.14. Заключение	121
Глава 4. Интерферометр-дугомер ОЗИРИС	123
4.1. Техника для высокоточных интерферометрических измерений	123
4.2. Общие принципы измерений углов методами интерферометрии	129
4.3. Физическая реализация входных точек	134
4.4. Концепция дугомерных измерений с совмещенными базами	136
4.5. Схема смесителя и методика выделения ахроматической полосы	139
4.6. Ориентация интерферирующих пучков	140
4.7. Принцип определения положения точки равной длины хода	141
4.8. Регистрация интерференционной картины	142
4.9. Величина базы астрометрического интерферометра	145
4.10. Требуемая точность измерения положения	145
4.11. Приведение результатов измерений в единую систему	146
4.12. Требования к темпу и точности внутренней метрологии	147
4.13. Влияние искажений волнового фронта	149
4.14. Дифракционный интегратор волновых искажений	150
4.15. Учет систематических ошибок измерений	151
4.16. Учет ошибок измерений, вызванных случайными факторами	152
4.17. Оптическая схема двухбазового дугомера-интерферометра	156
4.18. Система наведения телескопов интерферометра на светила	158
4.19. Схема проведения измерений с интерферометром ОЗИРИС	163

4.20. Метрологическая система двухбазового интерферометра	169
4.20.1. Принципы лазерных метрологических измерений	172
4.20.2. Осветительная система лазерной метрологии	178
4.20.3. Интерферометр для измерения длины базы	183
4.20.4. Лазерная метрология в астрометрическом инструменте с общей базой	184
4.20.5. Система ввода лазерного метрологического пучка	189
Глава 5. Решение астрономических задач с помощью КА ОЗИРИС	190
5.1. Входной каталог для космического интерферометра	190
5.1.1. Функциональное назначение основных классов объектов, включаемых во входной каталог	192
5.1.2. Отбор объектов, реализующих инерциальную систему координат	193
5.1.3. Объекты, позволяющие исследовать измерительные характеристики интерферометра-дугомера	198
5.1.4. Звезды, позволяющие исследовать масштабы во Вселенной. Описание классов объектов, предлагаемых для включения в программу наблюдений	200
5.1.5. Коррекция программы	208
5.2. Реализация инерциальной системы координат	209
5.2.1. Определение собственных движений и параллаксов звезд	212
5.3. Наблюдения двойных звезд и экзопланет	225
5.4. Бюджет ошибок	233

5.4.1.	Ошибки наведения и установки инструмента	234
5.4.2.	Ошибки оптического тракта инструмента	238
5.4.3.	Ошибки регистрации сигнала	239
5.4.4.	Ошибки метрологии инструмента	241
5.4.5.	Определение нуль-пунктов метрологической системы	241
5.4.6.	Влияние инструментальных ошибок на измерения	243
5.5.	Выводы	246
Глава 6.	Оптимизация программы наблюдений	249
6.1.	Составление расписания наблюдений КА ОЗИРИС	249
6.1.1.	Приоритеты в проведении наблюдений различных классов объектов	254
6.1.2.	Наблюдения с околоземной орбиты	258
6.2.	Построение алгоритма регрессионного анализа наблюдений	264
6.2.1.	Математическая модель обработки данных, предназначенная для прогноза	265
6.2.2.	Описательная (параметрическая) модель	271
6.2.3.	К вопросу выбора методологии обработки данных	274
6.2.4.	Регрессионный анализ (РА)	275
6.2.5.	Адаптивное регрессионное моделирование	278
Глава 7.	Астрометрический инструмент в космосе	286
7.1.	Аппаратурный состав дугомера-интерферометра	286
7.2.	Конструктив дугомера-интерферометра ОЗИРИС	288
7.2.1.	Описание конструкции двухбазового интерферометра	289
7.3.	Предварительный облик КА «Целеста»	291
7.4.	Расчет теплового режима оптического интерферометра	295
7.5.	Баллистико–навигационное обеспечение полета	298
7.6.	Управление угловым движением КА	301

7.6.1.	Последовательность операций по управлению ориентацией КА	304
7.7.	Бортовые системы КА «Целеста»	305
7.7.1.	Бортовой управляющий комплекс (БУК)	305
7.7.2.	Вторичный источник питания (ВИП) . .	307
7.7.3.	Узел управления пиротехникой	308
7.7.4.	Узел контроля заряда и разряда батареи .	309
7.7.5.	Модуль распределения питания по потребителям	309
7.7.6.	Узел контроля состояния и распределения энергии потребителям . .	309
7.8.	Предложения по размещению КНА ОЗИРИС . .	310
7.9.	О магнитных исполнительных органах управления КА	315
7.9.1.	Основные теоретические положения разгрузки двигателей-маховиков с помощью магнитных исполнительных органов	320
Заключение		326
Литература		329

ПРЕДИСЛОВИЕ

С древнейших времен, не зная письменности, люди ориентировались в своей хозяйственной деятельности по звездам, по звездам же определялись и временные циклы — неделя, месяц, год. На протяжении тысячелетий выделялись характерные конфигурации звезд — созвездия. В первую очередь были выделены зодиакальные созвездия, которые определяли путь Солнца и Луны по небу. Древнейшие цивилизации Месопотамии и шумеров связали названия этих созвездий с названиями окружающей фауны и занятиями скотоводов и охотников — Стрелец (охотник), Волопас (пастух), Скорпион, Рыбы, Рак, Овен и др. Другие названия созвездий северного неба достались нам от древних греков — Большая Медведица, Персей, Андромеда, Кассиопея... Они же, древние греки, начали систематически измерять координаты звезд, и в древнейшей науке астрономии появилась ее самая древняя часть — астрометрия. Эпоха географических открытий вызвала необходимость повышения точности измерения координат для определения местоположения судов. До XVIII века астрометрия составляла всю основу астрономии. Гиппарх, Птолемей, Улугбек, Тихо Браге систематизировали координаты звезд и составляли их каталоги. С XVII века начали проводить целенаправленные измерения положений звезд. Первоначальная точность каталогов составляла несколько минут дуги. В сере-

дине XX века точность каталогов достигла долей секунды. Появление во второй половине XX века принципиально новой техники наблюдений увеличило точность измерений координат звезд практически на порядок.

Начиная с XIX века измеряются не только координаты, но и параллаксы звезд, т. е., расстояния до них. Повышение точности определения параллаксов позволяет определять расстояния до все более далеких объектов.

В конце XX века был проведен первый и до сих пор единственный космический астрометрический эксперимент HIPPARCOS, который показал, что большинство звезд, ранее считавшихся одиночными, являются двойными или кратными. После этого эксперимента были поставлены новые задачи: определения кратности звезд, определение орбитальных движений в двойных и кратных системах, поиск невидимых спутников у звезд, исследование динамики и кинематики звездных скоплений, определение тригонометрических параллаксов и уточнение шкалы межзвездных расстояний, исследование воздействия нестационарного гравитационного поля Галактики на координатно-временные измерения и другие, вплоть до проверки теории относительности.

Эти задачи можно решить только на новом уровне точности наблюдений звезд — микросекундной. Такие возможности открываются при разработке оптического космического интерферометра-дугомера ОЗИРИС, разрабатываемого в Институте астрономии РАН в кооперации с другими организациями. ОЗИРИС — оптический звездный интерферометр, размещаемый на искусственном спутнике.

Таким образом, наука пастухов древнего мира становится высокоточной дисциплиной, позволяющей глубже познавать тайны окружающей нас Вселенной.

*А. А. Боярчук, академик РАН,
научный руководитель проекта ОЗИРИС*

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ

Настоящая книга представляет собой обобщение итогов работы большого творческого коллектива авторов, на протяжении ряда лет решавших разнообразные научные и научно-прикладные задачи в рамках российских космических астрометрических проектов. За последние 15 лет разрабатывалось несколько принципиальных схем космических аппаратов для астрометрии. Первоначально работа велась в двух основных направлениях — во-первых, полный обзор неба с измерением прямых изображений и, во-вторых, ограниченный по составу объектов высокоточный интерферометрический эксперимент. За время разработок выяснилось, что в ближайшие годы предпочтителен проект второго типа. В частности, это объясняется тем, что космические интерферометры пока никем не реализованы. Так появился проект Оптического Звездного Интерферометра Российского Исследовательского Спутника (ОЗИРИС).

В первой главе книги, написанной Л. В. Рыхловой, К. В. Куимовым, Г. Т. Болговой и А. В. Кузьминым дается краткий очерк развития астрометрии, от первых дошедших до нас работ ученых древних цивилизаций до международных космических экспериментов последнего десятилетия, и обсуждаются особенности решения основных задач астрометрии — построения инерциальной системы отсчета, земной системы от-

счета и определения координат небесных объектов в этих системах — на современном этапе развития науки, когда точность угловых измерений должна находиться в интервале 0.1–0.01 миллисекунды дуги. Здесь же сформулированы задачи, которые предстоит решать в будущем, например, проблема нестабильности во времени угловых координат центров яркости внегалактических радиоисточников, определяющих небесную систему координат.

Вторая глава, написанная А. С. Расторгуевым, В. Н. Семенцовым и М. А. Смирновым, содержит краткий обзор и характеристики научных задач, традиционно относившихся к звездной астрономии и астрофизике, существенный прогресс в решении которых стал невозможен без высокоточных прямых астрометрических измерений.

В третьей главе (авторы — М. В. Сажин, В. Е. Жаров, Т. А. Калинина, М. С. Пширков и О. С. Хованская) исследуются эффекты, связанные с релятивистской нестационарностью пространства–времени и приводящие к непредсказуемому изменению положения источников на небесной сфере.

Четвертая глава, написанная А. В. Багровым и А. Г. Сергиным, посвящена детальному описанию двухбазового интерферометра-дугомера ОЗИРИС.

В пятой главе (авторы — А. С. Расторгуев, А. М. Микиша, В. Н. Семенцов, М. А. Смирнов и С. И. Барабанов) описаны практические проблемы реализации инерциальной системы координат с помощью космического интерферометра-дугомера ОЗИРИС, способного осуществлять прямые наблюдения квазаров в оптическом диапазоне. В этой же главе рассмотрены способы решения некоторых астрометрических задач в эксперименте: составление программы наблюдений, методики абсолютизации дугомерных измерений и составление баланса ошибок, а также особенности наблюдения кратных небесных объектов.

Шестая глава, написанная Е. Н. Федосеевым (п. 6.1) и А. В. Багровым и С. Г. Валеевым (п. 6.2), посвящена вопросам

оптимизации программы наблюдений с помощью космического интерферометра.

И наконец, седьмая глава (авторы — А. В. Багров, А. Н. Исупов, А. П. Рыженко, В. К. Сысоев и В. Б. Пинчук) посвящена описанию конструкции и функционирования космического аппарата с установленным на борту интерферометром—дугомером ОЗИРИС. Следует отметить определяющую роль А. В. Багрова в организации работы большого коллектива ученых и конструкторов.

Не все участники работ по тематике космической астрометрии смогли принять участие в создании этой книги. Авторы приносят искреннюю благодарность всем своим коллегам, многие годы в очень непростых условиях самоотверженно работавшим над решением одной из важнейших задач российской астрономической науки. Особую благодарность хотелось бы выразить инициаторам проекта — А. А. Токовину и О. Е. Шорникову.

К сожалению, не все ведущие участники этих работ дожили до наших дней. Считаю своим долгом посвятить эту книгу светлой памяти учителей и коллег — Владимира Владимировича Подобеда, Альберта Петровича Гуляева, Вилена Валентиновича Нестерова, Анатолия Анатольевича Волчкова, Ильи Шаяевича Эцина и Игоря Анатольевича Герасимова.

*Л. В. Рыхлова, зав. отделом космической
астрометрии Института астрономии РАН*

*К. В. Куимов, зав. отделом астрометрии
Государственного астрономического института
им. П. К. Штернберга, МГУ*

РАЗВИТИЕ АСТРОМЕТРИИ И ЕЕ СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ

1.1. История астрометрических исследований

Астрометрия — это раздел астрономии, задачей которой является установление геометрических, кинематических и динамических свойств небесных объектов. Эти задачи стояли перед людьми и решались ими уже в древности: необходимо было уметь ориентироваться на местности, определять время внутри суток и измерять более длительные промежутки времени. Поэтому астрометрию можно считать самой древней областью астрономии. Наблюдения расположения звезд, движения Солнца, Луны и планет давали возможность удовлетворить такие практические потребности. Иными словами, человек издревле занимался определением направлений, по которым приходит свет от небесных объектов.

Первые известные определения положений небесных светил были сделаны за 2–3 тысячи лет до н. э. Древние греки, используя для определения положений звезд армиллярные сферы, получали их координаты с точностью $\pm 15'$. Этого уже оказалось достаточно, чтобы Гиппарх (II в. до н. э.), сравнивая свои наблюдения с более ранними, открыл явление предварения равноденствия, или прецессию.

Наиболее известным каталогом древности, однако, явля-

ется каталог 1025 ярких звезд Птолемея (138 г. до н. э.). Благодаря Птолемею, до нас дошли идеи и звездный каталог Гиппарха. Звезды каталога Птолемея позднее много раз перенаблюдались для повышения точности, каталог переиздавался и употреблялся в астрономической практике в течение нескольких веков. Точность определения положений небесных объектов постепенно повышалась и в средние века достигла $\pm 2'$. Такова точность известных каталогов Улугбека (1437 г.), Тихо де Браге (1601 г.), Яна Гевелия (1661 и 1701 гг.).

Изучение движений тел Солнечной системы привело к определению значений астрономических постоянных: Улугбек уточнил значение наклона экватора к эклиптике и величину тропического года, Тихо де Браге открыл явление прецессии от планет и ввел в практику определение положения точки весеннего равноденствия по наблюдениям Солнца. На основе наблюдений Тихо де Браге И. Кеплер вывел законы движения планет.

Астрономический телескоп в качестве визирного приспособления впервые применил в 60-х годах XVII в. Жан Пикар на Парижской обсерватории. Прообразы пассажного инструмента и меридианного круга создал в 1689 г. датский астроном Оле Рёмер. В результате в первой половине XVIII в. точность определения координат небесных объектов достигла $\pm 2''$.

С основанием и развитием механики, Галилеем и Ньютоном было введено понятие инерциальной системы координат, т. е. системы «неподвижных» звезд. Система «неподвижных» звезд очень удобна для сопоставления наблюденных положений небесных тел в разные эпохи наблюдений, а, следовательно, и для изучения движений во Вселенной. И, естественно, последовало открытие Галлеем в 1718 году собственных движений звезд, что немедленно и пошатнуло концепцию «неподвижных» звезд, и усложнило процедуру составления каталогов звезд, т. е. практическую реализацию системы координат небесных объектов.

Практическая потребность в навигационном обеспечении привела к строительству Парижской (1667 г.), Гринвичской

(1675 г.) и других обсерваторий в крупных европейских городах. В Гринвичской астрономической обсерватории Дж. Брайля в первой половине XVIII в. открыл абerrацию света и нутацию земной оси. Интересно отметить, что целью Брайля было измерение параллакса звезд, который, однако, ему не удалось обнаружить. Большой вклад в астрономические исследования внесли обсерватории Германии, Франции, США, Южной Африки (Кейптаун). В 1839 г. была открыта Пулковская обсерватория.

Все наблюдения велись с поверхности Земли. Для вычисления координат небесных тел в небесной системе необходимо учитывать положение наблюдателя и вращение Земли. Сделать это можно, только зная положение наблюдателя на Земле и законы вращения Земли. Чем точнее становились наблюдения, тем яснее становилась необходимость системы координат, связанной с Землей. Постепенно складывалась концепция необходимости создания двух опорных систем координат: инерциальной и земной, связь между которыми должна осуществляться через согласованный комплекс фундаментальных астрономических постоянных.

1.2. Развитие методов построения инерциальной системы координат

Широкое распространение с конца XVIII в. получил метод определения координат небесных тел при наблюдении их прохождения через меридиан. Работы Пулковской обсерватории, опиравшиеся на доведенный Бесселем и Струве до высокой степени совершенства меридианный принцип определения экваториальных координат звезд и планет, стали классическими, а меридианный круг и меридианный принцип наблюдений на три века (с XVIII до конца XX в.) стал основным в позиционной астрометрии.

Из наблюдений определяются шесть параметров: сферические координаты объектов на небе (прямое восхождение и склонение), собственные движения объектов по прямому вос-

хождению и склонению, параллакс (эквивалент расстояния) и лучевая скорость. Классический метод определения координат звезд состоит в наблюдении прохождения их через меридиан. Моменты прохождения светил через меридиан определяют их прямые восхождения, а из измерений зенитных расстояний в этот момент получают склонения. Положения среднего экватора и эклиптики определялись с помощью того же меридианного круга из специальных наблюдений положений Солнца и планет, теории их движения и соответствующих астрономических постоянных. Различали абсолютные, т. е. независимые определения координат, и относительные, или дифференциальные. В первом случае все необходимые параметры получают из самих наблюдений, во втором — координаты определяются относительно опорных звезд, взятых из уже имеющегося каталога.

Каждый каталог абсолютных определений координат звезд задает независимую координатную систему. В качестве примера приведем пулковские абсолютные каталоги XIX в. и начала XX в. Комплексная переработка нескольких десятков абсолютных каталогов, составленных из наблюдений на разных обсерваториях, приводит к получению фундаментального каталога.

Методы построения фундаментальной системы координат и теория вывода поправок ее нульпунктов были разработаны во второй половине XIX в. Первую фундаментальную систему звездных положений и первый фундаментальный каталог составил в 1879 г. немецкий астроном А. Ауверс. Широко известны фундаментальные каталоги Германского Астрономического Общества (*Astronomische Gesellschaft, AG*). Третий фундаментальный каталог AG, FK3, с 1940 г. был принят за основу всех астрономических ежегодников и при любых астрометрических и геодезических определениях. С 1962 г. таким стандартом стал каталог FK4. Первая Международная система астрономических постоянных была принята в 1896 г. и использовалась без изменений до 1964 г. Это заслуга С. Ньюкомба.

Создание инерциальной системы координат разделяется на два этапа: создание фундаментальной системы координат и определение вращательного движения созданной системы координат. При этом точность ее зависит также и от точности значений астрономических постоянных. Для ориентировки фундаментальной системы FK4 в пространстве были использованы имевшиеся к тому времени продолжительные ряды наблюдений Солнца, больших и малых планет, а также галактик — для уточнения системы собственных движений.

Каталог FK4 содержит положения и собственные движения 1535 ярких звезд (до 7-й звездной величины), определенных на эпоху равноденствия В1950.0 с первоклассной для того времени точностью: $\pm(0.02 - 0.03)''$ по склонению и $\pm(0.001 - 0.002)^s$ по прямому восхождению.

Ко времени выхода следующего каталога FK5 появилась необходимость учета происшедших к этому времени изменений. В 1976 г. решением Международного астрономического союза (МАС) в практику астрономических измерений была введена новая система фундаментальных астрономических постоянных. Рекомендуются методы вычислений были существенно усовершенствованы: в качестве единицы времени вместо тропических столетий стали употреблять юлианские, за новую эпоху равноденствия была принята эпоха J2000.0, была введена барицентрическая экваториальная система отсчета, в которой все положения небесных тел задаются относительно среднего экватора и равноденствия эпохи J2000.0. Ее начало совпадает с центром масс Солнечной системы.

Каталог FK5 был принят в качестве Международного стандарта в 1984 г. Он состоит из двух частей: основной и дополнительной. Основная часть — это результат прямой ревизии каталога FK4, всех его классических фундаментальных (с хорошей наблюдательной историей) 1535 звезд с целью получения их уточненных положений и собственных движений. Дополнительная часть включает около 3000 новых, более слабых звезд, расширяющих фундаментальную систему опорных звезд до 9,7 звездной величины. По своей точности на эпо-

ху наблюдений каталог FK5 ненамного превосходит FK4, т.к. для его составления было привлечено не слишком много новых наблюдений. До 1998 года каталог FK5 служил опорной системой координат, представляя наиболее точную реализацию инерциальной системы координат на небе.

Составляемый фундаментальный каталог FK6 мало что изменит в сложившейся ситуации, поскольку построенная описанным выше способом фундаментальная система координат обладает медленным вращением в пространстве из-за изменения направления оси вращения Земли, изменения положения точки динамического равновесия, наконец, из-за собственных движений самих наблюдаемых ярких звезд.

Таким образом, многолетние абсолютные меридианные наблюдения ярких звезд в XX веке стали основой целой серии фундаментальных каталогов FK. Все остальные астрометрические наблюдения имеют целью определение координат других небесных тел в этой фундаментальной системе координат.

Основной недостаток серии каталогов FK — слишком малое количество звезд (около 0,1 звезды на квадратный градус небесной сферы). Другой недостаток — слишком большая яркость фундаментальных звезд. Поэтому для практического использования определяемой ими системы координат составлялись более полные, но менее точные каталоги. Основным из них был каталог IRS (International Reference Stars — международные опорные звезды). Наблюдения, положенные в основу этого каталога, выполнены также на меридианных кругах, но относительным методом, используя в качестве опорных звезды каталога FK4. Каталог IRS содержит около 40000 звезд — около 1 звезды на квадратный градус. Этого уже достаточно, чтобы можно было использовать более производительный метод наблюдений — фотографический. Фотографический метод, конечно, также является относительным.

Фотографические каталоги содержат неизмеримо большее количество звезд, притом значительно более слабых, чем те, которые были доступны меридианным наблюдениям. Первый фотографический обзор неба был выполнен в рамках

международного предприятия «Карта неба» (*Carte du Ciel*) в 1891–1950 гг. «Астрографический каталог», созданный на основе этих наблюдений и опубликованный в 254 томах, содержит около 4,5 млн. звезд, координаты которых указаны с точностью в среднем $0,4''$. Окончательную обработку удалось сделать только в начале 90-х гг. XX в., на компьютерах.

В течение XX в. было создано множество других фотографических каталогов, например, каталоги Астрономического общества AGK2, AGK3 (Германия), Йельские каталоги (США) и др. Было предпринято две попытки объединить все эти каталоги в один сводный каталог. В результате появились каталоги SAO (Смитсоновская обсерватория в США, 1966 г.) и PPM (*Position and Proper Motion*, Германия, 1988–1991 гг.). Первый создан для использования при определении координат искусственных спутников Земли фотографическим методом и содержит около 259000 звезд. Координаты звезд в нем отнесены к фундаментальной системе FK4. Второй, значительно более точный, содержит около 400000 звезд и использовался для самых разнообразных целей. Координаты звезд в этом каталоге отнесены к системе FK5. Заметим, что объединение каталогов — очень трудная работа, в ходе которой требуется определить и по возможности исключить систематические ошибки всех каталогов. О фотографических каталогах последнего десятилетия будет рассказано ниже.

1.3. Развитие методов определения параметров вращения Земли

В книге В. В. Подобеда и В. В. Нестерова «Общая астрометрия» [43] в качестве основных «взаимосвязанных и взаимопроникающих» проблем астрометрии приведены следующие три:

- создание фундаментальной системы координат и определение ее движения по наблюдениям звезд, тел Солнечной системы и галактик с целью максимального приближения к инерциальной системе координат;

- изучение вращения Земли вокруг своей оси на основе анализа изменения астрономических координат служб времени и широты (проблема распадается на изучение неравномерности вращения и изучение движения полюсов);

- определение астрономических постоянных, используя массивы астрометрических наблюдательных данных о естественных и искусственных небесных телах.

Первая проблема астрометрии в историческом аспекте кратко описана в предыдущих разделах. Проблема изучения вращения Земли имеет два важных аспекта. Во-первых, регулярное высокоточное измерение астрономических широт и долгот избранных обсерваторий имеет целью изучение причин их изменения, а во-вторых, задает ту самую вторую опорную систему координат, которую мы называем земной.

К систематическому изучению явления движения полюсов Земли, предсказанного еще Эйлером, приступили в конце XIX в., но, несмотря на огромное количество длительных рядов наблюдений, многое в этом сложном явлении остается неясным. Сложность явления и практическая необходимость знания координат полюса в каждый данный момент времени привели к созданию сети специальных станций, объединенных в Международную службу широты (МСШ). Решение было принято в 1895 г. на 11-й Международной геофизической конференции в Берлине. С конца 1899 г. на шести обсерваториях начались систематические наблюдения. Обсерватории располагались на одной широте ($+39^{\circ}08'$), имели однотипное оборудование и наблюдали одни и те же избранные звезды. Главная задача МСШ состояла в определении прямоугольных координат полюса x , y на каждую десятую долю года. Соответственно этим определениям вводились поправки к координаты станций наблюдений.

В 1962 г. МСШ была переименована в Международную службу движения полюса (МСДП). Наблюдения проводились и на других обсерваториях, которые зачастую оказывались оснащены более современными телескопами и давали более точные наблюдения. Использовались зенит-телеско-

пы, фотографические зенитные трубы, призмённые астролябии. К 1972 г. систематические наблюдения колебаний широты проводились более чем в 50 обсерваториях мира. МСДП публиковала свои результаты с довольно большим опозданием. Поэтому в 1956 г. была организована Срочная служба широты, которая использовала недельные наблюдения и публиковала вычисленное сглаженное движение полюса в срочных бюллетенях. Позднее эту работу взяло на себя Международное бюро времени.

С начала 60-х годов начали вычислять координаты полюса и по наблюдениям широты, и по наблюдениям времени в рамках совместной обработки. Они регулярно и быстро распространялись Международным бюро времени. В соответствии с рекомендациями XIII съезда МАС (Прага, 1967) все вычисленные координаты полюса должны быть отнесены к некоторому условному международному началу — СИО (*Conventional International Origin*). Оно определялось начальными широтами первых пяти международных станций. Точность определения координат полюса оставалась на уровне $\pm(0.02-0.03)''$. Анализ координат полюса привел к открытию сложных периодических движений полюса и к предположению о существовании его векового движения. Наблюдаемый период основной волны, так называемый чандлеровский период, оказался близок к 1,2 года. Эйлер предсказал наличие 305-суточного периода. Удлинение теоретически предсказанного Эйлером периода до сих пор не получило убедительного физического объяснения.

1.4. Определение астрономических постоянных

Все редуцированные вычисления в астрономии и геодезии (изменение начала координат, поворот осей и пр.) основываются на использовании принятой системы фундаментальных астрономических постоянных, т. е. совокупности полученных из наблюдений и согласованных на основе теории тяготения

значений параметров, характеризующих движение и вращение Земли, ее форму и размеры, орбитальное движение центра масс системы Земля–Луна, соотношение масс Земли, Луны, Солнца и планет.

Многие обсерватории и отдельные выдающиеся ученые внесли свой вклад в определение тех или иных постоянных. Например, наклон эклиптики к экватору определяли еще астрономы древности (Эратосфен — 220 г. до н. э., Гиппарх — 140 г. до н. э., Птолемей — 130 г. н. э.). Изменение наклона эклиптики к экватору было обнаружено в эпоху Коперника и количественно определено впервые Тихо де Браге. Затем были работы Бесселя, Струве. Множество наблюдательных и теоретических исследований было посвящено определению постоянной лунно-солнечной прецессии (со времен Гиппарха), постоянной нутации, величины астрономической единицы и т. д.

Первая система фундаментальных астрономических постоянных была принята и рекомендована для всеобщего использования на Международных парижских конференциях в 1896 и 1911 годах. В основу этой системы легла классическая работа С. Ньюкомба «Элементы четырех внутренних планет и фундаментальные астрономические постоянные», обобщавшая существовавшие результаты исследований. Анализу подверглись наблюдения звезд и планет от времен Брайля до конца XIX в. Первая система фундаментальных астрономических постоянных включала 14 величин.

Со временем повышение точности фундаментальной системы координат (каталог FK4), улучшение теории планетных движений, появление радиолокационных и лазерных средств наблюдения, космических аппаратов и других новых методов наблюдения вызвало к жизни сначала предложения о ревизии системы астрономических постоянных, затем интенсивную работу специальных рабочих групп ученых всего мира и, наконец, принятие новой системы постоянных на XII Генеральной ассамблее МАС в 1964 году в Гамбурге. Новая система задается совокупностью значений основных постоянных и некоторым числом согласующих соотношений, по кото-

рым вычисляются значения выводимых постоянных. Система постоянных МАС 1964 г. включала значения 23 основных и выводимых постоянных, 5 вспомогательных постоянных и коэффициентов и массы девяти больших планет.

Если первая система постоянных просуществовала 70 лет, то замена второй произошла уже в 1976 году и отразила весь комплекс достижений в области космических исследований, астрометрических наблюдений и новых знаний в науках о Земле. Эта система заложила возможность достижения одной из главных целей астрометрии — создание пространственно-временных основ для изучения Вселенной.

Определение значений астрономических постоянных происходит на основании анализа большого количества наблюдательного материала. Сюда относятся наблюдения космических аппаратов, лазерная локация ИСЗ и Луны, радиолокационные наблюдения тел Солнечной системы и др. Непрерывный процесс совершенствования теории и практики наблюдений небесных объектов приводит к тому, что проблема астрономических постоянных не может иметь окончательного решения. В последующих разделах мы рассмотрим современные небесные системы отсчета и способы их реализации.

1.5. Современные методы астрометрических измерений

Принципиальные изменения в концепции построения опорной системы координат на небе были обусловлены развитием методов радиоинтерферометрии, в частности, радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ/VLBI — *Very Long Baseline Interferometry*). Точность определения положений небесных объектов в радиодиапазоне очень быстро и значительно превысила точность наземной классической оптической астрометрии. Объектом наблюдений методом РСДБ стали, в частности, открытые в 60-х годах XX в. внегалактические радиисточники — квазары. Квазары имеют очень малые угловые размеры, очень далеки и поэтому практически непо-

движны в проекции на небесную сферу. Эти качества квазаров обеспечивают долговременную устойчивость опирающейся на них небесной системы координат, которую на современном уровне развития науки уже можно считать практически инерциальной.

В принципе, квазары излучают энергию в широком спектральном диапазоне, в том числе и в оптическом. Поэтому теоретически опорная система координат может быть реализована на небе сеткой точечных источников электромагнитного излучения в любых диапазонах длин волн, доступных наблюдениям с Земли. РСДБ-наблюдения внегалактических радиоисточников в настоящее время дают наиболее точные данные для решения задач астрометрии и геодинамики. Поэтому главная небесная система координат в настоящее время определена координатами именно внегалактических радиоисточников. Однако наблюдения производятся и в других спектральных диапазонах, наибольшее число — в оптическом. Во второй половине XX в. стало ясно, что существенно повысить точность классических методов наблюдений не удастся и астрономы приступили к разработке методов внеатмосферных наблюдений.

В это же время стали появляться и другие современные методы наблюдений, которые к концу века полностью заменили классические методы. Это — лазерная локация Луны, лазерная локация специальных искусственных спутников Земли, снабженных уголковыми отражателями (Лазгеос, Старлетт), навигационная радиотехническая система GPS (Global Positioning System) со своим «созвездием» спутников, система DORIS — доплеровская орбитографическая система, работающая со своими специальными спутниками (SPOT-2, SPOT-4, TOPEX/Poseidon и другими новейшими модернизированными спутниками). Каждая система обладает своими особенностями, своим набором наземных станций, своими особенностями обработки и т.д. Если лазерной локацией Луны занимаются всего 4 станции на земном шаре, а на Луне всего 4 объекта для локации (два Аполлона и два Лунохода),

то в работе системы GPS участвуют более 200 станций наблюдений, около 40 спутников. В системе DORIS работают 52 наземные станции. Развивается российская глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС).

Была проделана огромная работа как по отдельной, так и по совместной обработке новых массивов наблюдений в специально организованных международных центрах обработки данных, проведены многочисленные обсуждения результатов, оценки точностей и пр. В результате мы имеем точную и полную информацию и о вращении Земли, и о координатах станций наблюдения и их изменениях, и об изменении орбит спутников. В частности, теперь имеются ежесуточные данные о положении полюса вращения Земли на ее поверхности (координаты полюса), об изменениях вектора угловой скорости вращения Земли как по направлению, так и по величине, об изменении координат станций (т. е. о движении материков, на которых эти станции расположены). Все эти данные обеспечили решение практически важной задачи: определения взаимной ориентации земной и небесной системы координат. Заметим, что это стало возможным благодаря изобретению атомных часов, измеряющих время с относительной точностью до 10^{-14} .

Предметом нашего дальнейшего анализа будут астрометрические наблюдения с помощью космических аппаратов, целью которых является, в частности, установление стандартной опорной (фундаментальной, как говорят астрономы) системы координат. В следующем разделе мы сформулируем требования, которые предъявляет к опорной системе как наземная, так и «космическая астрометрия».

1.6. Требования к опорной системе в оптическом диапазоне

Рассмотрим два крайних типа задач, при решении которых необходимо наличие опорной системы небесных координат.

Во-первых, такая система должна обеспечивать определе-

ние астрометрических параметров наблюдаемых объектов в возможно большем числе видов астрономических наблюдений. Интерес астрономов в последние десятилетия все больше смещается в сторону слабых объектов, со звездной величиной 20 и больше. Все чаще астрометрические задачи приходится решать с помощью больших телескопов с ограниченным полем зрения, например, $10' \times 10'$. Учитывая эти тенденции, можно назвать следующие требования к реализации опорной системы:

- инерциальность: в настоящее время инерциальность опорной системы достигается, как уже говорилось, с помощью ее привязки к внегалактическим объектам;
- стабильность: точность реализации опорной системы не должна существенно меняться с течением времени;
- доступность: реализация опорной системы должна быть доступна типичным современным наземным и космическим телескопам;
- равноточность: точность реализации опорной системы в случайном и систематическом отношении не должна существенно зависеть ни от положения конкретных опорных объектов на небесной сфере, ни от блеска, цвета и других характеристик объектов.

Приведем характеристики опорного каталога, который в настоящее время можно было бы считать удовлетворительным с точки зрения изложенных требований.

1. Число опорных объектов — $5 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^7$. Это требование вызвано необходимостью иметь 4–8 опорных объектов в типичном поле зрения $10' \times 10'$ большого наземного телескопа.

2. Диапазон звездных величин — $14 \leq V \leq 20$ (V — звездная величина в системе UBV). Это типичный диапазон звездных величин объектов, наблюдаемых с Земли. В этом же диапазоне находятся внегалактические радиоисточники, привязка к которым позволяет добиться инерциальности опорной системы. Конечно, опорный каталог должен содержать некоторое число объектов более ярких, в частности, для сопоставления с уже существующими опорными каталогами.

3. Точность — 10 — 100 мкс дуги (*micro arcsecond* — микро-секунд дуги). Точность наземных наблюдений достигает 10 мс дуги (*milliarcsecond* — миллисекунд дуги). Опорная система должна быть реализована с точностью в 10–100 раз лучшей типичной точности наблюдений.

4. Число определяемых астрометрических параметров — шесть. Это параметры, характеризующие как положение, так и трехмерный вектор скорости каждого опорного объекта.

5. Прямая привязка к внегалактическим радиоисточникам. Необходима для обеспечения инерциальности системы и установления нуль-пункта параллакс и собственных движений.

6. Информация неастрометрического характера — фотометрия и спектры. Необходима как для внутренних нужд самого эксперимента (например, для исследования уравнения цвета), так и для использования опорной системы в диапазонах, отличных от наблюдаемого в эксперименте.

Итак, для фундаментальной астрометрии важна точность наблюдений слабых объектов — именно они будут впоследствии использоваться как опорные и именно на слабых объектах выполняется привязка опорной системы к внегалактическим объектам. Поэтому, если обсуждается вопрос о возможности решения задач фундаментальной астрометрии в рамках космического эксперимента, оценкой точности этого эксперимента является точность определения астрометрических параметров именно слабых объектов.

Построение опорного каталога, удовлетворяющего перечисленным выше требованиям, возможно только в рамках космического эксперимента и только методом, обозначаемым как «глобальная астрометрия». Под этим термином понимается такая организация наблюдений, когда окончательный результат для каждого данного объекта зависит практически от всех выполненных наблюдений. Отметим, что этот метод может использоваться как для решения задач астрометрии в широком смысле, так и для решения задач фундаменталь-

ной астрометрии. Рассмотрим достоинства и недостатки этого метода.

К достоинствам относятся:

- возможность измерения больших дуг, гарантирующая «жесткость» системы координат, выводимой из наблюдений, и абсолютный характер выводимых параллаксов звезд;
- наблюдения за пределами атмосферы устраняют основное препятствие для достижения милли- и микросекундной точности. При наземных наблюдениях такая точность, по-видимому, не может быть достигнута;
- возможность наблюдения всей сферы одним инструментом, гарантирующая отсутствие разного рода «зонных» систематических ошибок;
- возможность обеспечения стабильных условий наблюдения;
- значительно большая, чем в наземных наблюдениях, производительность.

Основным недостатком глобальной космической астрометрии является краткосрочность наблюдательной кампании, приводящая к сравнительно низкой точности определения собственных движений. Как правило, годовые собственные движения в космическом эксперименте определяются с той же точностью, что и положение на среднюю эпоху. Это ведет к тому, что сформулированное выше требование стабильности не выполняется. Типичный пример — каталог эксперимента HIPPARCOS, сравнительно низкая точность собственных движений которого привела в настоящее время к ухудшению точности реализации опорной системы на порядок по сравнению с точностью на среднюю эпоху эксперимента.

Итак, космический астрометрический эксперимент описанного типа носит обзорный характер. Его результаты могут быть широко использованы и расширены при любых наземных наблюдениях, в частности, преследующих астрометрические цели.

Второй тип задач, при решении которых требуется небесная опорная система — это космические астрометрические эксперименты, в рамках которых предполагается определить

астрометрические параметры всех объектов, входящих в программу данного эксперимента. Использование результатов такого эксперимента для наземных астрометрических наблюдений ограничено. Число объектов также меньше, чем в эксперименте первого типа, зато точность результатов может быть намного выше. Благодаря этому такой эксперимент принесет *знания другого качества*. Обсуждаемый в данной книге эксперимент относится именно ко второму типу. Конечно, небесная опорная система должна быть сформирована и в эксперименте такого типа, и при этом таким образом, чтобы можно было установить ее связь с уже выполненными и будущими экспериментами.

Первый космический астрометрический эксперимент HIPPARCOS осуществлен в конце XX века. Его название, хоть и представляет собой сложную аббревиатуру (*High Precision Parallaxes Collecting Satellite*), связано с именем Гиппарха — создателя древнейшего из сохранившихся до нашего времени каталога звезд. При обсуждении будущих экспериментов необходимо оценить роль, которую этот эксперимент сыграл в развитии астрометрии.

1.7. Роль HIPPARCOS в решении задач астрометрии

Эксперимент HIPPARCOS [106] выполнен Европейским космическим агентством в 1989-1997 гг. В исходном проекте, предложенном французским астрономом П. Лакрутом в 1967 г., ставилась задача измерения параллаксов около 100 000 звезд, однако впоследствии проект превратился в полномасштабный эксперимент в области космической астрометрии.

В проекте HIPPARCOS были предложены и впервые реализованы идеи глобальной астрометрии, присущие большинству последующих проектов в этой области: непрерывное сканирование небесной сферы, одновременное наблюдение двух полей зрения, разнесенных на большой угол, совместная редукция результатов всей наблюдательной кампании и т.д.

Эксперимент завершился построением каталога 118 218 звезд (2–3 звезды на квадратный градус) средней звездной величины $V = 8.5$ с точностью всех астрометрических параметров около 1 мс дуги на эпоху J1991.25. Отметим, что эта точность является беспрецедентной в истории астрометрии.

В рамках эксперимента выполнен попутный эксперимент Тихо (Tycho, в честь Тихо де Браге), в результате которого построен каталог высокоточных положений и двухцветной фотометрии 1 058 332 звезд, впоследствии послуживший основой для создания серии массовых каталогов: Опорного каталога Тихо (*Tycho Reference Catalogue*, TRC) [90, 91], АСТ [130], Tycho2 [79]. Основные характеристики эксперимента и сводка свойств каталогов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.1: Основные характеристики эксперимента HIPPARCOS

Характеристика	Значение
Космический аппарат	
Масса	1140 кг
Потребляемая мощность	295 Вт
Пропускная способность канала «Земля–КА»	2 Кбит/с
Пропускная способность канала «КА–Земля»	24 Кбит/с
Орбита	Эллиптическая
Наклон орбиты	43°
Частота вращения вокруг собственной оси	11.25 оборота в день (168.75"/с)
Оптическая система	
Телескоп	Системы Шмидта
Поле зрения	0.9 × 0.9°
Базовый угол (между полями зрения)	58°
Диаметр главного зеркала	290 мм

Таблица 1.1. (продолжение)

Характеристика	Значение
Фокусное расстояние	1400 мм
Масштаб в фокальной плоскости	6.8 мкм/''
Качество поверхности зеркал	$\lambda/60$ (при $\lambda = 5500 \text{ \AA}$)
Основной детектор	решетка Рончке с 2688 щелями
Период щелей решетки	1.208'' (8.2 мкм)
Приемная аппаратура	
Тип	Диссектор/фотокаод
Тип фотокаода	S20
Масштаб на фотокаоде	3.0 мм/''
Спектральный диапазон	3750–7500 \AA
Эксперимент Тихо	
Детектор	решетка Рончке с 4 щелями под углом $\pm 45^\circ$ к направлению сканирования
Тип фотоприемника	фотокаод
Спектральный диапазон (B_T)	$\lambda_{eff} = 4300 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 900 \text{ \AA}$
Спектральный диапазон (V_T)	$\lambda_{eff} = 5300 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 1000 \text{ \AA}$

Таблица 1.2: Основные характеристики каталогов Hipparcos и Тихо.

Характеристика	Значение
Интервал наблюдений	J1989.85–J1993.21
Средняя эпоха каталога	J1991.25
Опорная система	ICRS
Расогласование с системой ICRS (по каждой из осей)	± 0.6 мс дуги
Остаточное вращение системы каталога относительно инерциальной	± 0.25 мс дуги/год

Таблица 1.2. (продолжение)

Характеристика	Значение
Каталог Hipparcos	
Число звезд	118 218
Средняя плотность звезд на квадратный градус	~ 3
Предельная звездная величина	$V \sim 12.4^m$
Полнота	до $V = 7.3 - 9.0^m$
Медианная точность положений на эпоху J1991.25 ($H_p < 9^m$)	0.77/0.64 мс дуги (α/δ)
Медианная точность параллаксов ($H_p < 9^m$)	0.97 мс дуги
Медианная точность годовых собственных движений ($H_p < 9^m$)	0.88/0.74 мс дуги (α/δ)
Число звезд, расстояние до которых определено с точностью лучше 10%	20853
Остаточные систематические ошибки (оценка)	< 0.1 мс дуги
Общее число отдельных астрометрических наблюдений	$\sim 3.6 \times 10^6$
Медианная точность широкополосной фотометрии ($H_p, H_p < 9^m$)	0.0015^m
Общее число широкополосных фотометрических измерений	$\sim 13 \times 10^6$
Число переменных (или заподозренных в переменности) звезд	11597 (8237 новых)
Число двойных и кратных систем, разрешенных на компоненты	23882
Каталог Tycho	
Число звезд	1 058 332
Средняя плотность, звезд на квадратный градус	~ 25
Предельная звездная величина	$V_T \sim 11.5^m$

Таблица 1.2. (продолжение)

Характеристика	Значение
Полнота	$V_T \sim 10.5^m$
Медианная точность астрометрических параметров на эпоху J1991.25	25 мс дуги
Медианная точность астрометрических параметров на эпоху J1991.25 для ярких звезд ($V_T < 9^m$)	7 мс дуги
Остаточные систематические ошибки (оценка)	<1 мс дуги
Среднее число астрометрических и фотометрических измерений на звезду	130
Медианная точность фотометрии ($B_T, V_T, B_T - V_T$)	0.07, 0.06, 0.10 ^m
Медианная точность фотометрии для ярких звезд ($V_T < 9^m$)	0.014, 0.012, 0.019 ^m

Насколько результаты эксперимента приблизили нас к «идеальной» опорной системе? Прежде всего отметим, что низкая плотность звезд каталога HIPPARCOS на небе (2–3 звезды на квадратный градус) и их большой блеск ($V = 8.5$) не позволяют непосредственно использовать каталог HIPPARCOS при наблюдениях на современных телескопах. Отсутствие в программе наблюдений эксперимента внегалактических объектов (из-за их слабого блеска) привело к необходимости сложной дополнительной процедуры привязки к внегалактической системе. В результате рассогласование системы с внегалактической и остаточное вращение системы каталога HIPPARCOS на среднюю эпоху эксперимента J1991.25 довольно велики: 0.6 мс дуги и 0.25 мс дуги/год соответственно. В настоящее время рассогласование системы каталога HIPPARCOS с ICRS, естественно, значительно больше.

Краткосрочность эксперимента привела к невысокой точности определения собственных движений и, следовательно,

к ухудшению точности реализации опорной системы, которая в настоящее время составляет около 10 мс дуги.

Программа наблюдений включала «обзор» — все звезды до приблизительно 9-й величины, а также и более слабые звезды, интересные с астрофизической и других точек зрения. По нашей классификации, были частично решены задачи как первого, так и второго типа. В результате удалось сформировать небесную опорную систему намного более близкую к «идеальной», чем все предшествующие. Поэтому МАС рекомендовал каталог HIPPARCOS в качестве базовой реализации системы ICRF в оптическом диапазоне. Ее название — HCRF (*HIPPARCOS Celestial Reference Frame*, см. ниже). Окончательная версия содержит около 100 000 звезд.

Подводя итог, можно сказать, что HIPPARCOS позволил решить задачу формирования небесной опорной системы координат на качественно новом уровне, определить астрометрические параметры большого числа объектов с точностью, на 1–2 порядка превышающую достигнутую ранее, показал колоссальный потенциал космической астрометрии и перспективность ее дальнейшего развития.

1.8. Современные небесные системы отсчета и их реализация

Все достижения, описанные выше, позволили Международному астрономическому союзу на 24-й Генеральной ассамблее в 2000 г. принять 9 революционных резолюций. Для международного использования приняты две новые опорные системы координат: Международная небесная система координат ICRS (*International Celestial Reference System*) и Международная земная система отсчета ITRS (*International Terrestrial Reference System*).

Под стандартной опорной небесной системой координат понимается набор моделей, соглашений и предписаний, необходимых для определения в любой момент времени трех ортогональных осей системы. Модели прецессии и нутации яв-

ляются основными при создании этой системы координат. Реализаций опорной системы может быть много. Например, опорная небесная система координат в настоящее время реализована в радиодиапазоне и в оптическом диапазоне.

Международная небесная опорная система отсчета (ICRF, *International Celestial Reference Frame*) в радиодиапазоне определена принятыми положениями 608 внегалактических радиоисточников (в большинстве своем квазаров), наблюдавшихся в течение 1979–1995 гг. Основными, или первичными, являются 212 компактных радиоисточников с наилучшей наблюдательной историей. Точность системы отсчета поддерживается на уровне 0.2 мс дуги, начало отсчета совпадает с барицентром Солнечной системы, эпохи равноденствия системы координат (в привычном для астрономов понимании этого слова) уже нет.

Преимущество с фундаментальной системой координат, заданной каталогом FK5, обеспечивается следующим образом: направление осей систем ICRF и FK5 совпадают на эпоху равноденствия J2000.0 — эпоху равноденствия FK5. Это означает, что полюс системы определяется направлением, заданным стандартными моделями прецессии и нутации МАС, а нуль-пункт прямых восхождений системы ICRF зафиксирован путем назначения прямого восхождения радиоисточнику 3C273B равным его прямому восхождению в системе FK5.

1.9. Современная земная система отсчета и ее реализация. Определение параметров ориентации Земли

В отличие от эпохи классической астрометрии и создания каталогов серии FK, когда параметры, характеризующие различного рода неравномерности во вращении Земли и в движении ее полюсов, определялись с помощью классических пассажных инструментов, зенитных труб, зенит-телескопов и астролябий, сейчас используются для этой цели все те же методы РСДБ, лазерной локации и радиотехнические системы.

Сейчас существуют уже продолжительные ряды наблюдений параметров ориентации Земли новыми методами. Это позволило совершенно по-новому поставить вопрос об установлении системы координат, связанной с Землей.

Опорную земную систему координат ITRS, представляет геоцентрическая система с началом в центре масс Земли, включая ее атмосферу и океаны.

Так же, как и в случае ICRS, ITRS определяется набором предписаний, соглашений и моделей, необходимых для определения трех ортогональных осей системы на любой момент времени. Число стандартных моделей, используемых в земной системе координат значительно больше — это модель геопотенциала, атмосферы, модель приливов, модель движения плит, гидродинамические модели и др.

ITRS базируется на каталогах положений точек на поверхности Земли и реализуется через оценки координат и скоростей их изменений для совокупности наземных станций, ведущих наблюдения при помощи РСДБ, лазерной локации Луны (ЛЛЛ), радиотехнических навигационных спутниковых систем GPS (*Global Positioning System*), лазерной локации искусственных спутников Земли (ЛИС), доплеровской орбитографической геодезической системы DORIS.

Совокупность декартовых координат наземных станций, ведущих такие наблюдения, реализует Международную земную систему отсчета (*International Terrestrial Reference Frame*, ITRF). Заметим, что в определении ITRF присутствуют не только координаты, но и скорости их изменений (имеющих величины порядка сантиметров в год).

Международная Опорная небесная система координат (ICRF) связана с международной опорной земной системой координат (ITRF) через параметры ориентации Земли (EOP, *Earth Orientation Parameters*), определение которых входит в задачи Международной службы вращения Земли и опорных систем (IERS, *International Earth Rotation and Reference Systems Service*). Параметры ориентации Земли характеризуют изменение вектора угловой скорости вращения Земли относитель-

но инерциальной системы координат, а также изменение положения земного шара относительно вектора угловой скорости вращения. В публикациях IERS на каждые сутки можно найти:

- разницу между всемирным временем UT1 и всемирным координированным временем UTC. Эта разница — следствие неравномерности вращения Земли;

- отличие направления вектора угловой скорости вращения Земли от направления, предсказываемого моделью прецессии-нутаии MAC;

- ориентировку оси z ITRF относительно направления угловой скорости вращения Земли (движение полюсов).

Точность определения всех этих параметров в настоящее время лучше 1 мс дуги.

1.10. Современные стандарты систем координат, рекомендованные MAC

Точность астрометрических измерений и измерения времени, достигнутая в последние десятилетия, заставила астрономическое сообщество пересмотреть существовавшие ранее стандарты и соглашения и принять новые. Кратко суть этих, по нашему мнению, революционных изменений состоит, в общих чертах, в следующем.

1. Небесная система координат уже не связана с вращением Земли и ее движением вокруг Солнца. Нет уже эпохи равноденствия системы координат в привычном для астрономов смысле. Квазары и другие внегалактические радиоисточники являются носителями не только известных (нулевых) собственных движений на небесной сфере, но и известных (нулевых) параллаксов. Заметим для строгости, что при определении координат квазаров методами РСДБ одновременно определяются параметры вращения Земли (поскольку радиотелескопы стоят пока на Земле).

2. Небесная система координат представлена почти на два порядка большим числом объектов, чем это было в каталогах

серии ГК. Впервые в истории астрономии реализация небесной системы координат в оптическом диапазоне содержит не только координаты звезд, но и параллаксы. Системы координат в радио и оптическом диапазонах согласованы с точностью, ранее не достигнутой.

3. Земная система координат определена методами, в которых направление приходящего от внеземных источников излучения определяется независимо от направления силы тяжести в данном пункте (т. е. без применения классического уровня в меридианных инструментах).

4. Правила перехода между системами координат (включая шкалы времени) производятся по релятивистским формулам (т. е. включающим и преобразование времени).

5. Отдельное описание прецессии и нутации оси вращения Земли заменено единой моделью прецессии-нутации, поскольку на уровне достигнутой точности измерений их уже нельзя считать независимыми. Точность учета прецессии-нутации достигла 0.2 мс дуги.

Новые системы координат носят следующие названия:

- *Barycentric Celestial Reference System*, BCRS (барицентрическая небесная опорная система). Соответствующая шкала времени — TCB, *Barycentric Coordinate Time*;

- *Geocentric Celestial Reference System*, GCRS (геоцентрическая небесная опорная система). Соответствующая шкала времени — TCG, *Geocentric Coordinate Time*.

Формулы перехода между этими системами, основанные на общей теории относительности, позволяют учесть все эффекты с точностью значительно лучше миллисекунды. В частности, это создает условия для построения высокоточных теорий движения тел Солнечной системы в релятивистском приближении.

Некоторые другие предложения остаются пока предметом дальнейших дискуссий (например, введение опорной точки CIO — *Conventional International Origin* — вместо равноденствия).

Остались ли в астрометрии проблемы? Остались.

Стабильность опорной небесной системы координат ICRF в радиодиапазоне базируется на предположении о том, что квазары не имеют собственных движений. Особо тщательно отобраны первичные 212 компактных радиоисточников.

Между тем, при наблюдениях с более высокой точностью некоторые из этих источников показывают наличие неоднородной структуры, изменения в распределении яркости и, следовательно, возможность изменения координат источника. Подобные изменения обнаружены пока лишь у небольшого числа входящих в опорную систему источников, но смещения центра яркости источника могут достигать нескольких микросекунд дуги [84].

Обнаружен эффект слабого гравитационного микролинзирования, вызывающий смещение направления приходящего от источника излучения под действием стохастического гравитационного поля нашей Галактики, образованного совокупностью всех звезд и темных тел нашей Галактики.

При этих условиях неинерциальность опорной системы ICRF может потребовать обновления астрометрических каталогов каждые 30–50 лет [116].

В работе [94] показано, что после обработки данных VLBI с 1980 по 2002 годы были получены довольно значительные видимые собственные движения квазаров, превышающие 50 мкс дуги/год. Проблема состоит в том, чтобы определить, какая часть этих видимых собственных движений обусловлена эффектом неизвестной структуры радиоисточника, а какая — другими причинами.

Можно ожидать, что осуществление российского космического проекта «РАДИОАСТРОН» (наземно-космический радиоинтерферометр) внесет вклад в решение этих проблем.

Реализация опорной системы в оптическом диапазоне описана в п. 1.7. Повторим, что ICRF — кинематическая система координат, по внутренней (инструментальной) точности в десятки раз превосходящая точность лучших наземных каталогов. На самом деле реальную точность этой системы в принципе невозможно определить, исходя только из единственной

наблюдательной реализации, полученной на одном инструменте. Полноценная оценка его внешней точности, реальная точность системы положений и собственных движений может быть получена только путем сравнения. С чем?

Многочисленные работы, посвященные сравнению HIPPARCOS'a с FK5, фактически ставят больше вопросов, чем дают ответов об истинном качестве первого внеатмосферного каталога. Одним из независимых решений этой проблемы стала работа Ю. Б. Колесника [86]. Ю. Б. Колесник сконструировал независимую нормальную систему положений и собственных движений звезд экваториальной области N70 E, привязанную ко всему комплексу наземных наблюдений XX столетия. Эта система превосходит по точности все существующие сводные каталоги, включая FK5. Высокая точность системы N70 E позволила реально оценить уровень систематических и случайных ошибок каталога HIPPARCOS. Были определены систематические разности положений и собственных движений N70 E–HIPPARCOS, впервые давшие представление об уровне рассогласованности системы HIPPARCOS и системы, основанной на наземных астрометрических наблюдениях. Сравнение подтвердило аномально низкое значение поправки к постоянной прецессии, которое не соответствует поправке, полученной из РСДБ-наблюдений и лазерной локации Луны. Кроме того, было получено доказательство влияния на положения звезд и собственные движения HIPPARCOSa неидентифицированных двойных и кратных звезд.

Наконец, осталась проблема расширения опорной системы координат на слабые звезды. Много работ ведется в этом направлении.

Основой некоторых из них является каталог «Тихо», названный в честь датского астронома Тихо де Браге (1546–1601), проделавшего большое число наблюдений с максимальной для того времени точностью. Это результат «попутного» эксперимента на спутнике HIPPARCOS. В ходе выполнения эксперимента HIPPARCOS наблюдались вспомо-

гательные звезды, предназначенные для определения ориентировки аппарата. Эти данные, как и основные, несут информацию о положениях звезд и их звездных величинах. Точность их примерно в 20 раз ниже, зато число таких звезд превышает 1 млн. Каталог Тихо превышает по объему и точности положений звезд все каталоги, основанные на наземных наблюдениях. Однако точность собственных движений звезд оставляет желать лучшего. Для ее повышения используют наблюдения, выполненные в значительно более ранние эпохи.

Взяв в качестве ранней эпохи наблюдения, положенные в основу Астрографического каталога (Карта неба, *Carte du Ciel*), оказалось возможным в результате сравнения получить собственные движения около одного миллиона звезд с точностью $0.0025''$ – $0.0030''$ в год. Это намного точнее, чем собственные движения каталога Тихо, полученные без привлечения старых наблюдений. Таким способом создан «Опорный каталог Тихо», TRC [32, 100, 91, 89, 90, 78], который содержит положения, собственные движения, параллаксы и двухцветную фотометрию 990182 звезд до $V = 11.5^m$ на эпоху J2000.0. Точность каталога Тихо на J2000.0 ~ 45 мс дуги. Собственные движения имеют точность ~ 2.4 мс дуги в год. Это означает, что на 30–40 лет точность реализации обеспечена на уровне $0.1''$. Опорный каталог Тихо можно считать высокоточной, плотной и стабильной реализацией ICRS в оптическом диапазоне. Он обеспечил наблюдателю 24 звезды в поле зрения $1^\circ \times 1^\circ$.

Аналогичная работа, но по несколько другой методике была проведена в США [130]. В результате получен Астрографический каталог Тихо (АСТ), который содержит также около 1 миллиона звезд. Позже был создан каталог Tycho 2 для 2,5 млн. звезд. При создании этого каталога были привлечены наблюдения, выполненные на спутнике HIPPARCOS, но не вошедшие в каталог Тихо, и данные многих других каталогов, в том числе и Астрографического каталога.

Появились и современные фотографические обзоры неба. В США (Военно-морская обсерватория, *United States Naval Observatory*, USNO) на основе обзоров неба, сделанных с по-

мощью камеры Шмидта, получен каталог звезд В1.0 [126], который содержит координаты, собственные движения и звездные величины свыше 1 млрд. звезд. Точность данных — несколько десятых секунды дуги.

В настоящее время Военно-морская обсерватория создает каталог «The Second U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2)» [132]. Работа пока не закончена, однако большая часть уже опубликована. Основой послужили наблюдения на астрографе с помощью ПЗС-матриц в фотометрической системе, близкой к *R*. Точность координат звезд — $20 \div 70$ мс дуги, в зависимости от звездной величины. Каталог будет содержать несколько десятков миллионов звезд, что уже близко к числу звезд опорной системы, обладающей «доступностью» в указанном выше смысле.

Возвращаясь от проблем фундаментальной астрометрии и создания опорных систем координат к революционным резолуциям МАС, добавим, что система постоянных МАС 1976 стала последним официальным списком рекомендованных постоянных. Есть только «наилучшие» оценки, полученные разными организациями: в МАС, в Международной Службе Вращения Земли, в Международной Геодезической Ассоциации. Необходимо только указывать источники наблюдений, по которым определены те или иные постоянные.

1.11. Новые задачи астрометрии

Достигнутое за последние два десятилетия улучшение точности положений и собственных движений небесных тел эквивалентно улучшению этих же характеристик за последние два столетия.

При достижении миллисекундного и субмиллисекундного уровня точности астрометрия сталкивается с новыми серьезными источниками ошибок: двойственность или кратность звезд и звездоподобных объектов, их переменность, асимметрия яркости по диску звезды из-за возможного наличия планет или темных спутников, микролинзирование (т. е. проявле-

ние гравитационных эффектов по ходу луча) и др. Все эти явления вызывают периодические или случайные отклонения наблюдаемой траектории центра яркости звезды от прямолинейного векового движения.

Астрометрия отошла от фундаментальной опорной системы, определяемой в рамках динамической теории тел Солнечной системы, к фиксированной в пространстве кинематической опорной системе координат. Это позволяет более точно определять пространственно–временные преобразования и делает более актуальным релятивистский подход в определении основных опорных систем координат для Солнечной системы.

Следующий шаг в астрометрии — достижение субмиллисекундной точности — актуален и обусловлен новыми задачами, возникшими в связи с достигнутым миллисекундным уровнем точности.

Среди возникших задач можно назвать следующие:

- исследование структур дисков звезд и структур радиосточников;
- определение орбитальных движений в двойных и кратных системах;
- поиск невидимых спутников звезд;
- исследование кинематики и динамики звездных скоплений;
- определение тригонометрических параллаксов далеких объектов и уточнение шкалы расстояний во Вселенной;
- определение движений ближайших галактик и распределение галактик во Вселенной, построение пространственной картины Вселенной;
- исследование воздействия нестационарного гравитационного поля Галактики на координатно–временные измерения;
- исследования природы и распределения темной материи;
- поиск планетных систем у звезд;
- проверка тонких эффектов теории относительности.

Можно сказать, что астрометрия достигнутого уровня точности служит метрологическим базисом современной астрономии.

Подробнее о стоящих перед современной астрометрией задачах и о возможностях их решения в рамках обсуждаемого в данной книге проекта рассказано в следующих главах.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ АСТРОМЕТРИИ МИКРОСЕКУНДНОГО УРОВНЯ ТОЧНОСТИ

Основными определяемыми параметрами при астрометрических наблюдениях являются:

- положения объектов α , δ — экваториальные координаты;
- собственные движения μ_α , μ_δ ;
- параллаксы π ;

На основе измерений этих параметров получают знания о геометрии и кинематике Вселенной (по мере возрастания точности измерений — все более и более удаленных ее частей). К основным результатам такого знания относятся:

- построение «инерциальной» системы координат, к которой можно относить движение тел солнечной системы и звезд Галактики;
- определение абсолютных параллаксов всех типов объектов в Галактике, а также некоторых объектов в ближайших галактиках;
- создание базы данных для изучения геометрии Вселенной, для изучения кинематики и динамики Галактики (включая распределение видимой и невидимой материи).

В настоящее время, после успешного осуществления проекта HIPPARCOS, для нового шага в познании Вселенной, основываясь на достигнутых результатах, необходимо ответить на два вопроса:

- какова должна быть точность астрометрических измерений положений звезд, их собственных движений и параллаксов?

- сколько звезд необходимо пронаблюдать, в течение какого времени и сколько раз каждую?

Для построения инерциальной системы отсчета необходимо проведение наблюдений нескольких тысяч звезд, распределенных по небесной сфере. Точно так же, как и при создании фундаментального каталога (например, FK5), звезды могут быть отобраны по блеску ярче 8^m . Определение координат, параллакса и собственных движений одной звезды требует не менее 4 наблюдений (а лучше 8–12) в течение не менее чем 2,5 лет. С целью выявления двойных звезд необходимы многократные наблюдения (порядка 30 наблюдений для выявления периодов от единиц дней до единиц лет). Кроме того, для определения ориентации системы астрометрического каталога необходимо включить в программу наблюдений следующие объекты:

- радиисточники;
- внегалактические объекты;
- малые планеты.

Для наблюдений радиисточников, особенно внегалактических, проникающая способность используемой аппаратуры должна быть не ниже 18^m , таких слабых объектов, как и в каталоге HIPPARCOS, будет несколько десятков (квазары). Объектов $10^m - 13^m$ (галактические радиисточники и малые планеты) потребуется от нескольких десятков до единиц сотен.

Таким образом, для построения инерциальной системы нового поколения необходимо провести наблюдения 3–5 тысяч объектов, около 40 раз каждый в течение интервала времени не менее 2.5 года. При этом подавляющая часть объектов —

яркие, но обязательно должны наблюдаться (в ограниченном количестве) и весьма слабые объекты — до 18^m .

Для изучения физики и эволюции звезд, а также для построения шкалы расстояний в Галактике и вне ее в первую очередь необходимо знание тригонометрических параллаксов. Рассмотрим эти и другие астрофизические задачи с точки зрения необходимого количества наблюдаемых объектов и требуемой точности этих наблюдений.

2.1. Уточнение шкалы расстояний

Шкала расстояний в диапазоне от окрестностей Солнца до удаленных галактик строится на основе целого ряда эмпирических зависимостей, калибровка нуль-пунктов которых осуществляется по тригонометрическим параллаксам достаточно близко расположенных объектов, таких как переменные звезды, звездные скопления, планетарные туманности. Хотя в целом шкалу расстояний в астрономии можно считать непрерывной вплоть до метagalактических расстояний (см. [95]), существуют «узкие» места при стыковке различных методов, при переходе от мелкого масштаба к более крупному. При переходе от тригонометрических параллаксов к фотометрическим расстояниям важную роль сыграли методы определения расстояний до звездных скоплений. Единицей масштаба для отсчета расстояний, измеренных относительными методами является рассеянное звездное скопление Гиады. Оно расположено достаточно близко к нам (46 пк) и долгое время находилось на пределе точности определения тригонометрических параллаксов наземными наблюдениями. Выделенное положение скопления Гиады (см. [99]), изменения процедуры поправок за различие в химическом составе и эволюционные эффекты затрудняют переход к определению расстояний до других рассеянных скоплений. Ни для одного шарового звездного скопления никогда не определялся тригонометрический параллакс входящих в него звезд. Надо отметить также, что зависимость период–светимость для цефеид построе-

на без учета различий в химическом составе звезд Магеллановых облаков и Галактики и привязана к нуль-пункту шкалы расстояний до рассеянных звездных скоплений.

Для уточнения нуль-пунктов должна быть составлена представительная выборка каждого типа объектов, с учетом свойств объектов, выделяемых в зависимости от возраста, химического состава и других физических параметров. Точность определения тригонометрических параллаксов (приведена точность на уровне 10% от величины параллакса), минимальная яркость (в видимых лучах) и количество объектов (звезд) для построения шкалы расстояний приведены в таблице 2.1. Число звезд определялось с учетом трех вариантов химического состава, трех вариантов возраста (периода переменности) и трех объектов в каждой группе. В звездном скоплении необходимо наблюдение не менее 10 звезд.

Таблица 2.1. Галактические объекты–индикаторы расстояния

	точность (мкс дуги)	m_V	число звезд
Переменные звезды			
цефеиды	100	<11	>54
RR Lyr	50	<13	>27
красные гиганты	300	<10	>27
Рассеянные звездные скопления	50	<12	>270
Шаровые звездные скопления	20	<15	>270
Планетарные туманности	100	<15	>27

Существенным моментом в задаче уточнения шкалы расстояний в Галактике путем прямых определений параллаксов переменных звезд является необходимость учета в процессе обработки наблюдений неизбежных зависимостей типа уравнения блеска. В отсутствие исчерпывающей модели измерения это может быть сделано внесением в программу наблюдений заведомо неподвижных объектов с большой амплитудой

переменности блеска, например, объектов типа BL Lac (см. главу 5). Менее очевидной проблемой, которая может, однако, стать ключевой в уточнении расстояний, является переменность видимых диаметров пульсирующих переменных и смещение фотометрического центра изображения диска красных гигантов из-за наличия пятен. Уже в программе наблюдений HIPPARCOS были несколько сверхгигантов с видимым диаметром около 2 мс дуги. Видимые диаметры ярчайших цефеид составляют от 1.5 до 3 мс дуги. Например, полученная прямыми интерферометрическими наблюдениями на VLTI [85], зависимость «период–радиус» для классических цефеид (см. рис. 2.1) показывает, что при измерениях координат и параллаксов таких объектов мы имеем дело с ощутимой систематической величиной, которая даст вклад если не в сами координаты, то уж точно хотя бы в величины ошибок. И зна-

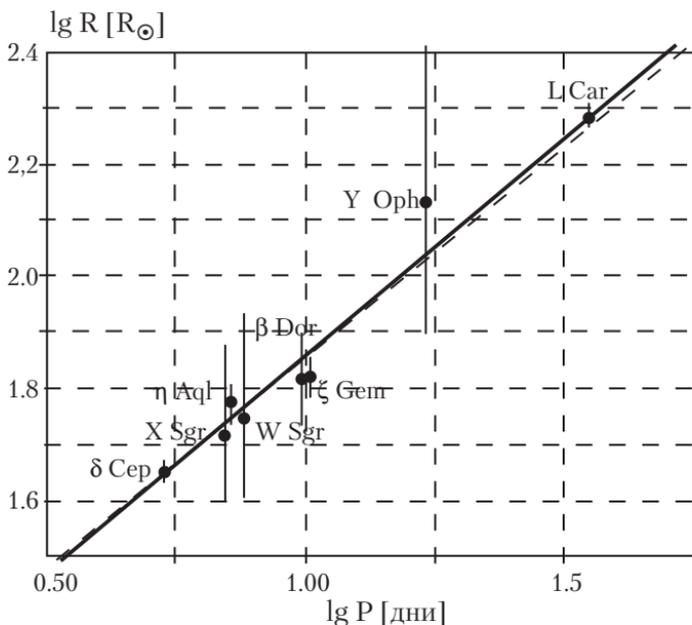


Рис. 2.1. Зависимость «период–радиус» для ярких цефеид (по работе Кервеллы и др.). Расстояние до звезд выборки — от 200 до 600 пк.

чит, неминуемо проявится в абсолютной калибровке зависимостей типа «период–светимость».

2.2. Исследование физики и эволюции звезд

Для сопоставления с теоретическими моделями эволюции звезд необходима представительная выборка звезд всех масс, светимостей, температур и химических составов. Часть таких звезд войдет в состав рассмотренных выше рассеянных и шаровых звездных скоплений. Кроме этого, необходимо включить в программу наблюдений звезды различных участков на диаграмме Герцшпрунга–Рессела, а также двойные и новоподобные звезды. Точность определения тригонометрических параллаксов, минимальная яркость (в видимых лучах) и количество объектов (звезд) для исследования физики и эволюции звезд приведены в таблице 2.2. Требование по точности среди звезд на диаграмме ГР наиболее жесткое по наиболее редким звездам — типа Вольфа–Райе (WR).

Таблица 2.2. Объекты, важные для изучения физики и эволюции звезд

	точн. (мкс дуги)	m_V	число звезд
звезды на диаграмме ГР	50 (WR)	<15	>432
новоподобные	100	<15	>9
двойные звезды	≤ 50	10-18	*)

*) подробнее о двойных звездах см. ниже.

2.3. Двойные звезды и поиск планетных систем

Основой программы должны стать систематические наблюдения звезд в ближайших окрестностях Солнца в течение примерно 10 лет. Полученные данные позволят решить следующие научные задачи:

2.3.1. Открытие компонентов двойных и кратных звезд

Будут открыты все компоненты двойных и кратных систем с периодами до 10–20 лет, включая маломассивные спутники — коричневые карлики и планеты. Разумно включить в программу все звезды, находящиеся в пределах 25 парсек от Солнца. Их более 1000.

Большая полуось α астрометрической орбиты оценивается как

$$\alpha = \pi \cdot q \cdot P^{2/3} \cdot M^{1/3}, \quad (2.1)$$

где $q = m/M$ — относительная масса спутника или планеты, P — период обращения спутника в годах, M — масса главной звезды в единицах массы Солнца, π — параллакс в секундах дуги.

Принимая $M = 1$, $\pi = 1/25$, $P = 1$, имеем $\alpha = 40q$ (мс дуги). При точности ~ 10 мкс дуги можно исследовать орбиты с полуосями от 0.1 мкс дуги, что соответствует спутнику с массой 2.5 массы Юпитера. Для обнаружения планеты типа Юпитера у звезды типа Солнца необходима точность:

50 мкс дуги ($m = 10$) на расстоянии до 10 пк;

20 мкс дуги ($m = 12$) на расстоянии до 25 пк;

5 мкс дуги ($m = 15$) на расстоянии до 100 пк.

Если говорить только об обнаружении планет, то возможности высокоточных наблюдений позволят дать надежные оценки частоты встречаемости планет-гигантов и, тем более, коричневых карликов у близких звезд. Условие $\alpha > 0.1$ мс дуги отвечает обнаружимости двойных систем с периодами от 0.3 суток, т. е. даже контактных систем. Иными словами, будет получена полная статистика двойных и кратных систем в солнечных окрестностях в диапазоне периодов от суток до 10–20 лет. Впервые появится возможность надежно определить распределение двойных по отношению масс и распределение кратных звезд по числу компонент. Эти данные послужат основой для проверки теорий происхождения двойных и кратных систем.

2.3.2. Высокоточные астрометрические наблюдения спектрально-двойных звезд

Высокоточные астрометрические наблюдения спектрально-двойных звезд позволят определить угол наклона орбиты к лучу зрения. Для систем с двойными линиями этого достаточно для вычисления масс компонент. Для систем с одиночными линиями массу спутника можно будет надежно оценить, зная наклон орбиты и массу главной компоненты (по ее спектральному классу). Таким образом, будут получены новые данные для уточнения масс и светимостей звезд, прежде всего близких карликов.

2.3.3. Наблюдения и открытие кратных протозвезд

Наблюдения и открытие кратных систем протозвезд в близких Т-ассоциациях (Телец, Змееносец). На типичном расстоянии 150 пк α в 6 раз меньше, чем для близких звезд при тех же периодах. Задавая порог $\alpha > 0.1$ мс дуги, получаем из (2.1): $q > 0.15 \cdot P^{2/3}$. Значит, могут быть открыты спутники субзвездных масс и все звездные спутники с периодами от 2 месяцев до 10–20 лет. Только с помощью сверхточной астрометрии можно будет получить столь полную статистику двойных и кратных протозвезд в этом интервале периодов, а также открыть и несветящиеся спутники.

Значительный интерес представляет исследование двойных протозвезд со спутниками, у которых распределение энергии в спектре отличается от распределения энергии в спектре для главной компоненты. В этом случае положение фотоцентра суммарного изображения зависит от длины волны (появляется цветовая разность координат), что может быть обнаружено по одному наблюдению. Целесообразно предусмотреть одновременную регистрацию фазы полос в широком диапазоне длин волн, чтобы обнаружить этот эффект, который обеспечивает дополнительные возможности по открытию и исследованию молодых кратных систем.

2.3.4. Динамика кратных звезд

Высокоточная астрометрия даст возможность определить ориентацию орбит тесных подсистем, а значит и угол между плоскостями орбит тесной и широкой подсистем. Это позволит окончательно решить вопрос о компланарности кратных звезд и их динамики. Кроме того, полнота открытия кратности даст уникальную информацию о статистических свойствах кратных звезд.

2.4. Исследование строения и кинематики галактик

2.4.1. Исследование строения Галактики

Для исследования строения Галактики необходимо выполнить наблюдения объектов, расположенных в ближайших спиральных рукавах Галактики, в области центра Галактики, а также периферийных областей Галактики — вплоть до Магеллановых облаков. Требования по точности определения параллаксов, по звездным величинам и по количеству наблюдаемых объектов приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Объекты, задающие масштаб структур в Галактике

	точн. (мкс дуги)	m_V	число звезд
ближайшие спиральные рукава	50	<12	>20
центр Галактики	10	<15	>10
Магеллановы облака	1.5	<13	>20

2.4.2. Исследование кинематики Галактики и других галактик

Для исследования кинематики Галактики необходимо знать параллаксы и собственные движения тех же звезд, что и для исследования строения Галактики, а также системы шаровых и рассеянных звездных скоплений. Различие появится только

в принципе группировки исследуемых объектов: при изучении строения галактики или скоплений звезды группируются и подразделяются на выборки по положению относительно центра локального объема, а при исследованиях кинематики — по остаточным скоростям относительно центроида скоростей.

Относительно исследования кинематики других галактик, отметим, что блеск звезд даже в М31 не превышает 20^m , что затрудняет прямое определение параметров вращения дру-

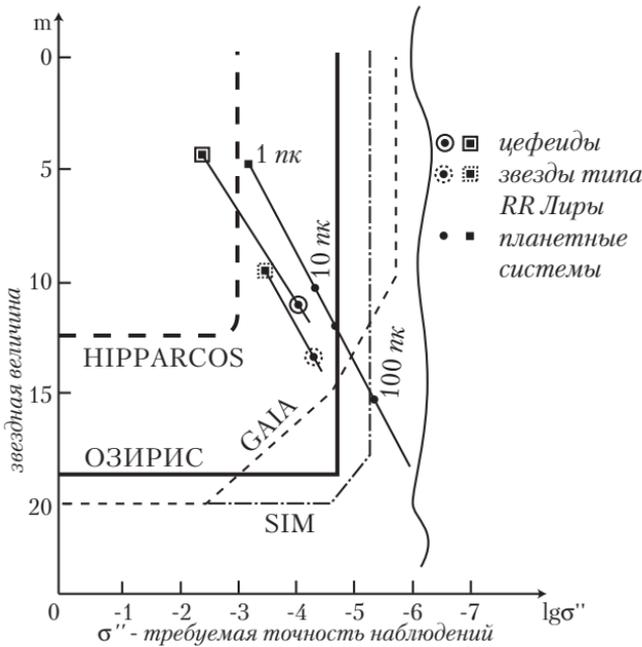


Рис. 2.2. Диаграмма «звездная величина»–«точность позиционных измерений». Волнистой вертикальной линией обозначен предел точности позиционных измерений, обусловленный вариациями гравитационного поля звезд Галактики. Кружками разного вида показано положение на диаграмме представительных выборок объектов, представляющих астрофизический интерес. Квадратами показано положение ближайших к Солнцу объектов тех же типов.

гих галактик. Известно, что скорость движения галактик как целого составляет величину порядка 10 мкс дуги в год. Для определения этой величины точность измерения положений должна быть выше на порядок.

2.5. Другие задачи

Кроме перечисленных выше научных задач, могут быть решены и ряд других, таких как экспериментальная проверка эффектов общей теории относительности и обнаружение объектов МАСНО (*M*Assive *C*ompact *H*alo *O*bjects — программы поиска массивных компактных объектов гало Галактики) по эффектам гравитационного микролинзирования. О последней задаче более подробно рассказано в следующей главе.

На рис. 2.2 приведена схема расположения объектов, представляющих астрофизический интерес, в координатах «звездная величина»–«точность позиционных измерений». Как и в таблицах 2.1–2.3, на рис. 2.2 в качестве требуемой точности измерений объектов разных типов взято определение их тригонометрических параллаксов с 10% точностью. Линиями показано положение объектов на диаграмме, измерения которых возможно различными инструментами (как осуществленными — HIPPARCOS, так и проектируемыми).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА–ВРЕМЕНИ НА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АСТРОМЕТРИИ МИКРОСЕКУНДНОГО УРОВНЯ ТОЧНОСТИ

3.1. Введение

В связи с подготовкой российского космического астрометрического эксперимента, обладающего сверхвысоким угловым разрешением, а также разработкой астрометрических проектов GAIA (*Global Astrometry Instrument for Astrophysics* – Глобальный астрометрический инструмент для астрофизики) [93], SIM (*Space Interferometry Mission* – проект космического интерферометра) [80] становится актуальной задачей определения принципиальных ограничений точности астрометрических экспериментов, связанных с нестационарностью пространства–времени.

Ожидаемая точность определения положений и параллаксов в проекте GAIA – от 4 микросекунд (мкс) дуги для звезд ярче 12-й звездной величины до 11 мкс дуги для звезд до 15-й звездной величины. Для 17-й и 20-й звездных величин точность составляет 27 и 160 мкс дуги соответственно. За пять

лет наблюдений предполагается определить координаты около 1 млрд. объектов. Из модельных расчетов следует [88], что на базе оптических наблюдений может быть создана внегалактическая опорная система отсчета, неопределенность вращения которой не превышает 0,25–0,35 мкс дуги в год. Указанная неопределенность по крайней мере на один порядок меньше той величины, которой можно достичь при наблюдениях на наземных и наземно-космических радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой (РСДБ), т.к. точность наблюдений РСДБ зависит от нестабильности и сложного распределения яркости внегалактических источников в радиодиапазоне. За пять лет работы интерферометра проекта SIM предполагается наблюдение около 10 000 объектов до 20-й звездной величины. Погрешность измерения больших углов на небе составит 4 мкс дуги (3 мкс дуги для параллаксов). Для астрометрических измерений малых углов ($< 1^\circ$) ожидается уменьшение погрешности до 0,5 мкс дуги.

В основе шкалы расстояний лежат тригонометрические параллаксы звезд. Современная наука с необходимостью требует высокоточных астрометрических наблюдений. Улучшение точности шкалы расстояний необходимо для однозначного решения большинства задач космологии и астрономии: значение и возможное изменение во времени постоянной Хаббла, возраст и размер Вселенной, относительное количество скрытой материи. Измерение реального или видимого собственного движения квазаров позволит изучить их эволюцию и движение компонент, а также построить более точную внегалактическую опорную систему отсчета. В нашей Галактике можно будет решить различные проблемы кинематики, связанные с определением размера и формы структурных компонент: балджа, спиральных рукавов, тонкого и толстого диска, гало. Нелинейные движения звезд Галактики указывают на наличие у этих звезд невидимых компаньонов. При наблюдениях с точностью в 0,01 миллисекунд (мс) дуги могут быть обнаружены тысячи планет с массой Юпитера в сфере радиуса 50 парсек (пк) и в сотни раз большее число коричневых кар-

ликов. Кроме того, возможной причиной нелинейного движения звезд и внегалактических источников может быть явление микролинзирования, о котором речь пойдет ниже.

Помимо чисто научных нужд, связанных с исследованием космического пространства, вопрос о предельной точности позиционных измерений связан также с одним из фундаментальных физических понятий — определением и реализацией инерциальной системы отсчета, в качестве реперов которой в астрономии в настоящее время используются далекие квазары. Этот интерес определяется и практическими потребностями, в частности, повышением точности навигации на Земле и в космосе.

До сих пор нестационарность (или квазиинерциальность) системы координат вызывалась изменением направления прихода излучения на телескопы от далеких реперных источников. Существуют две основные причины этого явления. Первая причина заключается в том, что направление на излучающие области в источниках является переменным. Например, движение облаков излучающей плазмы во внегалактических источниках приводит к видимому движению центра яркости, и, следовательно, к переменному положению реперного источника на небе. Вторая причина заключается в том, что в пространстве фотон в общем случае движется не по прямой линии. Отклонения от прямой линии возникают, когда фотоны движутся через среду, обладающую показателем преломления, отличным от единицы. Это может быть связано с наличием вещества на луче зрения. Однако существует еще одна причина, по которой фотон движется не по прямой линии даже в вакууме. Эта причина заключается в нестационарности нашего пространства–времени.

Понятие *система координат* в современной физике тесно связано с именами величайших физиков Галилео Галилея и Альберта Эйнштейна. Можно сказать, что физика началась с понятия механической относительности, введенного Г. Галилеем, а современная физика началась с понятия специальной относительности — теории, описывающей физические

процессы в системах координат, движущихся с релятивистскими скоростями. Понятие системы координат появилось уже в первой статье А. Эйнштейна по теории относительности «К электродинамике движущихся тел». В этой статье было постулировано, что все системы координат равноправны, другими словами, был сформулирован принцип ковариантности относительно лоренцевых преобразований. Позже принцип относительности был обобщен А. Эйнштейном на системы координат, движущиеся с ускорением — родилась общая теория относительности. В современной физике идея равноправия систем координат укоренилась и представляет сейчас одну из фундаментальных идей.

Идея о равноправии систем отсчета в физике называется общей ковариантностью. В начале прошлого века идея о возможности введения инерциальных систем отсчета вместе с постулатом о конечности скорости света (ковариантности) привела к созданию специальной теории относительности (СТО) и пересмотру фундаментальных принципов ньютоновской механики. Принцип ковариантности относительно равномерно движущихся систем координат показал свою продуктивность. А. Эйнштейн обобщил его на неравномерно движущиеся системы координат, отождествил метрику четырехмерного пространства–времени с гравитационным полем и создал общую теорию относительности (ОТО). Это была релятивистски инвариантная теория гравитационного поля. Глубокое качественное изменение, внесенное в физику ОТО, заключалось в том, что гравитационное поле было отождествлено с метрикой пространства–времени. В свою очередь это означает, что свойства пространства–времени в ОТО зависят от присутствия материи.

Образно говоря, если в ньютоновской физике пространство было лишь сценой, на которой разыгрывались события, то в релятивистской физике сама сцена перестраивалась в зависимости от присутствия «актеров» (массивных тел любой природы). Пространство–время было лишено своей абсолютности. В настоящее время расчёт инерциальной системы от-

счета становится нелинейной задачей — необходимо саму систему отсчета выбирать в зависимости от рассматриваемых в ней материальных объектов.

Поясним на простых рассуждениях основные принципы учета влияния материальных объектов на построение инерциальной системы отсчета. В астрономии система отсчета реализуется некоторым количеством астрономических объектов, взятых в качестве реперных, и фиксации физических моментов наблюдений в выбранной системе измерения времени. В современной астрометрии в качестве реперных объектов выбраны квазары — самые далекие объекты, трансверсальные скорости которых малы, и следовательно, поворот системы координат в пространстве также мал. Свет от них движется по искривленной траектории, определяемой гравитационными полями звезд нашей Галактики. Движение самих звезд складывается из регулярного движения вокруг центра Галактики и пекулярного движения. Таким образом, картина гравитационных полей является нестационарной. Соответственно нестационарной является и траектория фотонов от источника света до наблюдателя. Нестационарность этой траектории приводит к тому, что положение источника на небе флуктуирует [44, 116, 115]. Среднеквадратичная величина таких флуктуаций является некоторым принципиальным пределом для определения положения источника и построения фундаментальных астрометрических каталогов.

Усредненное гравитационное поле Галактики, а также его флуктуационные свойства определяются свойствами кривой вращения нашей Галактики. Б. Пачинский [103] высказал идею, что эта кривая вращения формируется населением сферического гало Галактики, состоящего из маломассивных звезд. Масса этих звезд слишком мала для того, чтобы в них вспыхнули термоядерные реакции. Таким образом, эти звезды являются несветящимися телами, заметить которые очень трудно. Одновременно Б. Пачинский предложил искать такие тела по проявлению в процессе микролинзирования и вычислил вероятность этого эффекта.

В конце прошлого века наблюдатели по эффекту микролинзирования открыли новую популяцию объектов нашей Галактики — темные тела с характерной массой $\sim 0,1 M_{\odot}$, где M_{\odot} — масса Солнца [54, 68, 129]. Количество этих тел таково, что они в значительной степени определяют кривую вращения нашей Галактики и составляют по крайней мере половину ее основной массы. Темные тела в Галактике распределены неравномерно. Как будет показано ниже, появилась принципиальная возможность измерить их плотность в окрестности Солнца по астрометрическим проявлениям.

Гравитационное поле обладает бесконечным радиусом действия. Таким образом, оно воздействует на все фотоны света, искривляя их траекторию. Тело с массой M отклоняет фотон, имеющий прицельный параметр p , на угол $2M/p$ от прямой траектории. Наблюдатель увидит угловое отклонение $\sim M/p$ от невозмущенного положения звезды. Этот эффект рассматривался в работе М. Сажина [44]. Для того, чтобы оценить порядок величины такого смещения, рассмотрим следующую ситуацию. Пусть население звезд обладает пространственной плотностью $n = 0,1 \text{ пк}^{-3}$ и имеет среднюю массу объекта $0,1 M_{\odot}$. При наблюдении далекого объекта можно приблизительно считать, что траектория фотона от объекта до наблюдателя имеет прицельный параметр порядка

$$p = \frac{1}{\sqrt{\pi R_H n}}.$$

Здесь R_H — радиус гало нашей Галактики. В этом случае среднее угловое отклонение составляет величину ~ 4 мкс дуги. Отметим сразу, что это минимальная оценка, реальные величины, как показывает компьютерное моделирование, получаются в десятки раз больше.

Отметим, что аналогичная точность уже достигнута в РСДБ-наблюдениях. В результате таких многолетних наблюдений установлены так называемые *определяющие* источники, положение которых наиболее стабильно и координаты измерены с минимальными ошибками. Эти ошибки составля-

ют по склонению δ и прямому восхождению α величину ~ 400 мкс дуги [77], что по порядку величины совпадает с приведенной выше оценкой. Наблюдатели интерпретируют такую ошибку определения положения источника на небе наличием собственных движений излучающей плазмы внутри источника или наличием вещества на пути распространения радиоволн от внегалактических источников к наблюдателю. Однако возможна и другая интерпретация — распространение света в нестационарном пространстве–времени тоже искажает истинное положение источника, что приводит к ошибке определения его координат.

В этой главе рассматривается современное понятие основных систем отсчета в астрономии на основе постановлений Международного астрономического союза (МАС). Особое внимание уделяется нестационарности нашего пространства–времени и влиянию этого эффекта на инерциальность системы отсчета. С этой целью будут рассмотрены основные причины, вызывающие непредсказуемые вращения (квазиинерциальность) системы отсчета. Величина такого вращения определяет предельную точность, с которой может быть реализована инерциальная система в астрономии.

3.2. Определение систем отсчета в астрометрии

При предположении, что пространство является евклидовым (или *абсолютным*, по терминологии И. Ньютона), система может быть инерциальной, если она неподвижна или движется прямолинейно с постоянной скоростью относительно абсолютного пространства. Время в ньютоновской механике также является абсолютным в том смысле, что течение времени не зависит от положения часов в пространстве. Это означает, что при переносе начала координат из одной точки пространства в другую (т.е. переходу в другую инерциальную систему) законы физики остаются неизменными. Расстояние между двумя событиями, произошедшими в один и тот же мо-

мент времени, одинаково в разных инерциальных системах, т. е. является инвариантной величиной.

Определить основные плоскости и оси системы отсчета можно двумя способами: кинематическим и динамическим. Если существуют выбранные тела, координаты которых известны и постоянны, то с этими телами можно связать инерциальную или, как говорят астрометристы, *фундаментальную систему координат*. Это — кинематическое определение. В действительности координаты небесных тел точно не известны из-за ошибок наблюдений и, кроме этого, могут меняться по ряду причин. В этом случае наилучшим приближением к инерциальной системе будет система, определяемая объектами, координаты которых известны с наилучшей точностью и искажены лишь случайными ошибками. Мы можем говорить, что подобная система *в среднем* не имеет вращения и можем назвать ее квазиинерциальной. В настоящее время наилучшей является система, задаваемая координатами внегалактических радиоисточников, а ее наилучшей оптической реализацией является каталог звезд HIPPARCOS [82].

Систему координат можно определить динамическим образом, если в качестве определяемых тел выбрать тела Солнечной системы, координаты которых определяются на основе уравнений движения, не содержащих кориолисовых членов. В простейшем случае — кеплеровском движении тела по эллиптической орбите относительно центрального тела O — система координат может быть определена плоскостью орбиты, которая в этом случае сохраняет свое положение в пространстве; ось Oz может быть определена как перпендикуляр к плоскости орбиты, а ось Ox , например, совпадать с большой полуосью эллипса. В рамках ньютоновской механики ось Ox сохраняет свое положение в плоскости орбиты. Задавая ось Oy с помощью векторного произведения $Oy = Oz \times Ox$, можно определить инерциальную систему координат. Так как период обращения тела является постоянным, то в динамической системе отсчета может быть определена динамическая шкала времени, названная *эфемеридной*.

В действительности ни положение плоскости орбиты в пространстве, ни положение большой полуоси в плоскости орбиты не остаются постоянными из-за возмущений со стороны других тел Солнечной системы, а также эффектов ОТО. Таким образом, динамическая система отсчета задается эфемеридами — таблицами положений Солнца, Луны и больших планет. В настоящее время широко используются эфемериды DE200/LE200, DE403/LE403 и DE405/LE405, вычисленные Лабораторией реактивного движения (*Jet Propulsion Laboratory — JPL*). Эфемериды DE405/LE405 рекомендованы Международной службой вращения Земли и систем отсчета (*International Earth Rotation and Reference Systems Service — IERS*) для использования в качестве стандартных, и ожидается, что они в скором времени заменят эфемериды DE200/LE200, которые сейчас являются основой при составлении ежегодников.

В СТО скорость течения времени зависит от движения часов в пространстве. Это означает, что промежуток времени между двумя событиями в разных инерциальных системах уже не является инвариантом: например, собственное время (время в лабораторной системе отсчета, связанное с движущимся наблюдателем) течет медленнее, чем время, измеряемое часами, покоящимися относительно инерциальной системы координат.

При наличии полей тяготения законы СТО в общем случае модифицируются. Однако в ограниченных областях пространства можно специальным образом выбрать ускоренно движущуюся систему координат. Если ускорение системы равно ускорению, которое приобрела бы свободная частица, помещенная в рассматриваемую область пространства, то такую систему можно считать локально инерциальной. В этой системе законы СТО выполняются с высокой точностью. Преобразование координат при переходе от одной локальной системы к другой определяется уравнениями Лоренца. В ОТО течение времени определяется не только скоростью часов, но и гравитационным потенциалом в месте расположения часов,

и поэтому в выбранной системе отсчета вводится *координатное* время и определяется закон преобразования времени при переходе в другую систему, т. е. к другому координатному или *собственному* времени, если система отсчета связана с наблюдателем. Таким образом, в резолюциях МАС, кроме определения направления координатных осей и их начала, приводятся определения соответствующих динамических шкал времени и законов их преобразования. В дальнейшем при использовании термина *система отсчета* будет подразумеваться, что задана система координат и шкала времени.

3.2.1. Системы отсчета

Главной задачей астрометрии является определение из наблюдений векторов положений и скоростей различных небесных тел. Но положение или координаты тела могут быть определены лишь относительно другого тела или какой-то выбранной точки. В астрономии координаты измеряются в выбранной системе отсчета. Система отсчета (*reference system*, англ.) — это теоретическое понятие; на основе официальных соглашений определяются основные плоскости и точки, а также координатные оси системы. Ни оси, ни основные точки системы на небе не выделены, поэтому в виде практической реализации системы отсчета (*reference frame*, англ.) принимается список координат и скоростей некоторого числа выбранных объектов (например, звезд или радиисточников). Такой список называется *каталогом*. Отдельный каталог является одной из реализаций системы отсчета.

Таким образом, на основе наблюдений астрометрия определяет системы координат. Две из таких систем имеют особую важность — это небесная система координат, необходимая для определения движения небесных тел, и земная система координат, в которой измеряется положение наблюдателя. Желательно, чтобы небесная система была инерциальной, т.к. в этом случае уравнения движения небесных тел записываются самым простым образом: в уравнениях отсутствуют силы инерции, обусловленные вращением системы отсчета.

До 1998 г. квазиинерциальная система была реализована в виде FK5 (фундаментальный каталог 5), который включает 1535 звезд. Координаты звезд известны с ошибкой $\sim 0,08''$ и собственные движения с ошибкой ~ 1 мс дуги в год. Дополнительный каталог (FK5-sup.) включает 3117 звезд, координаты и собственные движения которых определены с большими ошибками ($\sim 0,12''$ и 2 мс дуги в год, соответственно). Основная плоскость системы FK5 задавалась экватором на стандартную эпоху J2000.0, а начало отсчета прямых восхождений — пересечением экватора с эклипстикой на эпоху J2000.0. Согласно решению IAU, эклиптика определялась динамическим образом на основании наблюдений тел Солнечной системы, поэтому начало отсчета прямых восхождений называется *динамическим равноденствием* и обозначается как $\Upsilon_{J2000.0}$.

С 1 января 1998 г. по решению IAU определена Международная небесная система отсчета (*International Celestial Reference System — ICRS*), оси которой фиксированы по отношению к квазарам, причем направления осей согласованы с системой FK5; начало находится в барицентре (центре масс) Солнечной системы.

ICRS реализуется координатами 212 опорных радиоисточников. Для более плотного заполнения небесной сферы к ним добавлены 396 дополнительных источников, координаты которых измерены с худшей точностью. Создание новой системы отсчета стало возможным благодаря результатам 20-летних наблюдений на РСДБ. Каталог 608 внегалактических радиоисточников представляет собой одну из физических реализаций ICRS — Международную опорную небесную систему отсчета (*International Celestial Reference Frame — ICRF*).

IAU рекомендует, чтобы начало прямых восхождений небесной системы координат было близким к динамическому равноденствию J2000.0. Для этого начало системы отсчета прямых восхождений с 1998 г. по решению IAU было определено следующим образом. Из разных каталогов были выбраны 23 радиоисточника, среди которых был и квазар 3C273, и

вычислены средние значения прямого восхождения каждого из них. Затем координаты источников были исправлены таким образом, чтобы прямое восхождение квазара 3C273 было согласовано со значением в системе фундаментального каталога FK5 ($\alpha = 12^h 29^m 6,6997^s$; J2000.0), т. е. разница между этим значением и средним прямым восхождением 3C273 была добавлена к прямым восхождениям остальных 22 источников. При таком определении точка весеннего равноденствия уже не привязывается к эклиптике.

Новая система отсчета основывается на кинематическом принципе: считается, что оси системы остаются неподвижными относительно самых удаленных из известных объектов Вселенной [64, 96]. В соответствии с рекомендациями МАС полюс системы ICRS согласуется с полюсом FK5 в пределах ошибок последнего: $\sigma_{P_{FK5}} = 50$ мс дуги (рис. 3.1). Начало отсчета прямых восхождений системы ICRS близко к динамическому равноденствию J2000.0 и согласовано с системой FK5.

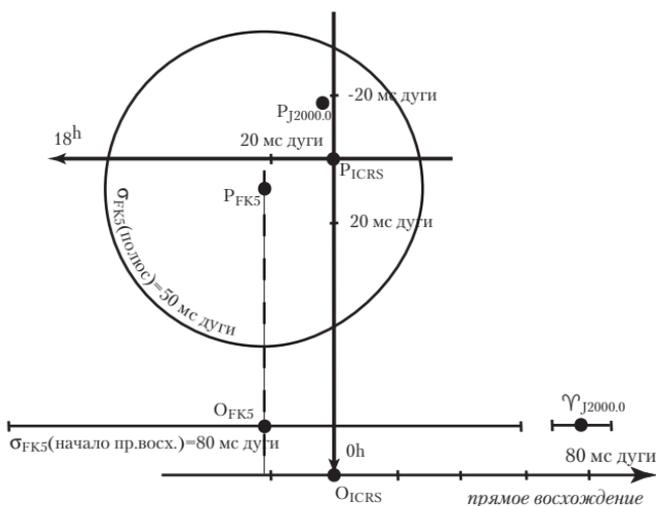


Рис. 3.1. Полюс ICRS (P_{ICRS}) и полюс FK5 (P_{FK5}), полюс $P_{J2000.0}$, начало прямых восхождений

Наблюдения на РСДБ также показали, что средний небесный экватор на эпоху J2000.0 не совпадает с экватором системы ICRS. Причиной этого являются ошибки в теории нутации МАС1980. В результате полюс $P_{J2000.0}$, соответствующий среднему экватору J2000.0, смещен относительно полюса ICRS (P_{ICRS}) (рис. 3.1). На этом рисунке также показан участок экватора с точками O_{FK5} , O_{ICRS} — началом прямых восхождений в системах FK5 и ICRS, а также точка динамического равноденствия $\Upsilon_{J2000.0}$.

ICRF представляет собой каталог 608 внегалактических радиоисточников, определенных по наблюдениям, сделанным в 1979–1995 годах [96]. Этот каталог включает в себя три группы источников:

- 212 наиболее компактных источников, которые наблюдались самое длительное время. Медианная точность положений каждого из источников составляет 0,25 мс дуги;
- 294 компактных источника, точность координат которых в будущем можно значительно улучшить за счет увеличения времени наблюдений;
- 102 источника, которые хуже, чем остальные, приспособлены для целей астрометрии, но которые необходимы для целей привязки ICRF к каталогам звезд.

Точность определения осей ICRF составляет 20 мкс дуги.

3.3. Стабильность центра яркости внегалактических радиоисточников

Одна из причин нестабильности опорной системы отсчета — изменение во времени угловых координат центров яркости внегалактических радиоисточников. Хотя причины вариаций яркости у радиоисточников и оптических источников (особенно галактических) разные, взаимное сравнение может помочь решению этой проблемы.

Основными причинами вариаций центра яркости внегалактических радиоисточников являются следующие [96]:

- влияние атмосферы Земли на распространение радиоволн. Недостаточность информации о количестве водяного пара в тропосфере, неравномерность распределения РСДБ-станций по поверхности Земли и необходимость наблюдения источников при больших зенитных углах вносят систематическую ошибку в координату δ порядка 500 мкс дуги;
- ни один из источников на самом деле не является точечным при наблюдении с угловым разрешением, составляющим несколько микросекунд дуги. Если радиоисточник является протяженным и несимметричным, то проекция базы интерферометра из-за вращения Земли на ось, соединяющую центр яркости с каждым из компонентов радиоисточника, меняется. Этот эффект может быть существенно уменьшен при получении карт распределения яркости в каждом из источников, что до сих пор не сделано. Этот эффект вносит систематическую ошибку в наблюдения порядка 200 мкс дуги.

Изучение второго эффекта [70] на примере 16 радиоисточников показало, что ошибки определения координат источников меняются от 36 мкс дуги для QSO0133+476 до 260 мкс дуги для QSO2234+282. Рассмотренные источники принадлежали либо к квазарам, либо к объектам типа BL Lac. Для стандартной космологической модели линейные расстояния до всех 16 объектов можно определить по красному смещению, а по величине угловой ошибки вычисления координат можно определить линейный размер области переменности излучения квазара или BL Lac. Наибольший пространственный размер у квазара QSO 0016+731 — 3,34 пк, а наименьший у квазара 3C28.07 — 0,42 пк. Размер переменности большинства радиоисточников из этого списка группируется вокруг значения 1 пк. Характер движения центра яркости мож-

но отнести к типу белого шума для 9 источников и к типу дробового шума для 7 источников.

Теперь рассмотрим эффект нестационарности пространства–времени в нашей Галактике и его вклад в нестабильность положений внегалактических источников на небе и, следовательно, нестабильность системы отсчета.

3.4. Отклонение света звезды в гравитационном поле других тел

Рассмотрим, как возникает отклонение луча света при его прохождении мимо массивного тела (звезды).

Хорошо известно, что свет проходит вблизи массивного тела по искривленной траектории. Вследствие этого, направление прихода света не совпадает с траекторией фотона, какой она была бы в отсутствии массивного тела. В результате истинное и видимое положения источника света не совпадают. Этот эффект называется *гравитационным линзированием*, или просто *линзированием*. Эти термины мы и будем использовать в дальнейшем изложении.

Стандартная модель линзирования основана на простой модели точечной гравитационной линзы. Поэтому, прежде чем обсуждать эффект линзирования, рассмотрим, что представляет собой гравитационная линза и каковы принципы образования изображений в такой системе. Далее мы будем считать, что линзой является тело со сферически-симметричным распределением плотности и, следовательно, со сферически-симметричным гравитационным полем. Отметим также, что в рассматриваемом нами случае отклонения фотонов от далеких источников звездами нашей Галактики можно пользоваться приближением сферически-симметричной линзы для большинства мыслимых ситуаций.

Фотоны, приходя из бесконечности, проходят мимо тяготеющего тела (гравитационной линзы), отклоняются на малый угол, и снова уходят на бесконечность. Рассмотрим сначала движение фотона в ньютоновской теории гравитации.

Будем рассматривать фотон как частицу, обладающую массой $m = h\nu/c^2$.

Пусть фотон проходит вблизи звезды, которая имеет массу M_* . Прицельное расстояние луча света, испущенного источником S , обозначим как p . В декартовой системе координат Oxy с началом O в центре масс звезды уравнение движения фотона имеет вид:

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = - \frac{GmM_*}{|\mathbf{r}|^3} \cdot \mathbf{r}. \quad (3.1)$$

Как видно из уравнения (3.1), эффект отклонения света имеет место уже в ньютоновской теории. Этот эффект был отмечен еще И. Ньютоном, однако впервые вывод выражения для угла отклонения луча света гравитирующим телом, аналогичный изложенному ниже, был опубликован Й. Зольднером в начале позапрошлого века.

Из анализа ньютоновских уравнений движения в гравитационном поле известно, что траектория пробной частицы представляет собой гиперболу, параболу или эллипс. Качественный критерий принадлежности траектории частицы к одному типу из этих трех кривых заключается в сравнении потенциальной энергии частицы в поле тела (в нашем случае $U = \frac{GM_* h\nu}{c^2 p}$) с ее кинетической энергией (в рассматриваемом случае $E = h\nu$). В нашем случае, когда пробная частица — фотон, критерием является отношение гравитационного потенциала тела к квадрату скорости света $\frac{GM_*}{c^2 p}$. Для большинства астрономических ситуаций такая величина значительно меньше единицы, и в этом случае траектория является гиперболой, так как кинетическая энергия частицы (фотона) значительно превышает ее потенциальную энергию.

Будем считать, что фотон движется вдоль оси Ox . Так как гравитационное поле сферически-симметрично, то траектория фотона лежит в плоскости, в которой мы определяем ось Oy , перпендикулярную Ox . Ниже нас будет интересовать, в основном, смещение луча вдоль координаты y . Так как свет

движется практически вдоль оси Ox , то в нулевом порядке по параметру $\frac{GM_*}{c^2 p}$ справедливо уравнение движения $x = ct$. Выразив t через x и подставив его в уравнение движения фотона (3.1), получаем неявную функцию $y(x)$, связывающую координаты x , y и вторую производную y -координаты по переменной x :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{GM_* y}{c^2 (x^2 + y^2)^{3/2}}. \quad (3.2)$$

Будем считать, что отклонение мало и, следовательно, положим в правой части уравнения (3.2) $y \approx p$. В этом случае от правой части уравнения (3.2) может быть вычислен аналитический интеграл. Отметим, что $\frac{dy}{dx}$ представляет собой касательную к траектории фотона, а разность величин $\frac{dy}{dx}$ на $+\infty$ и $-\infty$ равна углу отклонения фотона в поле тяжести звезды M_* :

$$\Delta\varphi = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=-\infty} - \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=+\infty} = -\frac{2GM_*}{c^2 p}. \quad (3.3)$$

Получившаяся величина равна половине правильного угла отклонения. Разница связана с тем, что мы использовали нерелятивистское приближение, тогда как фотон — релятивистская частица, которая движется с предельно возможной скоростью (скоростью света).

В ОТО в приближении слабого гравитационного поля угол отклонения света в поле ограниченного и стационарного распределения масс описывается формулой, отличающейся от (3.3) в два раза, т. е. угол отклонения равен:

$$\delta\varphi = -\frac{4GM_*}{c^2 p}. \quad (3.4)$$

Вывод знаменитой эйнштейновской формулы для отклонения лучей света в поле тяжести тела с массой M_* приводит практически во всех учебниках по ОТО и теории гравитации, например, в «Теории поля» [35].

Этот эффект был предсказан А. Эйнштейном в 1915 г. и впервые измерен А. Эддингтоном в 1919 г. для отклонения луча в гравитационном поле Солнца. Согласно теории, этот угол должен был составлять $1,75''$ вблизи поверхности Солнца, что и было подтверждено наблюдениями.

3.5. Эффект слабого микролинзирования

Идея гравитационной фокусировки света была высказана задолго до открытия первой гравитационной линзы. А. Эйнштейн, Г. Тихов, О. Хвольсон, Ф. Цвикки — вот неполный список физиков, предсказавших это явление в начале XX в. Необходимо также отметить авторов [92, 111], которые впервые дали последовательное изложение теории гравитационного линзирования и представили детальное теоретическое описание эффекта гравитационной линзы на сферически-симметричных телах. Это достаточно хорошее приближение в нашем случае, поскольку далее мы рассматриваем слабое линзирование на звездах нашей Галактики, которые имеют форму, достаточно близкую к форме шара.

Открытие первой гравитационной линзы относится к 1979 г., когда был обнаружен знаменитый двойной квазар QSO 0957+561 A, B. После этого и вплоть до наших дней открыты примерно 60 внегалактических линз, среди которых встречаются линзы с кратными изображениями, линзы, реализующие так называемое *кольцо Эйнштейна* и т.п. В начале 90-х годов прошлого века было открыто микролинзирование на звездах нашей Галактики [68, 54, 129].

В настоящее время существует несколько книг и обзоров, посвященных теоретическому описанию явления гравитационного линзирования [9, 21, 22, 45, 118]. Поскольку в нашу цель не входит описание гравитационного линзирования, и существует достаточно много хорошей литературы, посвященной этому вопросу, мы лишь кратко приведем основные принципы и формулы теории гравитационного линзирования и основные понятия слабого микролинзирования.

В предыдущем параграфе мы дали описание отклонения луча света в теории И. Ньютона и в теории А. Эйнштейна. Под термином *свет* ниже мы будем иметь ввиду электромагнитную волну любого диапазона, включая радиоволны и рентгеновские фотоны. Для нас важно только отклонение луча света от прямолинейного распространения, а угол отклонения не зависит от длины волны.

Свет, проходя мимо тела массой M , будет отклоняться на некоторый угол. Другой фотон от того же источника пройдет с другой стороны от той же массы и тоже отклонится на некоторый угол. Если источник находится достаточно далеко, то оба луча после прохождения тела с массой M сближаются, пока не пересекутся. Наблюдатель, находящийся в точке пересечения, вместо реального источника увидит два его изображения, поскольку эти два фотона приходят с разных направлений. Это и есть эффект гравитационной линзы в простейшем случае.

Получим уравнение гравитационной линзы. Чтобы упростить решение задачи, будем считать, что вдали от тела-линзы фотон движется по прямой линии. Если звезда находится в точке S , наблюдатель в точке O , то траектория фотона может быть представлена двумя прямыми линиями SB и BO , угол между которыми и показывает, насколько отклоняется свет в поле тяжести тела L (рис. 3.2). Видимое изображение звезды I_1 находится на линии BO .

В редких случаях наблюдатель может увидеть второе изображение I_2 , когда лучи от звезды пройдут по другую сторону тела L и попадут в точку O .

Введем следующие обозначения. Расстояние от звезды S до тела L обозначим как D_{SL} , расстояние от наблюдателя O до L — как D_L . Угол между направлением на тело L и истинным направлением на звезду S равен θ , между L и видимым изображением I_1 равен θ_1 . Угол α равен отклонению луча света в поле тяжести L . Из рис. 3.2 видно, что справедливы следующие соотношения между углами:

$$\alpha = \beta + \beta_1, \quad \theta_1 = \theta + \beta. \quad (3.5)$$

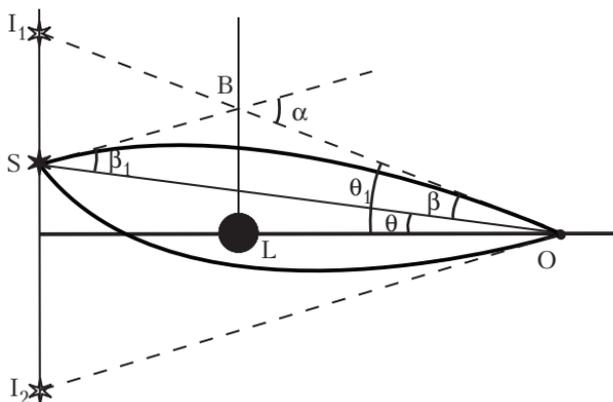


Рис. 3.2. Ход лучей света в гравитационном поле тела L от источника света S до наблюдателя O . Лучи света, двигаясь по искривленным траекториям вблизи массивного тела L , формируют два изображения реального источника I_1 и I_2 . Изображение I_2 слабое.

Из теоремы синусов следует, что $OB \sin \beta = SB \sin \beta_1$. Так как углы β, β_1 малы, то $\sin \beta \approx \beta, \sin \beta_1 \approx \beta_1$. Будем считать также, что угол θ мал, поэтому $SB \approx D_{SL}, OB \approx D_L$. Следовательно,

$$\beta D_L = \beta_1 D_{SL}.$$

Исключая из уравнения (3.5) переменную β и учитывая, что $\alpha = 4GM/c^2 r_0$ (3.4), где $r_0 \approx BL = D_L \operatorname{tg} \theta_1 \approx D_L \theta_1$, получим:

$$\theta_1 = \theta + \alpha - \beta_1 = \theta + \frac{4GM}{c^2 D_L \theta_1} - (\theta_1 - \theta) \frac{D_L}{D_{SL}}.$$

Из последнего выражения получаем квадратное уравнение относительно θ_1 , описывающее зависимость угла θ_1 от параметров тела L и положения звезды и наблюдателя относительно L :

$$\theta_1^2 - \theta \theta_1 - \theta_E^2 = 0, \quad (3.6)$$

где θ_E — размер конуса Эйнштейна, определяемый как

$$\theta_E^2 = \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{SL}}{(D_{SL} + D_L)D_L}.$$

Удобно выразить размер конуса Эйнштейна через параллаксы источника π_S и линзы π_L . Так как $D_{SL} = D_S - D_L$ (D_S — расстояние от наблюдателя до источника света), то

$$\begin{aligned} \theta_E^2 &= 2r_g \frac{D_S - D_L}{D_S D_L} \frac{M}{M_\odot} = \\ &= 2r_g \pi_L [\text{мс дуги}] \frac{206264.8'' \cdot 10^3}{1 \text{ а. е.}} \left(1 - \frac{\pi_S}{\pi_L}\right) \frac{M}{M_\odot}. \end{aligned}$$

Здесь величина r_g — гравитационный радиус Солнца. Подставляя значения констант, получим

$$\theta_E [\text{мс дуги}] \approx 2,85 \sqrt{\pi_L [\text{мс дуги}] \left(1 - \frac{\pi_S}{\pi_L}\right) \frac{M}{M_\odot}}.$$

Для Солнца размер конуса Эйнштейна при наблюдении звезд ($D_{SL} \gg 1$ астрономическая единица (а. е.)) равен примерно $40''$. Для звезд величина θ_E значительно меньше, и составляет несколько мс дуги.

Уравнение (3.6) называется уравнением гравитационной точечной сферически-симметричной линзы. Это уравнение имеет два действительных корня:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\theta^2 + 4\theta_E^2}, \\ \theta_2 &= \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\theta^2 + 4\theta_E^2}, \end{aligned} \tag{3.7}$$

соответствующих положениям двух изображений I_1 и I_2 фоновой звезды S .

Как было отмечено выше, изображение I_2 наблюдается не всегда. Поясним это важное обстоятельство более подробно. При выводе уравнения (3.6) предполагалось, что тело L имеет

бесконечно малые размеры. В действительности, если тело L имеет радиус R_L , и прицельный параметр одного из изображений меньше радиуса тела R_L (или $R_L > D_L \theta_2$), то изображение I_2 наблюдатель не увидит. Оно находится за диском тела L . Такая ситуация имеет место, когда гравитационной линзой является Солнце. Угловой диаметр Солнца равен примерно половине градуса, что значительно превышает размер конуса Эйнштейна Солнца на расстоянии 1 а. е. Для того, чтобы Солнце было линзой наблюдатель должен быть на расстоянии ≈ 550 а. е.

Если сферически-симметричная звезда проходит через конус Эйнштейна точечной гравитационной линзы, то ее изображение представляется в виде двух «лунных серпов», зеркально отраженных друг относительно друга. Их размеры и яркость будут разными, но суммарный блеск двух изображений больше блеска самой звезды в отсутствии линзы (см., например, [45, 22]). Это явление и было названо *микролинзированием*. Сама линза может быть невидимым темным телом, поэтому в настоящее время эффект микролинзирования является мощным инструментом для изучения природы темной материи Галактики, ее распределения в Галактике, поиска планетных систем у звезд и т.д.

Для регистрации события микролинзирования звезда должна пройти на расстоянии в несколько мс дуги от линзы. Современные оптические инструменты, установленные на Земле, не позволяют разрешить два изображения, разделенные таким малым угловым расстоянием, поэтому эффект микролинзирования наблюдается по изменению яркости звезды. Вероятность микролинзирования довольно мала. В настоящее время зарегистрировано лишь несколько сотен событий в направлении на Большое и Малое Магеллановы Облака и Галактический балдж.

Если звезда проходит на расстоянии, большем размера конуса Эйнштейна, то яркость изображения I_2 будет значительно меньше, чем яркость изображения I_1 , и оно может быть просто не видно в телескоп. Таким образом, мы приходим к

явлению *слабого микролинзирования*: наблюдается только одно, но смещенное изображение опорного источника, причем его смещение относительно истинного положения определяется параметрами линзы. Вероятность слабого микролинзирования значительно больше, чем вероятность обычного микролинзирования, однако величина смещения изображения составляет всего несколько мс дуги. Единственные средства, обеспечивающие в настоящее время такую точность позиционных наблюдений — это радиоинтерферометры со сверхдлинными базами. Вычисления показывают, что при прохождении линзы с массой порядка массы Солнца на расстоянии $\sim 0,1''$ от квазара его видимое изображение опишет на небесной сфере окружность диаметром ~ 2 мс дуги.

Пока этот эффект экспериментально не обнаружен, может быть по причине малого числа регулярно наблюдаемых радиоисточников. При реализации космического проекта GAIA и других, когда точность наблюдений достигнет десятка мкс дуги и число наблюдаемых объектов составит десятки или сотни тысяч, события слабого микролинзирования будут несомненно обнаружены.

Найдем изменение координат опорного источника в векторном виде. Рассмотрим сначала случай, когда отклонение света происходит в гравитационном поле Солнца.

На рис. 3.3 показана орбита Земли. Центр Земли находится в точке O , центр Солнца в точке L , S — истинное, I_1 — видимое положение звезды.

Определим следующие единичные векторы: s_0 , s' , s_\odot , которые направлены из центра Земли к звезде S , ее видимому положению I_1 и центру Солнца L соответственно.

Так как угол между векторами s_0 и s_\odot значительно превышает размер конуса Эйнштейна, то решение уравнения гравитационной линзы, соответствующее главному изображению I_1 звезды, можно записать в виде:

$$\theta_1 = \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\theta^2 + 4\theta_E^2} \approx \theta + \frac{\theta_E^2}{\theta}. \quad (3.8)$$

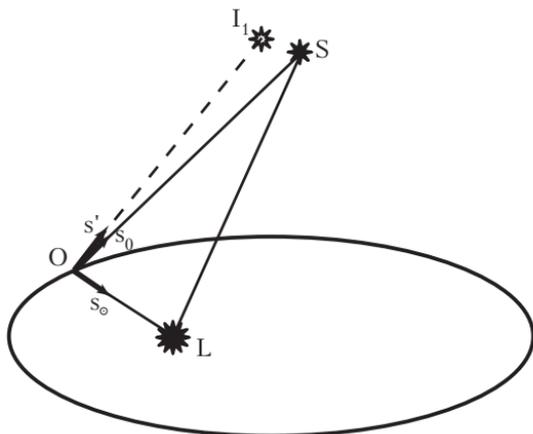


Рис. 3.3. Векторная диаграмма для вычисления отклонения света в гравитационном поле Солнца.

Обозначим разность двух векторов

$$\Delta \mathbf{s}' = \mathbf{s}' - \mathbf{s}_0.$$

Это вектор, который лежит в плоскости OSI_1 и примерно равен по величине отклонению луча света в гравитационном поле Солнца, т. е. $|\Delta \mathbf{s}'| = \theta_1 - \theta$. Если угол θ между направлениями на Солнце и звезду мал, то вектор $\Delta \mathbf{s} = \mathbf{s}_0 - \mathbf{s}_\odot$ также примерно равен по величине θ : $|\Delta \mathbf{s}| = \theta$. Определение векторов $\Delta \mathbf{s}'$ и $\Delta \mathbf{s}$ соответствует уравнениям (3.5) и (3.7), т. е. ситуации, когда видимое изображение звезды отстоит от линзы дальше реальной звезды.

Из уравнения (3.8) имеем

$$\mathbf{s}' - \mathbf{s}_0 = \Delta \mathbf{s} \frac{\theta_E^2}{|\Delta \mathbf{s}|^2}. \quad (3.9)$$

Умножим обе части уравнения (3.9) дважды векторно на \mathbf{s}_0 . Тогда

$$\mathbf{s}_0 \times (\mathbf{s}_0 \times \mathbf{s}') = \mathbf{s}_0 \times (\mathbf{s}_0 \times \Delta \mathbf{s}) \frac{\theta_E^2}{|\Delta \mathbf{s}|^2}.$$

Так как $|\Delta \mathbf{s}|^2 = 2(1 - \mathbf{s}_\odot \cdot \mathbf{s}_0)$ и $\theta_E^2 \approx 4GM/c^2 D_L$ ($D_{SL} \gg D_L$), получим:

$$\mathbf{s}_0(\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{s}') - \mathbf{s}' = -\frac{2GM}{c^2 D_L} \cdot \frac{\mathbf{s}_0 \times (\mathbf{s}_0 \times \mathbf{s}_\odot)}{1 - \mathbf{s}_\odot \cdot \mathbf{s}_0}.$$

Считая, что $\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{s}' \approx 1$, получим окончательное выражение:

$$\mathbf{s}' = \mathbf{s}_0 + \frac{2GM}{c^2 D_L} \cdot \frac{\mathbf{s}_0 \times (\mathbf{s}_0 \times \mathbf{s}_\odot)}{1 - \mathbf{s}_\odot \cdot \mathbf{s}_0}.$$

Выше мы получили формулы редукции к видимому положению звезды на небе, при условии, что положение звезды в каталоге (или истинное положение звезды \mathbf{s}_0) известно, а тяготеющим телом является Солнце.

Рассмотрим теперь изменение экваториальных координат звезды под действием гравитационного поля звезды (или темного тела), которая находится далеко от нашей Солнечной системы.

Для определения разницы между координатами видимого (α_a, δ_a) и истинного (α_t, δ_t) положения звезды воспользуемся уравнением (3.7) и рис. 3.4:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin(\alpha_a - \alpha_L)} = \frac{\cos \delta_L}{\sin \gamma}, \quad (3.10)$$

$$\frac{\sin(\theta_1 - \theta)}{\sin(\alpha_a - \alpha_t)} = \frac{\cos \delta_t}{\sin \gamma}, \quad (3.11)$$

где γ — позиционный угол дуги, соединяющий изображение I_1 и тело L с координатами α_L, δ_L .

Обозначив разность видимого и истинного прямого восхождения звезды как $\Delta\alpha = \alpha_a - \alpha_t$, (и аналогично разность склонений $\Delta\delta = \delta_a - \delta_t$) и воспользовавшись малостью угла $\Delta\alpha$, т. е. $\sin \Delta\alpha \approx \Delta\alpha$, получим из (3.11):

$$\sin \gamma = \Delta\alpha \frac{\cos \delta_t}{\sin(\theta_1 - \theta)}.$$

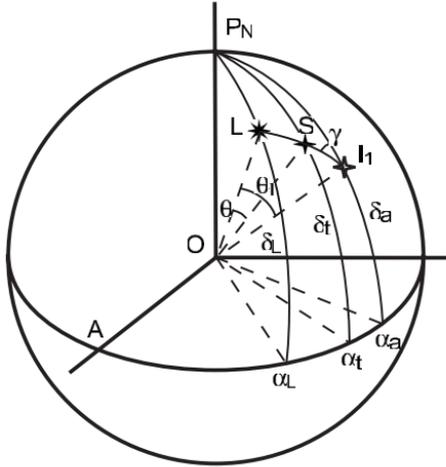


Рис. 3.4. Видимое и истинное положение звезды на небесной сфере.

Из (3.7) имеем $\theta_1 - \theta = \theta_E^2/\theta$. Подставляя значение $\sin \gamma$ в (3.10), получим

$$\Delta\alpha \approx \frac{\sin(\theta_E^2/\theta) \cos \delta_L}{\sin \theta_1 \cos \delta_a} \sin(\alpha_a - \alpha_L).$$

Если угол θ_1 мал, то $\sin \theta_1 \approx \theta_1$.

Так как $\theta_1 \approx \theta$ и $\sin(\theta_E^2/\theta)/\sin \theta_1 \approx (\theta_E/\theta)^2$, то получим:

$$\Delta\alpha \approx \left(\frac{\theta_E}{\theta}\right)^2 \frac{\cos \delta_L}{\cos \delta_a} \sin(\alpha_a - \alpha_L).$$

Смещение звезды по склонению получим, воспользовавшись следующими уравнениями сферической астрономии и рис. 3.4:

$$\sin \delta_t = \cos(\theta_1 - \theta) \sin \delta_a + \sin(\theta_1 - \theta) \cos \delta_a \cos \gamma,$$

$$\sin \delta_L = \cos \theta_1 \sin \delta_a + \sin \theta_1 \cos \delta_a \cos \gamma.$$

Из первого уравнения получим: $\cos(\theta_1 - \theta) \approx 1$, $\sin \delta_t - \sin \delta_a \approx -\cos \delta_a \Delta\delta$. Значит

$$\Delta\delta \approx -\frac{\theta_E^2}{\theta} \cos \gamma$$

и, выражая из второго уравнения $\cos \gamma$, находим

$$\Delta\delta = -\left(\frac{\theta_E}{\theta}\right)^2 \frac{\sin \delta_L - \cos \theta_1 \sin \delta_a}{\cos \delta_a},$$

где

$$\cos \theta_1 = \sin \delta_L \sin \delta_a + \cos \delta_L \cos \delta_a \cos(\alpha_a - \alpha_L).$$

Если невозмущенное угловое расстояние между реперным источником и линзой равно θ , то видимое положение источника сместится вдоль прямой, соединяющей источник и линзу в сторону, противоположную линзе. Угловое расстояние между видимым положением источника и линзы равно

$$\theta_1 = \frac{1}{2}\theta + \frac{1}{2}\sqrt{\theta^2 + 4\theta_E^2}. \quad (3.12)$$

В случае отсутствия звезды или появления звезды с пренебрежимо малой массой, когда $\theta_E = 0$, видимое положение источника совпадает с истинным: $\theta_1 = \theta$. В случае $\theta_E \neq 0$, эффект гравитационной линзы появляется, когда $\theta \leq \theta_E$.

Эффект слабого микролинзирования характеризуется следующим соотношением между размером конуса Эйнштейна и направлением на истинное положение звезды: $\theta \gg \theta_E$. В этом случае возникает разница между истинным и видимым положениями фонового источника S :

$$\delta\theta = \frac{\theta_E^2}{\theta},$$

Другими словами, видимое положение источника смещено от истинного в направлении, противоположном направлению на линзу, на величину $\delta\theta$.

Поскольку все звезды нашей Галактики (действуя как линзы) обладают собственным движением, то угловой прицельный параметр θ является функцией времени, и видимое по-

ложение реперного источника может быть достаточно хорошо описано функцией вида:

$$\delta\theta = \frac{\theta_E^2}{\sqrt{\theta_0^2 + \mu^2 t^2}},$$

где θ_0 — минимальное угловое расстояние линзы относительно источника, μ — взаимная угловая скорость движения линзы и источника по небесной сфере, а время t отсчитывается от момента максимального сближения.

3.6. Изменения координат опорных квазаров

В этом разделе эффект слабого гравитационного линзирования будем называть иногда эффектом *гравитационной рефракции*. Этот термин более привычен для астрометрии. Для проверки эффекта гравитационной рефракции можно, например, использовать каталог радиоисточников, опубликованный МСВЗ в 1997 г. [64]. Точные координаты этих радиоисточников определяют опорную небесную систему отсчета (ICRF). Стабильность системы основана на предположении о том, что собственные движения источников пренебрежимо малы. В действительности некоторые источники могут иметь структуру на субмиллисекундном уровне разрешения. Изменения яркости внутренней структуры этих источников, как говорилось выше, могут вызывать смещение эффективного центра яркости, что может быть интерпретировано как возмущения положений этих источников. Некоторое количество объектов из списка опорных объектов имеют такие смещения [84, 77], достигающие десятков мс дуги.

В отличие от указанного эффекта гравитационная рефракция ведет к изменению координат всех источников, в том числе и точечных, со временем и, следовательно, к малому медленному вращению системы координат.

Каталог опорных радиоисточников включает в себя 608 объектов (квазаров), равномерно распределенных по небу меж-

ду склонениями -85° и $+85^\circ$. Неопределенности координат находятся в пределах $50 \div 2000$ мкс дуги.

Ниже мы будем рассматривать гравитационную рефракцию не от популяции невидимых тел, открытых в экспериментах MACHO и EROS, а только от видимых звезд нашей Галактики.

Для поиска звёзд — соседей квазаров был использован Guide Star Catalog. Было найдено 313 звёзд, отстоящих не более чем на $2'$ от выбранных квазаров. Полное число таких квазаров — 170. В кружке с радиусом $1'$ уже только 73 квазара имеют 86 звезд-соседей. Для подавляющего большинства звезд неизвестны никакие характеристики, которые позволили бы определять их массы и расстояния до них. Поскольку все звезды яркие, то предполагалось, что они достаточно массивные: их масса считалась порядка $10M_\odot$, а расстояние равнялось в среднем 300 пк.

Вектор, описывающий вращение системы координат, задан в виде $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$. Этот вектор определял вращение системы координат согласно уравнению:

$$\mathbf{r}'_i = \begin{pmatrix} 1 & -\theta_3 & \theta_2 \\ \theta_3 & 1 & -\theta_1 \\ -\theta_2 & \theta_1 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{r}_i,$$

где $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}'_i$ — барицентрические радиус-векторы i -го источника до и после отклонения света. Было найдено, что $\Theta = (-0.03, 2.83, 3.83)$ мкс дуги.

Наибольший эффект был найден для нескольких источников, перечисленных в таблице 3.1. Первая строчка содержит название источника (квазара), его прямое восхождение и склонение, а также измеренные неопределенности координат, вторая строчка содержит звездную величину и координаты звезды, в третьей строчке представлено угловое расстояние между квазаром и звездой-линзой (в секундах дуги) и расчетное изменение координат квазара (в мкс дуги).

Таблица 3.1. Координаты квазаров и звезд
и величина эффекта рефракции

Источник/ ве- личина/ рассто- яние (")	Прямое восхождение <i>h m s</i>	Склонение <i>° ' "</i>	Неопределенность	
			<i>s</i>	<i>"</i>
0007+106 14.7 0.358	0 10 31.005871 0 10 31.01 $\nu_{\alpha} = -21.1$	10 58 29.50408 10 58 29.9 $\nu_{\delta} = -116.8$	0.000018	0.00042
0111+021 13.8 0.509	1 13 43.144949 1 13 43.13 $\nu_{\alpha} = 43.8$	2 22 17.31639 2 22 17.8 $\nu_{\delta} = -71.1$	0.000014	0.00038
0735+178 4.3 0.284	7 38 7.393743 7 38 7.37 $\nu_{\alpha} = 156.1$	17 42 18.99868 17 42 19.0 $\nu_{\delta} = 16.2$	0.000003	0.00005
0912+297 15.3 0.496	9 15 52.401619 9 15 52.40 $\nu_{\alpha} = -9.6$	29 33 24.04293 29 33 23.5 $\nu_{\delta} = 85.3$	0.000017	0.00034
1101+384 12.8 0.054	11 4 27.313911 11 4 27.31 $\nu_{\alpha} = -412.8$	38 12 31.79962 38 12 31.8 $\nu_{\delta} = -706.3$	0.000026	0.00038
1302-102 14.8 0.812	13 5 33.015008 13 5 32.98 $\nu_{\alpha} = 33.3$	-10 33 19.42722 -10 33 20.1 $\nu_{\delta} = 40.9$	0.000018	0.00021
1514-241 13.3 0.536	15 17 41.813132 15 17 41.84 $\nu_{\alpha} = -64.2$	-24 22 19.47552 -24 22 19.8 $\nu_{\delta} = 53.6$	0.000019	0.00031

Две яркие звезды были найдены в каталоге HIPPARCOS (таблица 3.2). Собственное движение, тригонометрические параллаксы этих звезд, а также их спектральные классы известны (таблица 3.3). Таким образом, оказывается возможным определить массы и расстояния до звезд. Изменения координат звезд ведут к изменениям угловых расстояний до квазаров и, как следствие, к значимому эффекту гравитационной рефракции координат квазаров.

Таблица 3.2. Координаты квазаров и звезд каталога HIPPARCOS

Источник/ номер	Прямое восхождение <i>h m s</i>	Склонение <i>° ' "</i>	Неопределенность	
			<i>s</i>	<i>"</i>
0459-753	4 58 17.945614	-75 16 37.95439	0.000923	0.00315
23106	4 58 17.95	-75 16 38.0	0.56	0.60
1213-172	12 15 46.751743	-17 31 45.40314	0.000043	0.00041
59803	12 15 48.47	-17 32 31.1	0.63	0.49

Таблица 3.3. Характеристики звезд из каталога HIPPARCOS

Номер	Вели- чина	Расстояние (J2000.0) (сек дуги)	μ_α	μ_δ	π мс дуги	Класс
			мс дуги/год			
23106	9.3	0.048	-4.00 ± 0.57	-2.55 ± 0.60	3.43 ± 0.61	<i>K1IIIp</i>
59803	2.6	51.88	-159.58 ± 0.81	22.31 ± 0.54	19.78 ± 0.81	<i>B8III</i>

Для квазара QSO 0459–753 за период 1980–1996 гг., когда велись высокоточные наблюдения, рассчитанные координаты квазара изменились на 0.3 мс дуги. Можно с большой достоверностью утверждать, что большие неопределенности координат этого квазара, сообщенные МСВЗ, связаны с реальным движением звезды-линзы и эффектом гравитационной рефракции. Так как координаты квазара зависят от положения и массы звезды, вызывающей гравитационную рефракцию, и известны с высокой точностью, то они могут быть использованы для уточнения параметров звезды, вызывающей эффект слабого микролинзирования.

Аналогичное явление имеется и для квазара QSO 1213–172. Эффект гравитационной рефракции значительно слабее из-за большего углового расстояния, несмотря на то, что звезда значительно ближе к Солнцу (расстояние 50 пк), а масса приблизительно составляет $10M_\odot$.

3.7. Проблема измерения параллаксов при учете эффекта слабого микролинзирования

Особенно ценную астрономическую информацию дают наблюдения, проведенные двумя наблюдателями одновременно (или одним наблюдателем в разные моменты времени) из разных точек пространства. Такие наблюдения позволяют измерить параллакс источника и определить расстояние до него, что приводит к важным выводам для одного из основных вопросов астрономии об определении шкалы расстояний. Точность расстояний, определенных на основе фотометрических параллаксов, явно недостаточна на современном уровне развития астрономии. Определение же параллаксов прямым тригонометрическим методом, проведенное для большинства астрономических источников, может существенно изменить шкалу расстояний. Это, в свою очередь, может привести к серьезному пересмотру некоторых результатов астрономии.

Измерения тригонометрических параллаксов в астрометрии реализуются согласно следующим принципам: два телескопа, разнесенные на некоторое расстояние, называемое базой B , наблюдают один и тот же космический объект. Обычно эти наблюдения проводятся одним телескопом, но в разные моменты времени. Если промежуток времени равен половине года, то Земля смещается по своей орбите на 2 а. е., т. е. длина базы равняется этой величине. Естественно, что направление на объект наблюдения из двух точек пространства будет различным. Разность направлений — это параллактическое смещение объекта. Тригонометрическим параллаксом источника π называется отношение:

$$\pi = \frac{B}{R}, \quad (3.13)$$

где R — расстояние до источника, $B = 1$ а. е. и угол между направлениями на барицентр Солнечной системы и источник равен 90° .

Таким образом, определение параллакса эквивалентно определению расстояния до звезды. Совместно с измерениями координат звезд на небесной сфере, это дает трехмерную картину распределения звезд в пространстве. Поэтому тригонометрический параллакс является одним из важнейших астрономических параметров. С одной стороны, он связан с расстоянием до звезды, с другой стороны, с определением параллакса тесно связан вопрос установления единицы измерения расстояний во Вселенной. Если B равно 1 а. е., то расстояние до звезды, равное 1 пк, соответствует параллаксу π равному $1''$:

$$1 \text{ пк} = 206264, 8 \text{ а. е.} = 3, 0857 \cdot 10^{13} \text{ км} = 3, 2616 \text{ св. лет.}$$

Парсек является одной из основных единиц измерения расстояний во Вселенной.

Соответственно, параллакс равный 1 мкс дуги означает, что расстояние до источника света составляет один Мпк, что примерно в два раза больше расстояния до одного из ближайших внегалактических объектов — галактики Андромеды. Измерение расстояний до более далеких внегалактических объектов предполагает измерения очень малых углов, для реализации которых необходимы базы больших размеров и предельная точность.

Необходимо сразу упомянуть, что явления, связанные со случайной нестационарностью пространства-времени в нашей Галактике, будут влиять на измерение параллаксов. Поскольку массы и скорости звезд, вызывающих нестационарность пространства-времени, в большинстве случаев неизвестны, то восстановить правильные значения параллаксов не представляется возможным. Таким образом, указанная неопределенность также накладывает верхний предел на возможности измерений параллаксов.

В частности, искажения параллаксов могут быть столь велики, что видимое значение параллакса будет отрицательным. До сих пор отрицательные значения параллаксов ассоциировались с ошибками измерений. Теперь необходимо признать,

что отрицательные значения параллаксов могут быть вызваны реальным физическим явлением.

3.8. Позиционные измерения из барицентра Солнечной системы

Для вывода формул, описывающих изменение величины измеряемого параллакса при наличии гравитационной линзы, необходимо рассмотреть уравнение движения лучей света в гравитационном поле. Как уже было сказано выше, мы рассматриваем эффект слабого микролинзирования. Следовательно, мы видим только одно изображение источника, которое будет несколько смещено по отношению к истинному положению. Для него же будет наблюдаться и параллактическое смещение. В качестве линзы будет приниматься одна из звезд нашей Галактики. Это самый интересный случай, поскольку нестационарное поле Галактики, сформированное отдельными звездами, представляет собой совокупность гравитационных полей, каждое из которых с хорошей точностью является сферически-симметричным.

В качестве источника фотонов может быть выбран удаленный объект (находящийся вне пределов Галактики) независимо от диапазона электромагнитных волн, в котором наблюдается этот источник.

В отличие от наблюдения источника из одного положения, когда задачу построения траектории лучей света можно рассматривать в плоскости, здесь возникает пространственная задача. Поскольку наблюдения проводятся минимум из двух точек пространства, то эти точки — источник света и линза — могут не лежать в одной плоскости.

Будем считать, что начало системы координат расположено в барицентре Солнечной системы. Три тела: источник света S , линза L , а также один из наблюдателей J определяют плоскость, которую можно назвать «плоскостью наблюдателя» и обозначить PL_J . Здесь индекс J показывает, что плоскость образована при учете J -того наблюдателя (рис. 3.5). Тела S ,

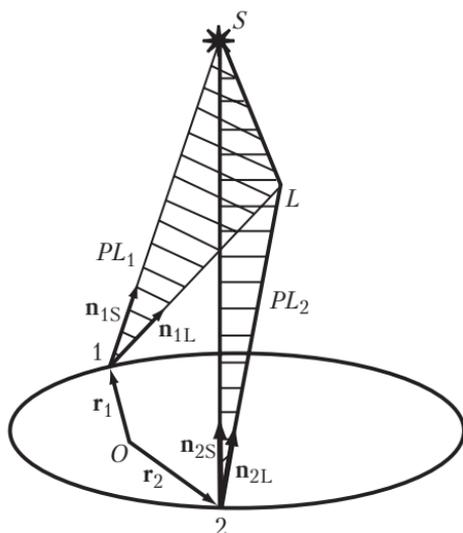


Рис. 3.5. На рисунке изображено положение источника света S , гравитационной линзы L , а также положения наблюдателей. Бариецентрической системы обозначен буквой O , наблюдатели 1 и 2 находятся на некоторой кривой (в данном случае, на земной орбите). Два вектора, проведенных от наблюдателя 1 к источнику S и линзе L формируют плоскость PL_1 , в которой движется луч света от S к наблюдателю 1. Луч света не покидает этой плоскости даже при учете кривизны пространства-времени. Направления от наблюдателя 1 на источник и на линзу определяются двумя единичными векторами, соответственно \mathbf{n}_{1S} и \mathbf{n}_{1L} . Оба вектора зависят от времени, поскольку наблюдатель, источник света и линза находятся в движении. Аналогично два единичных вектора \mathbf{n}_{2S} и \mathbf{n}_{2L} , проведенные от наблюдателя 2 к источнику света S и гравитационной линзе L соответственно, образуют плоскость PL_2 . Луч от S к наблюдателю 2 движется в этой плоскости.

L и другой наблюдатель определяют вторую плоскость. Считается, что скорость собственного движения тел S , L , а также каждого из наблюдателей J значительно меньше скорости света. Как и в обзоре [22], траектории фотонов, искривленные под действием гравитационной линзы, аппроксимируются ло-

маными линиями, что и дает возможность говорить о плоскостях наблюдателей, в которых распространяются фотоны. Помимо этого, выбор двух плоскостей обусловлен еще и необходимостью правильного учета изменения величины разности углов между направлением на линзу и видимым положением источника.

Необходимость введения плоскости PL_J определяется тем, что основные векторы задачи, а также траектория фотона света, лежат в этой плоскости. Естественно предположить, что траектории фотонов, приходящих к различным наблюдателям, должны принадлежать разным плоскостям.

Введем следующие векторные обозначения: вектор из начала координат к источнику света S обозначается как $\mathbf{r}_S(t)$, вектор, проведенный из начала координат к линзе, как $\mathbf{r}_L(t)$, где t — время. Аналогично определяются вектора, направленные к каждому из наблюдателей: $\mathbf{r}_J(t)$.

Главной нашей задачей является вывод уравнения, описывающего изменение единичных векторов, направленных из точек расположения наблюдателей к источнику, в зависимости от характеристик линзы, а также от положений и скоростей тел [115].

Единичные векторы будем обозначать как \mathbf{n}_{JS} и \mathbf{n}_{JL} . Индекс $J = 1, 2$ обозначает номер наблюдателя, а индексы S и L обозначают направление на источник S и линзу L . Так, \mathbf{n}_{JS} является единичным вектором, проведенным из позиции наблюдателя J в направлении источника света S . Следует отметить, что единичные векторы совпадают по направлению с соответствующими радиус-векторами. Так, вектор \mathbf{n}_{JS} совпадает по направлению с вектором \mathbf{r}_{JS} и т.д.

Обозначим абсолютные величины векторов: $r_{JS} \equiv |\mathbf{r}_{JS}|$.

Разность двух векторов \mathbf{n}_{JS} и \mathbf{n}_{JL}

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{n}_{JS} - \mathbf{n}_{JL} \quad (3.14)$$

является вектором, который также принадлежит плоскости PL_J и по абсолютной величине приблизительно равен разности углов направлений на S и L . После выделения плоскости

задача снова сводится к тривиальному уравнению для углов [115]. В данной ситуации разность углов между направлением на линзу и направлением на истинное положение источника света является неизвестной величиной в квадратном уравнении для положений изображения источника. Его решением будут два корня θ_i , что соответствует двум положениям изображений источника. Дальнейшее рассмотрение будет обращено исключительно на рассмотрение одного, главного изображения.

Стоит отметить еще один немаловажный момент. Нельзя забывать о том, что гравитационное поле линзы может быть нестационарным. В принципе, это могло бы серьезно повлиять на величину эффекта, поскольку порядок величин сравним. В работе [87] анализировалась нестационарная ситуация, когда учитывается влияние движения линзы на движение лучей света. Результаты этой работы показали, что в данной ситуации влиянием нестационарности гравитационного поля линзы можно пренебречь.

Решение уравнения для главного положения изображения было найдено выше (3.12). Полезно построить положение линзы, источника и изображения на картинной плоскости (рис. 3.6). Построение осуществляется следующим образом. Через положение линзы и истинное положение источника проводится прямая линия. Затем определяется вектор, начало которого совпадает с линзой L , а конец с положением источника S на картинной плоскости. Длина этого вектора равна θ . Для определения положения изображения этот вектор продолжается в том же направлении, вплоть до длины θ_i . Получившийся вектор является двумерным вектором, определяющим положение изображения.

После указанного построения можно отождествить введенный выше вектор θ с вектором, соединяющим на картинной плоскости положения L и S . Вектор, проведенный от L к изображению I , обозначается θ_I и называется вектором углового прицельного расстояния $\theta \equiv |\theta|$. Исходя из (3.12), урав-

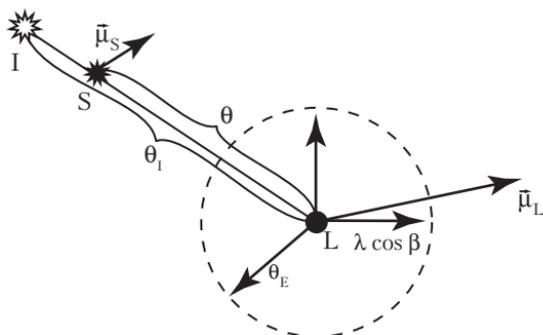


Рис. 3.6. На рисунке изображено положение источника S и линзы L в картинной плоскости. Вокруг линзы L пунктиром изображен конус Эйнштейна, который имеет угловой размер θ_E . Оси небесной системы координат изображены двумя перпендикулярными стрелочками, одна из которых отмечена как $\lambda \cos \beta$, где β — широта (координаты указаны так для того, чтобы приблизить сферические координаты к прямоугольным). Вектор угловой скорости μ_L указывает направление движения линзы. Вектор μ_S показывает направление движения источника S . Вектор, соединяющий линзу L и источник S в тексте обозначается как $\Delta \mathbf{n}_J$.

нение, описывающее связь вектора положения и вектора изображения, будет иметь вид:

$$\theta_I \simeq \theta + \theta \left(\frac{\theta_E}{|\theta|} \right)^2. \quad (3.15)$$

Видимое положение источника относительно истинного направления \mathbf{n}_{JS} выражается в виде:

$$\mathbf{n}_{JI} = \mathbf{n}_{JS} + \theta \left(\frac{\theta_E}{\theta} \right)^2. \quad (3.16)$$

Уравнение (3.16) определяет единичный вектор, проведенный от J -го наблюдателя к изображению источника, сдвинутого за счет влияния слабого гравитационного микролинзирования. Все величины, входящие в уравнение (3.16), вообще говоря, зависят от времени. Это же уравнение представля-

ет собой уравнение для редукции наблюдений. Если положение и движение линзы L известны, то, используя уравнение редукции (3.16), можно привести видимые координаты источника света к истинным. Однако, как уже было написано выше, чаще всего это сделать нельзя.

Рассмотрим теперь зависимость \mathbf{n}_{JI} от времени.

Источник света S , линза L и наблюдатель O обладают пекулярным движением. Условия задачи позволяют считать движение источника и линзы прямолинейным и равномерным. Считается также, что центр данной системы координат (точка O) совпадает с барицентром Солнечной системы, так что скорость наблюдателя относительно выбранной системы координат состоит только из скорости движения вокруг барицентра.

Пусть вектор трехмерной скорости источника относительно выбранной системы координат есть \mathbf{v}_S , а скорость линзы есть \mathbf{v}_L . Будем считать, что обе эти величины постоянны, и разложим трехмерную скорость на продольную и поперечную компоненты. Продольная компонента скорости изменяет основные физические параметры рассмотренной картины, такие, например, как размер конуса Эйнштейна. Однако это влияние мало и для решения данной задачи им можно пренебречь. Поперечные компоненты всех трех движений складываются, приводя к взаимному движению источника S и линзы L в картинной плоскости наблюдателя.

Поскольку скорости тел постоянны, а скорость наблюдателя относительно барицентра задана, то можно вычислить закон изменения векторов \mathbf{n}_{JS} , \mathbf{n}_{JL} и других векторов, необходимых для решения основной задачи — вычисления траектории движения изображения при учете параллактического движения наблюдателя. Для этого представим единичный вектор \mathbf{n}_{JS} в виде суммы трех векторов:

$$\mathbf{n}_{JS}(t) = \mathbf{n}_{S0} + \boldsymbol{\mu}_S t - \boldsymbol{\beta}_{JS}(t), \quad (3.17)$$

причем \mathbf{n}_{S0} направлен из точки O к источнику S в начальный момент времени $t = 0$, $\boldsymbol{\mu}_S$ — вектор угловой скорости смеще-

ния источника и β_{JS} — вектор параллактического смещения источника.

Необходимо также отметить, что, как вектор μ_S , так и вектор β_{JS} , являются перпендикулярными к вектору \mathbf{n}_{S0} .

Здесь мы ввели два новых вектора, первый из которых

$$\mu_S = \frac{\mathbf{v}_S}{r_{S0}} - \mathbf{n}_{S0} \frac{(\mathbf{n}_{S0}\mathbf{v}_S)}{r_{S0}},$$

имеет размерность сек^{-1} и совпадает с собственной угловой скоростью перемещения источника по небу. Второй, равный

$$\beta_{JS} = \frac{\mathbf{r}_J(t)}{r_{S0}} - \mathbf{n}_{S0} \frac{(\mathbf{n}_{S0}\mathbf{r}_J)}{r_{S0}},$$

далее будет называться вектором параллактического смещения.

Необходимо также отметить, что для астрономических источников вектор μ_S по абсолютной величине является малым: $|\mu| \sim 10^{-11} \text{ сек}^{-1}$ для самых быстрых и близких объектов и $|\mu| \sim 10^{-20} \text{ сек}^{-1}$ для объектов, расположенных на космологических расстояниях.

Аналогично можно вычислить единичный вектор, направленный от наблюдателя к линзе:

$$\mathbf{n}_{JL}(t) = \mathbf{n}_{L0} + \mu_L t - \beta_{JL}(t),$$

причем угловая скорость линзы определяется посредством вектора \mathbf{n}_{L0} :

$$\mu_L = \frac{\mathbf{v}_L}{r_{L0}} - \mathbf{n}_{L0} \frac{(\mathbf{n}_{L0}\mathbf{v}_L)}{r_{L0}},$$

а вектор параллактического смещения удовлетворяет уравнению:

$$\beta_{JL} = \frac{\mathbf{r}_J(t)}{r_{L0}} - \mathbf{n}_{L0} \frac{(\mathbf{n}_{L0}\mathbf{r}_J)}{r_{L0}}.$$

Здесь индекс L обозначает соответствующие вектора для линзы.

Вектор β_{JL} имеет такой же смысл, как и вектор β_{JS} , проведённый от наблюдателя к источнику.

Помимо определения $\mathbf{n}_{JS}(t)$ как функции времени, необходимо вычислить также зависимость от времени взаимного углового расположения источника S и линзы L , которое определяется вектором $\boldsymbol{\theta}$. Для этого необходимо вычислить единичный вектор от наблюдателя к линзе в том же виде:

$$\mathbf{n}_{JL}(t) = \mathbf{n}_{L0} + \boldsymbol{\mu}_L t - \boldsymbol{\beta}_{JL}(t). \quad (3.18)$$

Вектор \mathbf{n}_{L0} является единичным вектором, направленным из точки O к линзе L в начальный момент времени, $\boldsymbol{\mu}_L$ — вектор угловой скорости линзы и $\boldsymbol{\beta}_{JL}$ — вектор параллактического смещения линзы.

На основе полученных уравнений получим следующее выражение для вектора, соединяющего источник S и линзу L в картинной плоскости в зависимости от времени:

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \boldsymbol{\theta}_0 + \boldsymbol{\mu} t - \delta\boldsymbol{\beta}(t). \quad (3.19)$$

Здесь $\boldsymbol{\theta}_0 = \mathbf{n}_{S0} - \mathbf{n}_{L0}$ — разность положений источника S и линзы L в начальный момент времени, $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_S - \boldsymbol{\mu}_L$ — разность угловых скоростей источника и линзы и $\delta\boldsymbol{\beta}(t) = \boldsymbol{\beta}_{JS}(t) - \boldsymbol{\beta}_{JL}(t)$ — разность параллактических векторов. Необходимо отметить, что величина $\delta\boldsymbol{\beta}$ имеет тот же порядок малости, что и $\boldsymbol{\beta}_{JL}$.

Окончательное уравнение для положения изображения источника будет иметь вид:

$$\mathbf{n}_{JI} = \mathbf{n}_{S0} + \boldsymbol{\mu}_S t - \boldsymbol{\beta}_{JS}(t) + (\boldsymbol{\theta}_0 + \boldsymbol{\mu} t - \delta\boldsymbol{\beta}_J) \cdot \frac{\theta_E^2}{\theta^2(t)}.$$

3.9. Позиционные измерения из двух положений

3.9.1. Измерения из двух точек орбиты

Говоря об измерении параллакса, необходимо отметить, что при наличии слабого микролинзирования данный эффект нельзя рассматривать, исходя из определения параллакса в

евклидовой геометрии. Вообще говоря, меняется само определение параллакса. При определении параллакса необходимо принимать во внимание тот факт, что сама величина параллактического смещения будет зависеть от эффекта слабого микролинзирования. Ниже будет показано, что гравитационная линза даже с небольшой массой при некоторой специальной геометрии задачи приведет к весьма существенным искажениям в положении источника и, следовательно, искажению параллакса.

Измерения параллакса осуществляются несколькими способами [27, 40, 65, 72]. Здесь мы рассмотрим измерения двух типов. Первый — это измерения интерферометрического типа, проводимые наблюдателями, которые находятся на разных концах жесткой базы. Второй тип — наблюдение параллактического движения источника S одним наблюдателем, который находится на движущейся Земле. В евклидовом пространстве теорию таких наблюдений можно найти в учебниках по астрометрии [27]. В присутствии эффекта слабого микролинзирования в этой задаче возникает особенность. Плоскость PL_J движется в пространстве. Основной причиной этого является то, что наблюдатель совершает движение вокруг барицентра Солнечной системы. Таким образом, изображение источника совершает сложное видимое движение, существенно отличное от простого параллактического движения.

При подобных измерениях, особенно во втором случае, важно, как именно взаимно ориентированы база и картинная плоскость. От этого зависит дуга θ_i , что и приводит к необходимости определять положение изображения через двумерный вектор. Это позволяет правильно учесть изменение дуги θ_i при переходе от плоскости первого наблюдателя к плоскости второго наблюдателя.

Определим вектор, направленный из одной точки наблюдения в другую, который назовем вектором базы \mathbf{B} . Вектор базы является, в общем случае, функцией времени. Единичный вектор, совпадающий с направлением вектора базы, равен:

$$\mathbf{n}_b = \frac{\mathbf{B}}{B}.$$

При измерении тригонометрических параллаксов база ориентирована таким образом, что один из ее концов, скажем первый, должен быть перпендикулярен направлению на изображение источника, задаваемым вектором \mathbf{n}_{1I} :

$$(\mathbf{n}_{1I} \cdot \mathbf{n}_b) = 0. \quad (3.20)$$

Теперь параллакс определяется как угол, под которым видна база из источника (3.13).

Получим основные уравнения, описывающие наблюдения из двух точек, разнесенных в пространстве, при наличии эффекта слабого микролинзирования. Положение второго наблюдателя отличается от положения первого на вектор \mathbf{B} . Фотоны, вообще говоря, приходят к нему в момент времени, отличающийся от $t = t_1$ на задержку, примерно равную $\frac{B}{c}$. Строго говоря, необходимо вычислять положение источника и линзы на момент времени $t_2 \sim t_1 + B/c$. Однако эта задержка мала, и ей можно пренебречь из-за малости собственных движений источника и линзы.

В этом случае вектор истинного направления на источник \mathbf{n}_{2S} для второго наблюдателя относительно первого наблюдателя \mathbf{n}_{1S} есть

$$\mathbf{n}_{2S}(t) = \mathbf{n}_{1S}(t) - \frac{B}{r_{SO}} \mathbf{b}, \quad (3.21)$$

где

$$\mathbf{b} = \mathbf{n}_b - \mathbf{n}_{SO}(\mathbf{n}_{SO} \cdot \mathbf{n}_b). \quad (3.22)$$

Аналогичное уравнение можно написать для векторов, соединяющих наблюдателя и линзу, а также для единичных векторов в направлении линзы:

$$\mathbf{n}_{2L}(t) = \mathbf{n}_{1L}(t) - \frac{B}{r_{LO}} \mathbf{b}.$$

Окончательное уравнение для вектора в направлении на изображение источника с позиции второго наблюдателя будет иметь вид:

$$\mathbf{n}_{2I} = \mathbf{n}_{2S} + \theta \left(\frac{\theta_E}{\theta} \right)^2. \quad (3.23)$$

Аналогичное уравнение можно получить для первого наблюдателя заменой индекса 2 на индекс 1.

Вектора в направлении истинного положения источника зависят от времени и имеют вид:

$$\mathbf{n}_{1S} = \mathbf{n}_{SO} + \mu_S t, \quad (3.24)$$

$$\mathbf{n}_{2S} = \mathbf{n}_{SO} + \mu_S t - \frac{B}{r_{SO}} \mathbf{b} \quad (3.25)$$

и отличаются только на параллактический вектор $p_S \mathbf{b}$.

Если в качестве начала наблюдения выбрать момент времени $t = 0$, а начала координат — точку, совпадающую с первым наблюдателем, то $\mathbf{n}_{1S} = \mathbf{n}_{SO}$. В евклидовой геометрии направление на изображение является истинным направлением на источник, поэтому условие перпендикулярности (3.20) переформулируется как

$$(\mathbf{n}_{SO} \cdot \mathbf{n}_b) = 0. \quad (3.26)$$

Видимое значение параллакса определяется как скалярное произведение вектора, направленного на изображение с позиции второго наблюдателя \mathbf{n}_{2I} , и вектора \mathbf{n}_b , взятое с обратным знаком. Это определение эквивалентно определению параллакса в евклидовой астрометрии:

$$p_a = -(\mathbf{n}_{2I} \cdot \mathbf{n}_b). \quad (3.27)$$

Угол между вектором базы \mathbf{n}_b и вектором углового прицельного параметра θ равен

$$\frac{(\theta \cdot \mathbf{n}_b)}{|\theta|} = \cos \psi. \quad (3.28)$$

Тогда измеряемое значение параллакса согласно (3.27) будет равно:

$$p_a = p_S + (p_L - p_S) \frac{\theta_E^2}{|\theta|^2} \cos 2\psi. \quad (3.29)$$

Рассмотрим следующий пример. Пусть источник находится на расстоянии, сравнимом с расстоянием до горизонта частиц нашей Вселенной, т. е. $p_S = 10^{-9}$ секунды дуги а линза находится в Галактике на расстоянии один кпк, т. е. $p_L = 1$ мс дуги. Пусть масса звезды линзы составляет $12,5M_\odot$, так что размер конуса Эйнштейна равен $\theta_E = 10$ мс дуги, а угловое расстояние между источником и звездой-линзой составляет одну секунду дуги: $|\theta| \approx 1''$. Тогда видимый параллакс источника есть:

$$p_a = 0,001 + 0,1 \cos 2\psi \text{ [мкс дуги]}.$$

Из приведенного уравнения видно, что параллакс, определяемый эффектом слабого микролинзирования, в сто раз превышает истинный параллакс источника.

3.9.2. Измерение годичного параллакса

В статье [116] рассмотрено изменение видимого положения источника света при равномерном движении наблюдателя относительно линзы и самого источника света. В упомянутой статье считалось, что наблюдения ведутся из барицентра Солнечной системы, который покоится относительно источника.

При измерении годичного параллактического смещения естественным представляется такой же выбор центра системы координат. Мы предполагаем, что скорости источника света S и линзы L относительно барицентра Солнечной системы являются постоянными. Базой \mathbf{B} теперь является барицентрический радиус-вектор Земли, который зависит от времени и удовлетворяет уравнению Кеплера.

Естественно, что при наблюдениях с Земли, которая совершает годичное движение вокруг Солнца, даже при отсутствии

линзового эффекта видимое движение источника при ненулевом параллаксе уже не будет равномерным [20]:

$$\mathbf{n}_{2I} = \langle \mathbf{n}_{0S} \left(1 + \frac{p_S}{1 \text{ а. е.}} V_r t \right) + \boldsymbol{\mu}_S t - \mathbf{b} \frac{p_S}{1 \text{ а. е.}} \rangle. \quad (3.30)$$

Здесь скобки $\langle \rangle$ обозначают нормирование вектора; V_r – лучевая скорость звезды.

Когда гравитационная линза искажает положение источника, уравнение движения изображения становится более сложным:

$$\mathbf{n}_{2I} = \mathbf{n}_{0S} + \boldsymbol{\mu}_S t - p_S \mathbf{b} + (\boldsymbol{\theta}(t) - p\mathbf{b}) \left(\frac{\theta_E}{\theta(t)} \right)^2, \quad (3.31)$$

где $p = p_S - p_L$ – разность параллаксов источника света и линзы, как они определяются в евклидовом пространстве.

Вид уравнений движения в эллиптических координатах β , λ будет представлен ниже.

3.9.3. Измерения на жесткой базе

В задаче с измерениями на жесткой базе возникают две ситуации, связанные с различным расположением вектора базы относительно вектора углового расстояния между источником S и линзой L .

Первая ситуация реализуется, когда вектор базы, линза L и источник S лежат в одной плоскости, причем линза L лежит вне треугольника, образуемого базой и двумя лучами, проведенными от источника S к различным концам базы (рис. 3.7). В этом случае $\psi = 0$ и видимый параллакс представляет сумму истинного параллакса и добавочного члена:

$$p_a = p_S + p_L \frac{\theta_E^2}{\Delta n_2^2}.$$

Отсюда следует, что видимый параллакс будет больше истинного. Вектора, направленные с концов базы к изображению источника, будут сближаться под действием гравитационного поля линзы L . Такое расположение «база–линза–

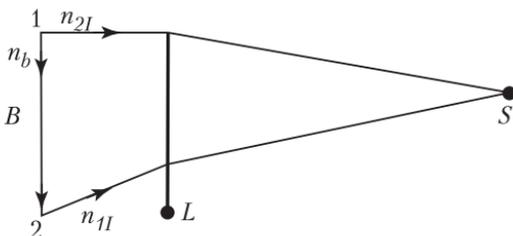


Рис. 3.7. Линза лежит вне треугольника, образованного двумя наблюдателями и источником.

источник» будет имитировать *приближение* источника к наблюдателю.

Увеличение видимого параллакса справедливо для ситуации, когда линза L не принадлежит плоскости, образованной базой \mathbf{B} и источником S . Однако увеличение p_a справедливо только для углов ψ , меньших $\frac{\pi}{4}$. Необходимо подчеркнуть, что величина вектора θ_1 больше, чем параллакс линзы p_L , т. е. θ_2 имеет то же направление, что и θ_1 . Здесь индексы 1 и 2 относятся к наблюдателям (или концам базы).

Вторая ситуация возникает, когда линза не принадлежит плоскости, образованной базой \mathbf{B} и источником S . В том случае, когда $\cos 2\psi = -1$, т. е. вектор базы перпендикулярен плоскости BS , видимый параллакс уменьшается

$$p_a = p_S - p_L \left(\frac{\theta_E}{\theta} \right)^2.$$

На рис. 3.8 изображено расположение базы \mathbf{B} , линзы L , и источника S , соответствующих этой ситуации. Считается, что линза L находится под плоскостью BS . В зависимости от величины истинного параллакса p_S и гравитационной добавки, видимый параллакс может стать даже отрицательным.

Особенно интересной является ситуация, когда линза L принадлежит плоскости BS , но находится внутри треугольника, образованного базой и лучами источника S , как показано на рис. 3.8. В этом случае параллакс p_L больше θ_1 , квадра-

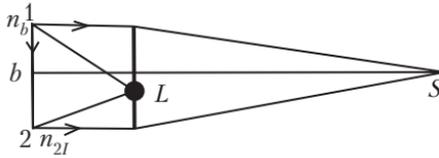


Рис. 3.8. Случай, соответствующий второму варианту расположения источника, линзы и базы.

точные члены по p становятся больше, чем произведение параллакса на угловой прицельный параметр, и возникает вторая ситуация. Вектора, направленные с концов базы к изображению источника будут «раздвигаться» гравитационным полем линзы L . В случае, когда линза L принадлежит плоскости BS , а угловой прицельный параметр $\theta_1 \sim p_d$, достаточно небольшой массы в качестве гравитационной линзы для того, чтобы наблюдаемое значение параллакса стало нулевым $p_a = 0$.

Масса, которая составляет примерно

$$m_L \sim \frac{c^2}{4G} \frac{B^2}{r_S}, \quad (3.32)$$

дает искажение параллакса, сравнимое с самим параллаксом. Наглядным примером важности этого вывода может служить следующая оценка. Возьмем в качестве длины базы размер орбиты Земли (надо заметить, что это вполне допустимая величина, поскольку она реализуется практически при наблюдениях источников через промежуток в полгода). За расстояние до источника (квазара) можно принять расстояние в 10 Гпк. Нетрудно подсчитать, что m_L составляет приблизительно 1/30 от массы Земли. Эта величина несколько больше, чем масса Луны, и вполне сравнима с массой большого спутника планеты типа Юпитера.

Необходимо также упомянуть о направлении вектора \mathbf{n}_{2l} . В евклидовой астрометрии все три вектора \mathbf{n}_{1l} , \mathbf{n}_{2l} и \mathbf{n}_b лежат в одной плоскости, которая образована тремя точками: наблюдателями 1 и 2 и источником S . При учете кривизны

пространства–времени и движения фотонов света по искривленным траекториям, вектора \mathbf{n}_{1I} , \mathbf{n}_{2I} и \mathbf{n}_b уже не принадлежат одной плоскости.

Уравнение, определяющее видимый параллакс (3.27), выделяет лишь одну из трех компонент вектора \mathbf{n}_{2I} . Основной компонент вектора \mathbf{n}_{2I} равен его проекции на плоскость $\mathbf{n}_b \mathbf{n}_{1I}$ и имеет величину ~ 1 ; он направлен на изображение источника и не содержит дополнительной информации. Второй компонент этого вектора определяет видимый параллакс. Существует также третий компонент, перпендикулярный плоскости, которая образована векторами \mathbf{n}_b , \mathbf{n}_{1I} . Этот компонент в нерелятивистской астрометрии не имеет аналогов, по величине он равен:

$$2(p_L - p_S) \frac{\theta_E^2}{\theta^2} \frac{(\boldsymbol{\theta} \cdot \mathbf{n}_b)}{\theta^2} (\boldsymbol{\theta} - \mathbf{n}_b(\boldsymbol{\theta} \cdot \mathbf{n}_b)). \quad (3.33)$$

Вообще говоря, этот компонент может служить источником дополнительной информации, например, о том, что производимые измерения искажены эффектом слабого микролинзирования.

3.10. Вид уравнений в эклиптических координатах

Выше обсуждалась теория наблюдений, производимых из двух жестко связанных положений в пространстве в два момента времени. Также были рассмотрены измерения параллакса с движущейся Земли в присутствии эффекта слабого микролинзирования; уравнения были получены в векторном виде. Однако в наблюдательной астрономии используют чаще не векторные уравнения, а уравнения, записанные в астрономических координатах. Это важно, поскольку изучение движения небесных источников связано в той или иной мере с предвычислением положений источников в заданный момент времени и в определенной системе координат. Используется несколько систем астрономических координат, в данном слу-

чае мы будем использовать эклиптическую систему: λ (долгота), β (широта).

Поскольку реальное движение происходит на малом участке сферы, который можно сравнительно точно аппроксимировать плоскостью, то уравнения движения приведены также в координатах близких к декартовым.

В современных астрометрических каталогах HIPPARCOS, TYCHO положение и движение звезды характеризуется пятью параметрами, заданными на определенную эпоху в экваториальной системе координат, фиксированной на эпоху J2000.0. В данном случае выбор эпохи не важен. В качестве координат будут использоваться эклиптические координаты λ и β , отнесенные к барицентру Солнечной системы.

Две координаты из пяти показывают направление на источник. Декартовы компоненты единичного вектора в направлении, определяемом координатами λ и β , можно представить как

$$\mathbf{n} = (\cos \lambda \cos \beta, \sin \lambda \cos \beta, \sin \beta).$$

Еще два параметра, приводимые в каталогах, это собственное движение по λ и β , причем скорость по координате β есть производная от координаты по времени

$$\mu_\beta = \frac{d\beta}{dt},$$

а скорость по эклиптической долготе определяется как

$$\mu_\lambda = \frac{d\lambda}{dt} \cos \beta.$$

Вектор угловой скорости звезды можно представить как

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{p}\mu_\lambda + \mathbf{q}\mu_\beta,$$

где μ_λ и μ_β определены выше, а вектора \mathbf{p} и \mathbf{q} есть

$$\mathbf{p} = (-\sin \lambda, \cos \lambda, 0),$$

$$\mathbf{q} = (-\cos \lambda \sin \beta, -\sin \lambda \sin \beta, \cos \beta).$$

Вектора \mathbf{n} , \mathbf{p} и \mathbf{q} образуют триаду взаимно перпендикулярных векторов, как она обычно определяется в астрономии [40].

Поскольку наблюдения относятся к барицентру Солнечной системы, то в качестве вектора \mathbf{n}_1 выбирается направление на источник из барицентра, а вектор \mathbf{V} соединяет барицентр и наблюдателя, который находится на Земле.

Следовательно, вектор \mathbf{n}_b имеет вид

$$\mathbf{n}_b = (\cos \lambda_E, \sin \lambda_E, 0),$$

где λ_E — эклиптическая долгота Земли. Для простоты предполагаем, что широта Земли равна нулю.

Триаду векторов в момент $t = 0$ обозначим следующим образом: \mathbf{n}_{S0} , \mathbf{p}_0 , \mathbf{q}_0 . Эклиптические координаты источника и линзы на начальный момент времени также обозначаются индексом нуль. Положение изображения отсчитывается от истинного положения источника, задаваемого вектором \mathbf{n}_{S0} в момент времени $t = 0$.

Разность двух векторов $\mathbf{n}_{2I} - \mathbf{n}_{S0}$ указывает положение изображения относительно истинного положения источника в нулевой момент времени. Эту разность можно представить в виде:

$$\mathbf{n}_{2I} - \mathbf{n}_{S0} = \Delta\lambda(t) \cos \beta_0 \mathbf{p}_0 + \Delta\beta(t) \mathbf{q}_0.$$

Легко заметить, что это равенство определяет приближенное разложение вектора \mathbf{n}_{2I} по триаде перпендикулярных векторов \mathbf{n}_{S0} , \mathbf{p}_0 , \mathbf{q}_0 . Точное разложение вектора \mathbf{n}_{2I} по этой триаде отличается от приближенного на члены, содержащие множители $\sim \Delta\lambda^2$, $\sim \Delta\beta^2$, которыми пренебрегаем.

Разность единичных векторов по направлению на источник и на линзу (3.14) можно представить в виде:

$$\boldsymbol{\theta} = \Delta\lambda \cos \beta_0 \mathbf{p}_0 + \Delta\beta \mathbf{q}_0,$$

где λ_0 , β_0 — координаты положения источника света S на эпоху $t = 0$, $\Delta\lambda = \lambda_S - \lambda_L$, $\Delta\beta = \beta_S - \beta_L$ — разности долгот и широт источника света и линзы L .

Введем теперь новые координаты:

$$x = \Delta\lambda \cos \beta_0, \quad y = \Delta\beta$$

на небесной сфере в касательной плоскости. В малых областях сферы такое приближение справедливо, а вычисления с хорошей точностью можно проводить, как в евклидовой геометрии. Координаты x , y показывают, как меняются координаты источника с точки зрения земного наблюдателя при перемещении по орбите. Пусть x_0 , y_0 — расстояние между источником и линзой в начальный момент времени при наблюдениях из барицентра.

Изменение декартовых координат будет описываться уравнениями:

$$x(t) = \mu_\lambda t - p_S \sin(\lambda_E - \lambda_0) + (x_0 + \mu_\lambda t - p_S \sin(\lambda_E - \lambda_0)) \frac{\theta_E^2}{R^2(t)}, \quad (3.34)$$

$$y(t) = \mu_\beta t + p_S \sin \beta_0 \cos(\lambda_E - \lambda_0) + (y_0 + \mu_\beta t + p_S \sin \beta_0 \cos(\lambda_E - \lambda_0)) \frac{\theta_E^2}{R^2(t)}, \quad (3.35)$$

где

$$R^2(t) = x_0^2 + y_0^2 + 2(x_0\mu_\lambda + y_0\mu_\beta)t + 2p(x_0 \sin(\lambda_E - \lambda_0) - y_0 \sin \beta_0 \cos(\lambda_E - \lambda_0)) + 2p(\mu_\lambda \sin(\lambda_E - \lambda_0) - \mu_\beta \sin \beta_0 \cos(\lambda_E - \lambda_0))t + p^2[1 - \cos^2 \beta_0 \cos^2(\lambda_E - \lambda_0) - 2 \cos \beta_0 \cos(\lambda_E - \lambda_0)]. \quad (3.36)$$

В уравнениях (3.34, 3.35) оставлены только главные члены по порядку малости. Как видно из уравнений (3.34, 3.35) движение изображения зависит от нескольких параметров: собственного движения источника μ_S , собственного движения

линзы μ_L , параллакс источника и линзы p_S, p_L и начального расстояния между источником и линзой (x_0, y_0) . Существует еще слабая зависимость от начальной широты β_0 , но она не вносит качественных изменений в траекторию движения изображения S и мы не будем анализировать зависимость траектории от β_0 .

Расстояние между источником и линзой (x_0, y_0) , а также параллаксы источника и линзы имеют одинаковые размерности. Мы будем измерять эти величины в мс дуги. Собственные скорости источника и линзы μ_S и μ_L имеют размерности мс дуги в год.

Для взаимного сравнения этих параметров разной размерности необходимо умножить μ_S и μ_L на некоторый характерный интервал времени. Таким интервалом является год, соответствующий также интервалу, за который совершается полное параллактическое смещение источника и линзы.

Проанализируем траекторию изображения источника S , начиная с самого простого случая, когда собственные скорости S и L равны нулю: $\mu_S = 0$ и $\mu_L = 0$. Наблюдатель совершает только годовое орбитальное движение, а барицентр Солнечной системы покоится относительно источника света и линзы. Введем вспомогательные величины $x_0 = \rho \cos \psi$ и $y_0 = \rho \sin \psi$. Будем также полагать, что угловое расстояние между линзой и источником света значительно больше, чем параллакс линзы $\theta_1 \gg p_L$. Это позволит нам упростить уравнение для $R^2(t)$.

Напишем упрощенные уравнения, описывающие движение изображения, используя (3.34), (3.35), (3.36), учитывая, что $\mu = \mathbf{0}$ и $p/\rho \ll 1$. Разложим выражения (3.34), (3.35), (3.36) в ряд по малому параметру p/ρ . Дополнительно введем еще две вспомогательные величины, которые упрощают запись координат в зависимости от времени. Пусть

$$A = (p_S - p_L) \cos 2\psi \frac{\theta_E^2}{\rho^2}, \quad B = (p_S - p_L) \sin 2\psi \frac{\theta_E^2}{\rho^2}.$$

Теперь координаты x, y в зависимости от времени, которое здесь определяется через долготу Земли λ_E , есть:

$$\begin{aligned} x - x_S &= p_S \sin(\lambda_E - \lambda) - \\ &\quad - A \sin(\lambda_E - \lambda) + B \sin \beta \cos(\lambda_E - \lambda), \\ y - y_S &= -p_S \sin \beta \cos(\lambda_E - \lambda) - \\ &\quad - A \sin \beta \cos(\lambda_E - \lambda) - B \sin(\lambda_E - \lambda), \end{aligned} \quad (3.37)$$

где $x_S = \cos 2\psi \frac{\theta_E^2}{\rho}$, $y_S = \sin 2\psi \frac{\theta_E^2}{\rho}$.

Будем считать, что справедливо неравенство $A^2 + B^2 \neq p_S^2$. Сделаем преобразование координат вида:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= (p_S + A)(x - x_S) + B(y - y_S), \\ \tilde{y} &= -B(x - x_S) + (A - p_S)(y - y_S). \end{aligned} \quad (3.38)$$

Это преобразование включает в себя сдвиг начала координат на вектор (x_S, y_S) , поворот, растяжение каждой из осей в пропорции $\frac{p_S + A}{p_S - A}$ и отражение одной из осей. Отражение становится очевидным, если положить $A = B = 0$, тогда преобразования имеют вид:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= +p_S(x - x_S), \\ \tilde{y} &= -p_S(y - y_S). \end{aligned}$$

Преобразование (3.38) приводит к уравнениям вида:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= -(p_S^2 - A^2 - B^2) \sin(\lambda_E - \lambda), \\ \tilde{y} &= (p_S^2 - A^2 - B^2) \sin \beta \cos(\lambda_E - \lambda). \end{aligned}$$

Если выполняется условие

$$\Delta = A^2 + B^2 - p_S^2 \neq 0,$$

то из этих уравнений следует уравнение для параллактического эллипса вида:

$$\tilde{x}^2 + \frac{\tilde{y}^2}{\sin^2 \beta} = 1.$$

В истинных координатах (x, y) — это сдвинутый на вектор (x_S, y_S) и деформированный эллипс. В случае $p_S = 0$ фигура представляет собой истинный эллипс, сдвинутый относительно истинного положения источника на вектор (x_S, y_S) и повернутый по отношению к плоскости эклиптики на угол 2ψ .

Отметим, что поворот параллактического эллипса не встречается в нерелятивистской астрометрии.

На рис. 3.9 показаны два эллипса: один параллактический эллипс, возникающий при отсутствии эффекта слабого микролинзирования, и второй эллипс большего размера, возникающий при слабом воздействии близкой гравитационной линзы. При этом параллакс источника равен 0, 2 мкс дуги, а параллакс линзы значительно больше и равен 1 мкс дуги. Угловые скорости источника и линзы равны нулю. Видимое смещение линзы происходит только из-за годового движения Земли по орбите. По вертикальной оси рисунка отложена широта β , по горизонтальной оси — $\lambda \cos \beta$. Для простоты восприятия оба эллипса нарисованы соосно.

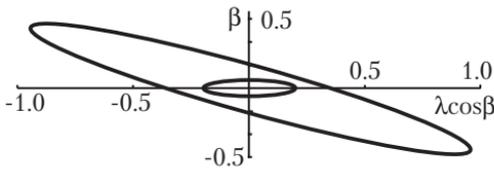


Рис. 3.9. Изображение параллактического эллипса внегалактического источника (малый эллипс внутри большого) на фоне параллактического движения, возникающего из-за эффекта слабого микролинзирования.

В случае $\Delta = 0$ движение вырождается в движение по прямой вида

$$y - y_S = -\frac{p_S + A}{B}(x - x_S).$$

Параллактическое движение вдоль прямой в евклидовой астрометрии соответствует положению источника в плоскости эклиптики $\beta_0 = 0$. Однако в этом случае прямая параллак-

тического движения параллельна оси λ . В случае параллактического движения, вызванного эффектом слабого микролинзирования, появляется наклон прямой, причем коэффициент наклона зависит от параметров линзы.

Уравнения (3.37) показывают видимое движение источника по небу. Эти уравнения описывают замкнутую траекторию, похожую на эллипс.

3.11. Вековая абберация

Выше мы рассматривали упрощенную модель и предполагали, что Солнечная система находится в покое относительно барицентрической системы координат ICRF. В общем случае это не так. Солнечная система обращается вокруг центра Галактики со скоростью примерно 220 км/с и за время распространения света (τ) от источника переместится в другую точку пространства.

Этот эффект имеет вековой характер и потому обычно называется *вековой абберацией*. Однако на практике учет вековой абберации не производится по следующим причинам. С одной стороны, велика неопределенность расстояний до звезд и, следовательно, величины времени τ . С другой стороны, направление скорости Солнечной системы практически не меняется на коротких промежутках времени, и, следовательно, вековая абберация постоянна. Она приводит к постоянному смещению звезд на небесной сфере. В самом деле, если Солнечная система движется со скоростью 220 км/с по круговой орбите с радиусом 8,5 кпк относительно центра Галактики, период обращения равен $240 \cdot 10^6$ лет, то максимальная величина вековой абберации составляет 2,5'.

Вековая абберация приводит к следующему изменению галактических координат b, l звезды:

$$\begin{aligned}\Delta l \cos b &= \varkappa \cos b_0 \sin(l - l_0), \\ \Delta b &= \varkappa [\sin b \cos b_0 \cos(l - l_0) - \cos b \sin b_0],\end{aligned}$$

где $\varkappa = -V/c$, b_0, l_0 — координаты апекса. Если $b_0 = 0^\circ, l_0 = 90^\circ$, то постоянная часть вековой aberrации равна:

$$\begin{aligned}\Delta l \cos b &= -\varkappa \cos l, \\ \Delta b &= +\varkappa \sin b \sin l.\end{aligned}$$

Как говорилось выше, этот эффект приводит к постоянно-му смещению звезд на небесной сфере, поэтому измерить его невозможно. Если мы предположим, что Солнце движется вокруг центра Галактики по круговой орбите, то годовое изменение направления на апекс (или поворот вектора скорости Солнца за год) равно $dl_0/dt = n$, где $n = 2\pi/T \approx 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ — среднее движение, $T = 240 \cdot 10^6$ лет — период обращения. Тогда изменение координат звезды за год вследствие изменения апекса равно:

$$\begin{aligned}\delta(\Delta l \cos b) &= -\varkappa n \sin l, \\ \delta(\Delta b) &= +\varkappa n \sin b \cos l.\end{aligned}$$

Коэффициент $\varkappa n$ равен ~ 4 мкс дуги. Максимальное изменение галактической долготы l будет наблюдаться для звезд с $b \approx 0^\circ, l \approx \pm 90^\circ$. Максимальное изменение галактической широты b будет иметь место для звезд с координатами: $b \approx \pm 90^\circ$ и $l \approx 0^\circ$ или 180° .

В настоящее время измерить годовое изменение координат из-за вековой aberrации невозможно. Однако в будущем, при построении высокоточных каталогов по проектам GAIA, SIM, когда координаты звезд будут измеряться с микросекундной точностью, нужно будет обязательно учитывать вековую aberrацию.

Подчеркнем, что величина коэффициента $\varkappa n = 4$ мкс дуги соответствует годовому изменению вековой aberrации. За 25-летний промежуток наблюдений коэффициент будет равняться уже 100 мкс дуги, и, в принципе, обращение Солнца относительно центра Галактики можно попытаться обнаружить уже сейчас на основе имеющейся базы РСДБ наблюдений.

Непосредственное измерение обращения Солнечной системы вокруг центра Галактики — это фундаментальный результат, который станет возможным на основе высокоточных астрометрических измерений.

3.12. Вероятность слабого микролинзирования и его статистические характеристики

В обзоре [22] и в работах [103, 73, 117] вычислялась вероятность микролинзового эффекта. Эта вероятность пропорциональна угловому совпадению фоновой звезды и звезды-линзы в пределах площади конуса Эйнштейна. Вероятность зависит от распределения звезд в Галактике (включая распределение темного вещества), распределения звезд по массам, а также от структуры различных компонентов нашей Галактики: балджа, спиральных рукавов, а также гало. В цитированных выше работах обсуждались различные модели, и вероятность микролинзирования была вычислена для нескольких моделей нашей Галактики.

Вероятность эффекта слабого микролинзирования можно вычислить аналогичным способом. Мы будем здесь следовать методу, изложенному в работе М.Сажина [117].

Согласно наблюдательным данным, вероятность эффекта микролинзирования в нашей Галактике составляет $p_m = (3 \div 10) \cdot 10^{-7}$. При этом размер конуса Эйнштейна лежит в пределах $\theta_E = (0,5 \div 12)$ мс дуги.

Вероятность эффекта слабого микролинзирования превосходит вероятность микролинзового эффекта в отношении квадратов углового прицельного параметра θ_p к размеру конуса Эйнштейна θ_E :

$$p = p_m \left(\frac{\theta_p}{\theta_E} \right)^2.$$

Поскольку амплитуда отклонения от истинного положения обратно пропорциональна прицельному параметру:

$$\delta\theta = \frac{\theta_E^2}{\theta_p},$$

то дифференциальная вероятность получить отклонение с амплитудой $\delta\theta$ есть:

$$p(\delta\theta) = 2p_m \frac{\theta_E^2}{\delta\theta^3}.$$

Легко видеть, что эта вероятность является ненормируемой. Вероятность величины, распределенной по степенному закону, является нормируемой только в том случае, когда явно указаны пределы изменения переменной величины. Определим верхнюю границу изменения $\delta\theta_{max} = \theta_E$. Это означает, что в качестве максимальной величины отклонения фоновой звезды мы выбираем размер конуса Эйнштейна; другими словами, вместо слабого микролинзового эффекта мы уже имеем сильное микролинзирование и увидим два изображения одного источника сравнимой яркости. В качестве нижнего предела $\delta\theta$ мы выберем величину $\delta\theta_{min} \approx \theta_E \sqrt{p_m}$. Это соответствует средней величине прицельного параметра. Для такого закона распределения средняя величина есть

$$\langle \delta\theta \rangle = 2\theta_E \sqrt{p_m} \quad (3.39)$$

и средняя величина отклонения, согласно (3.39), меняется в пределах

$$0,5 \text{ мкс дуги} < \delta\theta < 24 \text{ мкс дуги}.$$

Так как отдельные выбросы могут быть на уровне 3σ , то вычисляя вариацию этой величины, приходим к уравнению вида:

$$\langle \delta\theta \rangle = 2\theta_E \sqrt{p_m} \sqrt{\ln\left(\frac{1}{p_m}\right)} \quad (3.40)$$

и тогда средняя величина выбросов согласно (3.40) меняется в пределах:

$$5 \text{ мкс дуги} < \delta\theta < 96 \text{ мкс дуги}.$$

Значит, средние характеристики этого процесса лежат в пределах от 1 до 100 мкс дуги. Для правильного понимания его статистических характеристик необходимо компьютерное моделирование.

3.13. Статистическое исследование изменения положения изображений под действием слабого гравитационного микролинзирования

При численном моделировании эффекта слабого микролинзирования необходимо выбрать некоторые характерные значения входящих в задачу параметров. Прежде всего это касается характеристик звезды-линзы. Выберем в качестве таких параметров массу звезды, которая равна $1M_{\odot}$, расстояние до нее равно 100 пк. Соответственно конус Эйнштейна для такой звезды в угловой мере будет составлять ~ 8 мс дуги. Поскольку мы рассматриваем довольно близкую звезду, необходимо также выбрать достаточно быстрое движение этой звезды. Предполагалось, что собственное движение равнолось: $\mu_{\alpha} = 30$ мс дуги/год и $\mu_{\delta} = 10$ мс дуги/год.

Параметры источника света для нас не так важны, как параметры звезды-линзы. Поэтому собственное движение источника по прямому восхождению и склонению не учитывалось, что вполне оправдывается как условиями постановки задачи, так и реально существующими условиями реализации ICRF. Поскольку эффект слабого гравитационного микролинзирования является линейным, то в первом приближении можно найти сначала решение задачи для звезд с какой-либо фиксированной массой, а затем обобщить его на звездное население с реальным распределением по массам, расстояниям и скоростям.

В качестве начальной точки движения для линз (звезд Галактики) использовалась граница области с радиусом $\vartheta = 100$ мс дуги и центром, совпадающим с источником. Звезды запускались случайным образом, в произвольном направле-

нии. Момент времени также выбирался случайно, хотя и имел ограничения, связанные с тем, что линза должна пересечь границы области, установленные в задаче, и пройти в непосредственной близости от источника за период времени, равный 300 лет. Начальный момент движения может быть любым в интервале ± 50 лет, притом для настоящего момента времени $t = 0$. Соответственно линза может начать двигаться как раньше настоящего момента, так и позже него. Количество звездлинз, запущенных на протяжении расчетного периода, равнялось 5000.

При этом способе задания местоположения линза каждый раз начинает движение со случайной точки на границе заданной области в произвольный момент времени, который удовлетворяет тому условию, что за интервал в 300 лет она приблизится к источнику и пройдет от него на минимальном расстоянии. Момент прохождения линзы на минимальном расстоянии от источника соответствует максимальной величине отклонения изображения источника от его истинного положения, что и является основной статистической величиной в данной задаче.

Задач, решаемых при таком моделировании, было несколько. Первая из них — выяснить, какое количество источников будет испытывать большое отклонение под действием слабого гравитационного микролинзирования. Фактически, количество источников, находящихся под действием слабого гравитационного микролинзирования, определяет критерий, насколько точность реализации опорной системы координат отвечает точности наблюдений. Если большое количество источников, наблюдаемых на современных уровнях точности, будут испытывать на себе влияние слабого гравитационного микролинзирования, то можно говорить о том, что предел для повышения точности реализации опорной системы координат достигнут уже на современном уровне точности наблюдений. Если число таких источников не превысит 1%, как показано в работах [116, 115], то предел не достигнут, и дальнейшее повышение точности наблюдений может принести улучшение в

точности реализации ICRF. Второй задачей было выяснение того, существует ли такой уровень точности наблюдений, на котором большинство или все источники будут испытывать влияние эффекта слабого гравитационного микролинзирования.

Результаты моделирования при случайном задании времени начала движения линзы и равномерном его распределении по времени показаны на рис. 3.10. Как видно из представ-

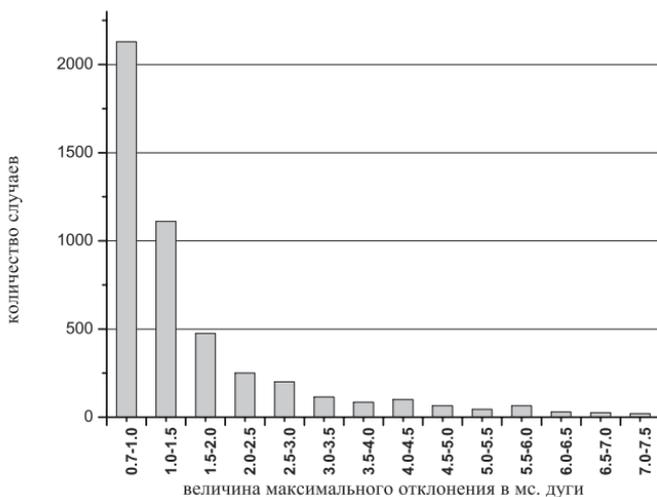


Рис. 3.10. На гистограмме представлена зависимость количества случаев слабого гравитационного микролинзирования от величины расстояния, на котором проходит линза.

ленной на рисунке гистограммы, наибольшее количество линз (93,38% от общего числа линз, участвовавших в моделировании) проходит от источника на большом расстоянии, и отклонение его изображения на картинной плоскости от истинного положения не превышает 7,5 мс дуги. Соответственно количество линз, прошедших достаточно близко, составляет менее 2% процентов от общего числа случаев. Для данной задачи величина конуса Эйнштейна для линз будет равна 8,85 мс

дуги. Исходя из этого, из рассмотрения были исключены случаи, когда величина отклонения была слишком большой (более 8,0 мс дуги), поскольку это означает, что расстояние, на котором проходил источник, было меньше, чем размер конуса Эйнштейна. В этом случае мы сталкиваемся уже с эффектом микролинзирования и рассматриваться он должен отдельно, также как и ситуация, когда источник касается границы конуса Эйнштейна. В этих случаях величина отклонения может быть намного больше. Количество этих случаев чуть больше 1% от общего числа. Однако несмотря на небольшое число теоретически возможных случаев значительного изменения положения изображения за короткий промежуток времени, это вполне реальная ситуация, и исключать подобные случаи из рассмотрения и анализа никак нельзя. Иначе это приведет к значительным ошибкам при интерпретации результатов.

Из моделирования следует, что наиболее часто встречающиеся случаи ($\sim 57\%$ от общего числа) слабого микролинзирования приводят к отклонению, равному $0,7 \div 1$ мс дуги.

Поскольку данная задача решалась в первом приближении, сейчас нельзя утверждать, что реальная картина, которую можно наблюдать, будет точно совпадать с представленной. Однако, можно предположить, что чем выше будет точность, с которой мы наблюдаем источник, тем больше вероятность увидеть значимую величину эффекта слабого гравитационного микролинзирования. Причем участвовать в создании эффекта будет не одна линза, а, скорее всего, несколько.

Результатом моделирования является вывод, что любой источник, принадлежащий ICRF, может испытывать на себе влияние эффекта слабого гравитационного микролинзирования. Искажения координат, вызванные им, малы и ненаблюдаемы в настоящее время, поскольку точность, с которой определяется его положения, намного хуже. В случае роста точности наблюдений большого количества объектов, число тех из них, которые будут испытывать на себе значимое влияние эффекта слабого гравитационного микролинзирования,

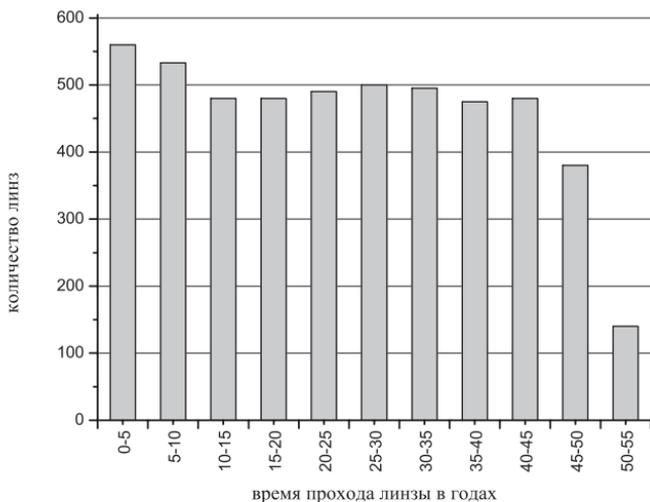


Рис. 3.11. На гистограмме представлена зависимость количества случаев слабого гравитационного микролинзирования от времени, которое необходимо стартовавшей с границы исследуемой области линзе для максимального сближения с источником.

будет расти и довольно быстро. Следовательно, как бы мы ни улучшали точность наблюдений, с ее ростом мы будем получать все большую относительную неопределенность в координатах источников.

Эта неопределенность будет неизвестной, поскольку для вычисления ее величины необходимо знать параметры линзы (массу, расстояния до нее). Если же таких линз несколько, то необходимо вычислить суперпозицию эффектов от каждого источника.

Как показано в работах [116, 115], искажения положений источников вследствие гравитационного микролинзирования приводят к тому, что при попытке улучшения точности реализации опорной системы координат появляется ограничение, которое невозможно обойти ни увеличением точности наблюдения, ни накоплением статистики. Фактически это естественный, можно сказать «природный» белый шум, кото-

рый не позволит нам повысить точность реализации системы координат выше определенного уровня.

3.14. Заключение

Действие гравитационных полей нашей Галактики на пространство лучей света приводит к тому, что фотоны движутся по искривленным траекториям. Вследствие этого в месте приема этого излучения направление на источник света не будет совпадать с прямой, соединяющей этот источник и наблюдателя. Поскольку поля в Галактике являются нестационарными, то и направление прихода света тоже будет нестационарным. Другими словами, видимое положение звезды на небе будет испытывать случайное флуктуационное «дрожание». Этот эффект полностью аналогичен дрожанию звезды при прохождении света через турбулентную атмосферу Земли. Разница заключается только в характерных амплитудах дрожания и характерных временах. В разобранном случае характерные амплитуды дрожания составляют величины порядка 1 мкс дуги, а характерные времена дрожания составляют десятки или даже сотни лет.

В зависимости от модели Галактики, от случайного расположения звезд поблизости от траектории квазар–Солнечная система, соответствующие амплитуды составляют от 1 до 50 мкс дуги. Тем не менее, через несколько десятков лет происходит полная смена положения практически всех источников на уровне в несколько мкс.

Отдельные «выбросы» могут быть достаточно большими и достигать величин в сотни угловых мкс, однако это нестационарные процессы с характерным временем порядка нескольких месяцев. Такие процессы не могут оказать существенного влияния на построение фундаментальных астрометрических каталогов.

При измерении параллаксов внегалактических объектов эти дрожания могут оказаться существенными. Если позиционные измерения положения внегалактического источни-

ка разнесены на интервал времени, значительно превосходящий половину года, то характерные флуктуации параллакса составляют величину порядка 1 мкс дуги. При измерениях, произведенных в один момент времени, амплитуда дрожания значительно ниже. Она не превосходит сотен угловых пикосекунд дуги, что позволяет измерять тригонометрические параллаксы практически вплоть до горизонта частиц в нашей Вселенной.

Из перечисленного выше можно сделать один очень важный вывод. Астрометрические каталоги микросекундной точности должны пересматриваться приблизительно каждые тридцать лет на предмет установления новой опорной системы небесных координат.

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность за обсуждения и полезные замечания д.ф.-м.н. К.В. Куимову. Авторам хотелось бы особо отметить неоценимый вклад в подготовку этой главы профессора И.А. Герасимова. Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант N 04-02-17288).

ИНТЕРФЕРОМЕТР-ДУГОМЕР ОЗИРИС

4.1. Технические предпосылки высокоточных интерферометрических измерений

Бурная активность в разработке космических звездных интерферометров стимулировала исследования, направленные на повышение точности измерения длин. В результате в последнее время были созданы интерферометрические системы нанометрового и субнанометрового уровня точности [59]. Достигнутый прогресс объясняется в большей мере успехами технологии, чем внедрением новых принципов измерений.

Типичная схема интерферометра, предназначенного для измерений расстояний, представляет собой модификацию интерферометра Майкельсона, как правило, с уголковыми призменными или зеркальными отражателями. При движении отражателя в измерительной ветви интерферометра фотоэлектрическая система регистрации осуществляет реверсивный счет интерференционных полос и интерполяцию внутри полосы, то есть определяет изменение целой и дробной частей порядка интерференции. Коммерческие интерферометры рассчитаны на проведение измерений длины в воздухе. Неопределенность значения показателя преломления воздуха, зависящего, главным образом, от температуры, давления и влаж-

ности, а также турбулентность воздуха накладывают ограничения на повышение точности измерений. Поэтому измерения координатных перемещений прецизионных станков не могут быть выполнены с относительной погрешностью, меньшей 10^{-6} . В условиях метрологических лабораторий эти же интерферометрические системы позволяют проводить измерения длин с погрешностью 10^{-7} . В связи с этим дискретность отсчета и связанное с ней разрешение коммерческих интерферометрических систем обычно ограничены значением 0,01 мкм, что соответствует приблизительно 1/30 интерференционной полосы для длины волны 0,6329... мкм He-Ne лазера. Созданные в последнее время интерферометрические системы с нанометровым и субнанометровым разрешением могут обеспечить повышение точности измерений только в вакууме. При использовании таких систем для измерения расстояний в воздухе сужается диапазон измерений, где можно реализовать потенциальную точность системы. Например, при аппаратурной погрешности измерения 1 нм [66] при измерениях в воздухе даже при прочих идеальных условиях указанную погрешность можно получить только в диапазоне длин до 10 мм.

При абсолютных интерференционных измерениях длины производится сравнение контролируемой длины с длиной волны света эталонного лазера. В связи с этим предельно достижимые значения точности и стабильности показаний интерферометра зависят от воспроизводимости и стабильности длины волны (частоты) излучения. Стабильность частоты излучения лазеров обычно оценивают через параметр Аллана (см., напр. [38]). Этот параметр является функцией времени усреднения данных эксперимента τ . Для частотно-стабилизированных лазеров параметр Аллана обычно линейно уменьшается с увеличением τ до значений времени усреднения 1–10 с [38]. Воспроизводимость частоты излучения обычно выражают через относительное значение среднего квадратического отклонения (СКО) изменений частоты.

Распределение интенсивности на выходе интерферометра

является периодической функцией разности фаз. В связи с этим интерферометрическим устройствам свойственна периодическая систематическая ошибка [59, 66]. Период изменения этой ошибки обычно соответствует одному порядку интерференции (или 2π по разности фаз). В частных случаях этот период может быть равен половине порядка. Значение периодической ошибки зависит от дробной части порядка интерференции и мало изменяется даже при больших изменениях целой части порядка интерференции. Поэтому эту ошибку можно учесть тем или иным способом [66]. Поскольку учет производится с некоторой остаточной погрешностью, то очевидно, что необходимо, насколько возможно, уменьшать значение периодической ошибки. Источниками периодической ошибки могут быть как оптические дефекты, так и погрешность системы регистрации разности хода.

Периодическая ошибка, вызванная дефектами оптических и электронных элементов интерферометрической системы, может быть полностью исключена при использовании компенсационного метода измерения дробной части порядка интерференции [25]. Погрешность измерений в нулевом компенсационном устройстве складывается из погрешности установки нулевых положений и погрешности компенсатора. Минимальная достижимая погрешность наведения на минимум интерференции при использовании метода фазовой модуляции определяется дробовым шумом и по оценкам, сделанным в работах [25, 34], может быть меньше 1 пм.

Следует отметить, что большинство метрологических интерферометрических установок для измерения длин являются измерителями перемещений. Измеряемая длина находится как разность двух показаний этих измерителей перемещений. Недостатком таких измерений длины являются необходимость использования хороших направляющих для перемещения отражателя и обязательность осуществления перемещений в процессе измерений. Зачастую интерференционные измерители перемещений непригодны для измерения расстояний из-за отсутствия направляющих, недоступности даль-

ней точки и т.п. Поэтому проводятся работы по созданию интерференционных приборов для абсолютных измерений расстояний. Наибольший прогресс в этом направлении получен при применении супергетеродинного метода [63]. Указанный метод позволяет, используя лазеры видимого диапазона, реализовать принцип двухволновой и многоволновой интерферометрии. Двухволновая интерферометрия предполагает, что информационный сигнал как бы соответствует эффективной длине волны Λ , равной

$$\Lambda = \lambda_{\text{эфф.}} = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2), \quad (4.1)$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн используемой пары излучений. Сложность осуществления этого принципа — в том, что для измерений наиболее удобны значения разности длин волн в интервале 0,1–3 нм, которые слишком велики, чтобы можно было обеспечить прямое гетеродинирование оптических сигналов. В то же время эта разность слишком мала, чтобы простыми оптическими средствами можно было надежно разделить излучения. Супергетеродинный метод позволяет без существенного усложнения измерительной аппаратуры преодолеть указанные затруднения.

Для прецизионных абсолютных измерений расстояний остается многообещающим классический метод совпадения дробных частей порядков интерференции. Если при этом в качестве источника излучения использовать трехволновой частотно-стабилизированный лазер, то может быть создан компактный интерференционный измеритель расстояний [39].

В последнее время интенсивно ведутся работы по усовершенствованию интерферометрической техники измерений расстояний применительно к задачам создания космических астрономических интерферометров [75, 102, 101, 97]. При этом усилия исследователей были направлены на разработку измерительных систем, позволяющих измерять небольшие (до 10 см) изменения расстояний порядка 1–4 м с погрешностью 1–2 пм СКО, что соответствует астрометрической точности разрабатывавшихся звездных интерферометров POINTS¹

, OSI и SONATA² на уровне нескольких микросекунд дуги. В результате работ над этими проектами к настоящему времени уже создана уникальная интерференционная аппаратура, по некоторым параметрам превосходящая эталонные интерференционные системы лучших метрологических организаций мира. В аннотациях и выводах работ [75, 102] указано, что продемонстрировано действие метрологических интерферометров на пикометровом уровне, а в аннотации к работе [75] даже отмечено, что получена погрешность измерений в вакууме 3,5 пм СКО.

В работе [102] была также разработана интерферометрическая система для слежения за расстояниями между входными точками (см. раздел 4.3) интерферометра. Эта система базируется на схеме многолучевого кольцевого интерферометра, использующего систему регистрации дробной части порядка интерференции, основанную на автоподстройке частоты излучения лазера по резонансу внешнего пассивного многолучевого интерферометра и измерении сдвига частоты лазера относительно реперной частоты. Эта нетипичная для измерений длин техника характерна для метрологии длин волн и частот излучения эталонных частотно-стабилизированных лазеров [23]. В работах SAO [102, 101] не содержится данных о стабильности показаний этой системы.

В SAO и JPL достигнута рекордная стабильность показаний цифровых интерферометров типа Майкельсона в лабораторных условиях [75, 102, 101]. Относительные значения

¹POINTS (*Precision Optical INterferometer in Space*) – проект интерферометра, который разрабатывался в середине 90-х годов под руководством Роберта Ризенберга в Центре астрофизических исследований, объединяющем подразделения Смитсоновской астрофизической обсерватории (SAO) и Гарвардской университетской обсерватории, при участии Лаборатории реактивного движения (*Jet Propulsion Laboratory*, JPL) и Itek Optical Systems. (Прим.ред.)

²OSI (*Orbiting Stellar Interferometer*) и SONATA (*Small OSI*) – разрабатывались в JPL под руководством Майкла Шао в середине 90-х годов. Результаты использованы в проекте SIM (*Space Interferometry Mission*), финансируемом сейчас на стадии выполнения опытно-конструкторских работ. (Прим.ред.)

нестабильности порядка $2 \cdot 10^{-12}$ СКО впечатляют, а приведенные данные не дают повода сомневаться в достоверности достигнутых результатов. Большим достижением можно считать также обеспечение отсчета *дробной части порядка интерференции* с дискретностью не более $3 \cdot 10^{-6}$.

Но в то же самое время говорить о пикометровом уровне точности измерений пока еще рано. Дело в том, что в указанных работах исследовалась относительная стабильность двух систем регистрации, а также изучались некоторые составляющие систематической погрешности измерений, но каких-либо линейных измерений не производилось. Не было даже попыток измерить хотя бы небольшое изменение одного расстояния, скажем, изменение однометрового расстояния на 1 см относительно другого стабилизированного однометрового расстояния. В этом случае учет систематических ошибок был бы гораздо сложнее. В проведенных же экспериментах в основном проявлялись медленно меняющиеся систематические ошибки, которые влияли на стабильность показаний. Исключение составляют приведенные в работе [75] данные о применении метода циклического усреднения для исключения периодической погрешности, обусловленной несовершенством поляризационных свойств оптических элементов интерферометра. Сканирование разности хода в течение приблизительно 10 мин. и три цикла усреднения данных, полученных при сканировании, позволили уменьшить периодическую погрешность более чем в 1000 раз — до пикометрового уровня. В практике метрологических исследований при исключении и учете систематической ошибки полученный результат считается очень хорошим, если остаточная систематическая погрешность составляет один–несколько процентов от первоначальной величины. В этой связи феноменальный результат, полученный в работе [75], требует подтверждений при дополнительном исследовании, включающем анализ результатов реальных измерений длины.

В JPL также создана измерительная система для абсолютных измерений длин баз звездного интерферометра [75].

Ее действие основано на подсчете числа интерференционных полос, зарегистрированных в гетеродинном интерферометре при изменении частоты излучения лазера. Ожидается, что погрешность измерений в вакууме составит 10 мкм на длине 10 м. Преимущество реализованного в JPL метода заключается в том, что он не требует предварительного грубого измерения контролируемого расстояния.

4.2. Общие принципы измерений углов методами интерферометрии

Основная идея прибора заключается в измерении угла между направлением базы интерферометра Майкельсона и направлением на бесконечно удаленный точечный источник света по величине разности оптического хода от плоского волнового фронта до одного конца базы по сравнению с величиной хода до другого (рис. 4.1). Эта разность может быть определена с высокой точностью интерферометром Майкельсона, в котором интенсивность света в произвольной точке интер-

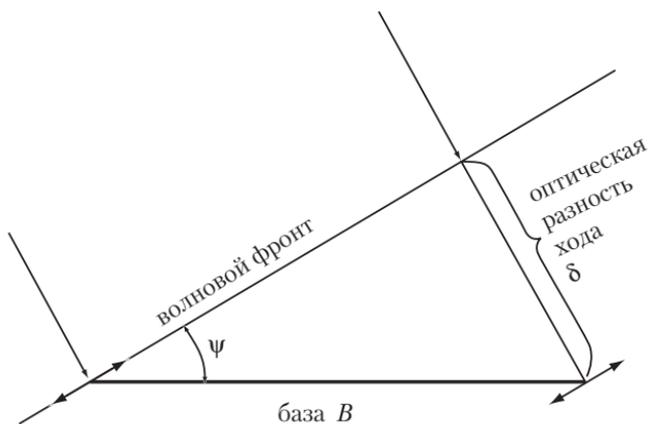


Рис. 4.1. Принцип измерения угла прихода волнового фронта относительно базы B по измеренной разности оптических ходов от фронта до концов базы. Стрелки, параллельные волновому фронту, символизируют входные апертуры.

ференционной картины зависит от разности фаз интерферирующих пучков. При наблюдении фронта, нормаль к которому ортогональна линии базиса, этот набег фазы равен нулю в точке поля интерференции, расположенной точно на одинаковом расстоянии (точка «равной длины хода») от концов базиса и от сопряженных точек фронта, где и наблюдается яркая полоса «нулевого порядка интерференции». Наклон волнового фронта к направлению базы приводит к появлению набегу фазы между фронтом и концами базы, что приводит к смещению точки равной длины хода в сторону вершины острого угла между линиями визирования и базиса на величину, равную половине разности оптических ходов.

Величина разности оптических ходов от фронта до концов базы δ связана с длиной базы B и величиной угла ψ между базисом и линией визирования простой зависимостью:

$$\delta/B = \sin \psi. \quad (4.2)$$

Разность хода δ , выраженная в длинах световых волн, называется порядком интерференции m :

$$\delta = \lambda \cdot m, \quad (4.3)$$

а интенсивность света в рассматриваемой точке интерференционной картины I

$$I = I_0 \cdot \cos^2 m\pi. \quad (4.4)$$

Функция (4.4) является периодической и описывает чередование максимумов и минимумов в поле интерференции. Поскольку порядок интерференции зависит от длины волны, положение отдельных максимумов будет также зависеть от длины волны, и единственный максимум, общий для всех длин волн, будет соответствовать $m = 0$, т. е. нулевому порядку интерференции.

В случае монохроматического излучения вся интерференционная картина будет являться совокупностью совершенно

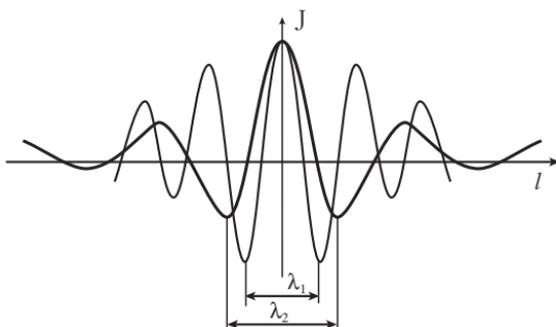


Рис. 4.2. Распределение амплитуд освещенностей в поле интерференции в окрестности нулевого порядка для двух длин волн.

одинаковых полос. Если же в интерференции участвуют потоки с разными длинами волн, то одна и та же оптическая разность хода δ на разных длинах волн будет соответствовать разной величине порядка интерференции $m(\lambda)$, и для разных длин волн положения максимумов в поле интерференции не будут совпадать. При разности длин волн $\Delta\lambda$ разность порядков интерференции в 0,5 будет означать, что максимум одной картины интерференции придется на соседний минимум другой. Это условие наложения описывается формулой:

$$(m + 1) \cdot \lambda = m \cdot (\lambda + \Delta\lambda). \quad (4.5)$$

При разности длин волн, соответствующей (4.5), минимумы интерференционных полос отсутствуют полностью. Но даже при меньших значениях этой разности происходит ослабление максимумов и минимумов интерференционной картины, как показывает рис. 4.2.

Для оценки видимости, или контрастности, интерференционной картины в поле интерференции Майкельсон ввел параметр видности V :

$$V = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (4.6)$$

где E_{\max} и E_{\min} — максимальная и минимальная освещенности интерференционных полос вблизи выбранной точки поля интерференции [36]. Наиболее контрастная картина соответствует $V = 1$, а полное исчезновение полос имеет место при $V = 0$.

Считается, что для уверенного различения полос значение V должно быть не менее 0,1 или $E_{\min} \approx 0,82 \cdot E_{\max}$. Из (4.5) следует, что $V = 0$ наступает при $\lambda/\Delta\lambda = m$. Это значит, что при наблюдении источника в белом свете интерференционная картина может наблюдаться только вблизи нулевого порядка интерференции. Вместе с тем, положение интерференционных полос, согласно (4.3), связано с измеряемой разностью оптических ходов в плечах интерферометра через длину волны λ . Поэтому проведение высокоточных измерений величины δ по положению полос в интерференционной картине возможно только в узких спектральных полосах.

В том случае, если интерферометр работает в некоторой полосе частот, то на выходе наблюдается наложение интерференционных картин в разных длинах волн. В точке, соответствующей равной длине хода в обоих плечах интерферометра, разность фаз интерферирующих лучей равна нулю для всех длин волн, — собственно, поэтому образуемая ими полоса называется ахроматической. Во всех остальных точках поля интерференции разность фаз будет зависеть от длины волны, и нулевая амплитуда света в одной длине волны будет приходиться на ненулевую амплитуду в других длинах волн. Такое же положение будет и с максимальными амплитудами в разных длинах волн. В результате сложения интенсивностей проинтерферировавших лучей с разными длинами волн модуляция интерференционной картины будет убывать по мере удаления от ахроматической полосы.

Для того, чтобы сузить спектральную полосу и повысить контраст интерференционной картины, можно развести интерферирующие пучки с разными длинами волн в том же направлении, в каком ориентирована ахроматическая полоса (т. е. в направлении, перпендикулярном направлению базы). В ка-

честве диспергирующего элемента рационально использовать призму (например, призму прямого зрения), так как, в отличие от дифракционной решетки, дисперсия света в призме не приводит к появлению и переналожению спектров многих порядков.

Призма устанавливается непосредственно в выходной пучок после смесителя, так что полосы в поле интерференции принимают вид полос, показанных на рис. 4.3. Ахроматиче-

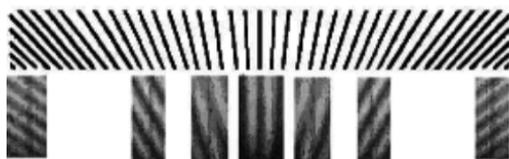


Рис. 4.3. Вид интерференционных полос при интерференции узких пучков белого света, диспергированных в вертикальном направлении: характер расположения полос (вверху) и картина полос на разных участках картины (внизу). В центре — в окрестности полосы нулевого порядка интерференции; по краям — при больших порядках интерференции.

ская полоса, соответствующая нулевой разности хода, имеет вид вертикальной линии, тогда как остальные полосы становятся наклонными по отношению к ахроматической: в синей области спектра расстояние между полосами примерно вдвое меньше, чем в красной. Кроме того, поскольку дисперсия призмного анализатора нелинейна (в красной области она меньше, чем в синей), полосы несколько искривляются. Прямой оказывается только ахроматическая полоса, что также облегчает ее нахождение в общей картине полос. Интерференционная картина в узких спектральных полосах («каналах») показана на рис. 4.3. На рисунке отображен очевидный факт существования большого числа интерференционных полос для узких спектральных интервалов, и явления наклона полос одного порядка, вызванного дисперсией белого света.

Вид интерференционной картины зависит от характера сложения интерферирующих пучков. Если складываются параллельные друг другу плоские волны, то для всех точек поля интерференции происходит синфазное сложение, и интенсивность выходного пучка является однородной, определяющей фазой интерференции.

4.3. Физическая реализация входных точек

Схема измерения угла между плоским волновым фронтом и направлением линии базы интерферометра, показанная на рис. 4.1, вполне ясна, если рассматриваются интерферометрические пучки бесконечно малой толщины. Реально интерферирующие пучки имеют размеры, совпадающие с размерами входных апертур. В интерферометре входная апертура определяется только шириной интерферирующего пучка и не зависит от расстояния до поля интерференции. Что же является концами базы при интерференции широких пучков?

Выделенные входными апертурами участки волнового фронта будут интерферировать между собой *синфазно* только в том случае, если они параллельны между собой. Очевидно, что для всех сопряженных точек фронта при их синфазном сложении разности оптических ходов до *любых сопряженных точек* будут одинаковыми.

Любые две сопряженные точки интерферирующих пучков при их синфазном сложении, то есть при постоянной разности оптических ходов в пределах апертуры, могут быть выбраны в качестве концов базы. При этом положение синфазных точек на входной апертуре однозначно определяет длину и направление базы интерферометра. Математически это просто следует из формулы (4.2):

$$\delta = B \cdot \sin \psi = B' \cdot \sin \psi'. \quad (4.7)$$

В поле интерференции при синфазном сложении фронтов наблюдается полоса бесконечной ширины, причем любые точки поля интерференции имеют одно и то же удаление от

сопряженных им *точек волнового фронта*. Если же происходит сложение наклоненных друг к другу фронтов, то в поле интерференции наблюдается картина полос, но для каждой точки поля существует *однозначная связь* между ее удаленностью от связанных с ней сопряженных точек фронта.

Физически интерференционная картина определяется только длиной волны, разностью оптических путей от точки в поле интерференции до каждой из сопряженных точек плоского волнового фронта и расстоянием между этими точками. Расстояние между сопряженными точками играет роль базы B , лежащей в плоскости самого фронта. Поэтому наблюдение интерференционных полос может быть описано одинаково для любой комбинации B и ψ , удовлетворяющей условию

$$B \cdot \sin \psi = \delta = \text{const.}$$

Для того, чтобы задать (зафиксировать в пространстве) базу B и по отношению к ней определить угол ψ , необходимо в пределах входной апертуры *произвольно* выделить две точки и измерить длины оптических путей от точки поля интерференции до этих двух точек, называемых *входными точками*. Определяя независимо расстояния от поля интерференции до входных точек и до сопряженных точек волнового фронта, нетрудно вычислить разность оптических ходов от плоскости волнового фронта до входных точек (величину δ) и определить угол между плоскостью фронта и направлением базы, концы которой совпадают с входными точками.

Поскольку расстояние от точки до плоскости определяется длиной нормали, опущенной из точки на плоскость, при любом расположении входных точек в пределах входных апертур картина измеряемых длин и углов в точности совпадает с изображенной на рис. 4.4. Иными словами, при любом расположении входных точек, определяемая ими база всегда находится в одной плоскости с сопряженными точками волнового фронта, и измеряемый рассмотренным методом угол является *углом между базой и волновым фронтом*. В случае наклонного сложения фронтов фаза интерференции в точке поля интер-

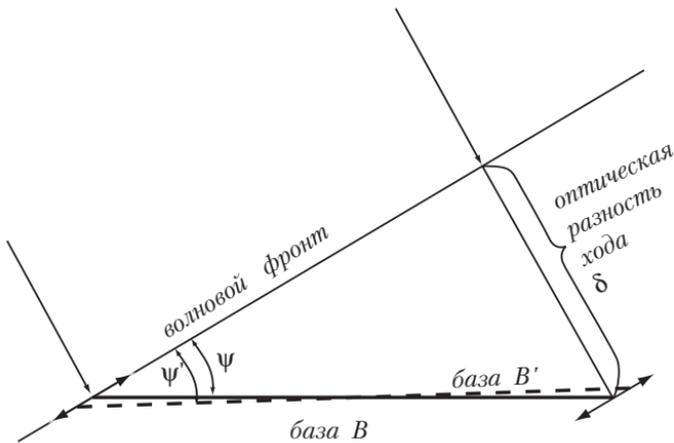


Рис. 4.4. Базой интерферометра являются две любые сопряженные точки интерферирующих участков фронта при их сложении.

ференции определяется разностью оптических ходов от этой точки до плоскости волнового фронта по обоим плечам интерферометра. Измерение таких же оптических ходов до входных точек в каждом плече *определяет* положение входных точек относительно измеряемого волнового фронта.

Физически входные точки могут быть реализованы в виде вершин уголкового отражателей, помещенных в пределах входных апертур. Расстояние от поля интерференции до вершин отражателей, равно как и расстояние между ними, может быть измерено только с помощью специально организованной системы внутренней метрологии.

4.4. Концепция дугомерных измерений. Дугомер-интерферометр с совмещенными базами

Простым интерферометром Майкельсона можно измерить угол между направлением прихода волнового фронта от звезды и направлением базы интерферометра. До тех пор, по-

ка ориентация базы в пространстве не определена, измеренный угол не несет никакой значимой информации. Наземные угломерные наблюдения с применением интерферометров оправданы тем, что концевые телескопы (или радиотелескопы) интерферометров фиксированы относительно поверхности Земли, и может быть установлена связь между положением светил в системе небесных координат и положением светил относительно интерферометра. Помимо этого, последовательное измерение углов прихода волновых фронтов от двух звезд позволяет определить длину дуги между светилами без измерения ориентации базы интерферометра.

В космосе фиксировать ориентацию аппарата очень сложно. Поэтому для проведения астрометрических измерений необходимо использовать два интерферометра с параллельными базами (рис. 4.5).

Обеспечение параллельности баз двух интерферометров — чрезвычайно сложная задача. Даже точное измерение взаимного расположения двух баз в пространстве требует систе-

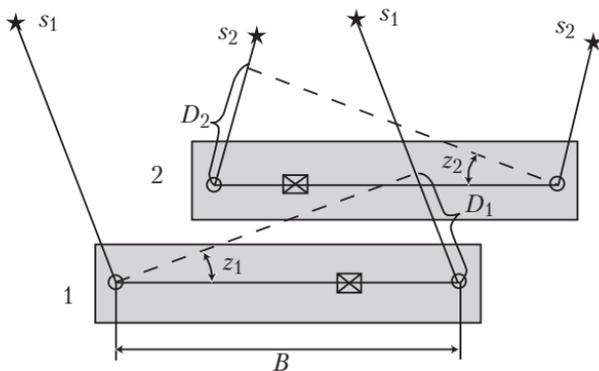


Рис. 4.5. Если интерферометр 1 измеряет направление фронта звезды s_1 , а интерферометр 2 одновременно измеряет направление фронта звезды s_2 , и если базы обоих интерферометров параллельны и лежат в плоскости дуги между этими звездами, то угол между светилами равен сумме измеренных интерферометрами углов.

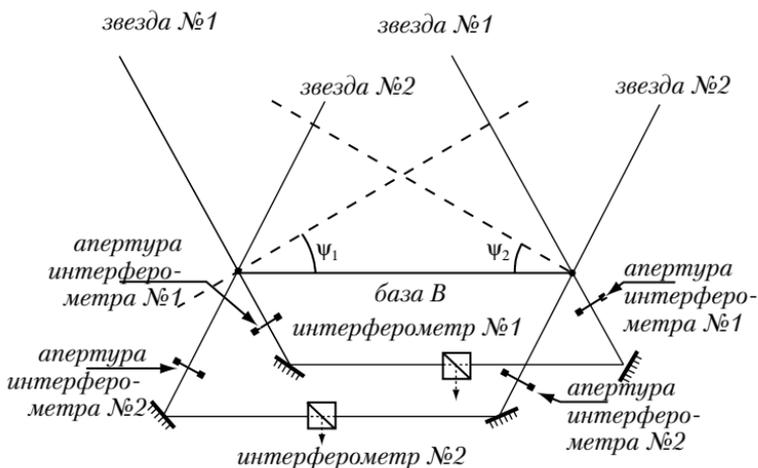


Рис. 4.6. Если два интерферометра Майкельсона расположить так, чтобы их входные точки оказались общими, то получится двойной интерферометр с общей базой. Входные точки должны попадать в апертуры входных телескопов, и этого оказывается достаточно, чтобы отказаться от внешней метрологии.

мы из 32 метрологических измерителей расстояний [109]. Избежать трудностей конструирования двухбазового интерферометра с параллельным расположением баз позволила идея совмещения баз интерферометров (рис. 4.6).

Одновременное измерение направлений на два источника с дугомером с общей базой позволяет при вычислении длины дуги между светилами исключить ориентацию базы, а сама длина дуги оказывается равной $\Psi_{12} = \Psi_1 + \Psi_2$ (рис. 4.6).

Очевидно, что оба наблюдаемые светила и база интерферометров должны лежать в одной плоскости, только при этом условии будет измеряться длина дуги между светилами. Отсюда вытекает необходимость точной ориентации дугомера в пространстве относительно измеряемых дуг (о точности ориентации дугомера см. п. 4.18).

4.5. Схема смесителя и методика выделения ахроматической полосы

Выбор метода выделения ахроматической полосы в интерференционной картине зависит от конструкции смесителя, определяющей сам вид интерференционной картины. В результате рассмотрения основных известных вариантов [41, 112, 98, 110, 109, 124], в проекте ОЗИРИС принят зеркально-линзовый смеситель с диспергирующим элементом, схематически изображенный на рис. 4.7.

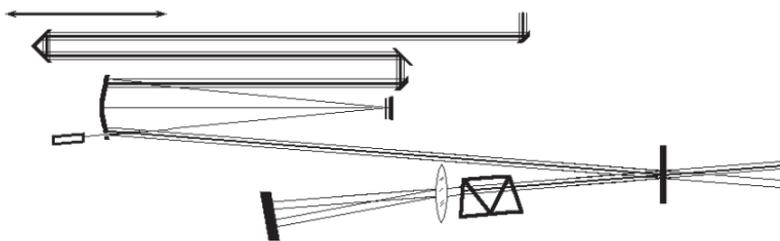


Рис. 4.7. Схема блока смесителя с призмным диспергирующим элементом и вид интерференционной картины.

Для того, чтобы дисперсия была направлена вдоль ахроматической полосы, ребро призмы должно быть параллельно плоскости, содержащей оптические оси интерферирующих пучков. В красной области спектра расстояние между интерференционными полосами больше, чем в синей, что приводит к наклону всех полос, кроме ахроматической. Вследствие нелинейной дисперсии полосы искривляются.

Два идущих навстречу друг другу пучка из системы точного наведения с дифракционным интегратором попадают на светоделитель–смеситель, выполненный в виде плоского полупрозрачного зеркала, и проходят через призму диспергирующего устройства. Интерференция происходит в месте взаимного пересечения пучков, а период полос будет определяться величиной взаимного наклона интерферирующих пучков.

Диспергированные призмой пучки коллимируются в плоскости дисперсии цилиндрической линзой, после которой формируется картина канальных спектров. Если бы линзы не было, то ширина интерферирующего пучка в каждой длине волны перекрывала бы дисперсию, и спектральные каналы из-за наложения пучков не разделялись бы. Линза обеспечивает свертку пучков в направлении дисперсии, и ширина пучка в каждой длине волны сокращается до величины, определяемой разрешением спектрального узла.

Поскольку диспергирующий узел установлен после смесителя, он не вносит искажений в картину интерференции. При отсутствии цилиндрической линзы интерференционная картина могла бы наблюдаться на любом расстоянии от плоскости смесителя. Свертка интерференционной картины в цилиндрической линзе фиксирует локализацию картины канальных спектров в фокальной плоскости линзы.

Выбор показанной на рис. 4.7 схемы смесителя вытекает из идеи использовать панорамный светоприемник, поскольку он может быть использован и в режиме отображения интерференционной картины, и в режиме измерения точных координат центра ахроматической полосы. Первый режим удобно применять для обнаружения ахроматической полосы и выставления ее на середину светоприемника, а второй – для точного измерения ее положения относительно центра приемника. При этом точное положение центра ахроматической полосы относительно концов базы интерферометра вычисляется с учетом данных метрологических измерений положения центра светоприемника относительно концов базы.

4.6. Ориентация интерферирующих пучков

Обязательным условием для синфазного сложения интерферирующих пучков является их тождественная пространственная ориентация. В противном случае разность оптических ходов от точки поля интерференции до сопряженных ей

точек волнового фронта может достигать удвоенной ширины апертуры.

При сведении световых пучков, выделенных входными апертурами, они испытывают серию отражений на оптических элементах прибора. Каждый излом направления распространения пучка изменяет его пространственную ориентацию, поэтому и число отражений в каждом плече интерферометра, и угол взаимного разворота пучков должны быть точно скомпенсированы до сложения пучков в смесителе. Рис. 4.8 иллюстрирует эту идею.

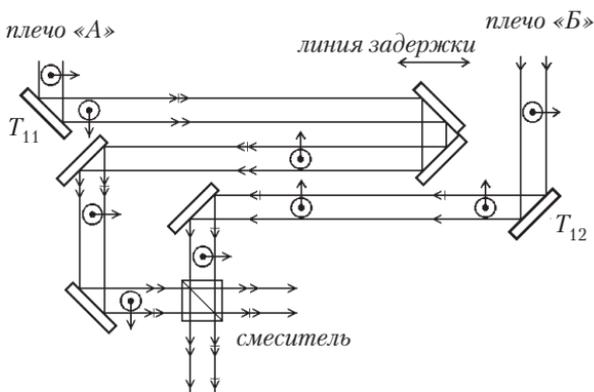


Рис. 4.8. Интерферирующие пучки должны совмещаться с сохранением взаимной пространственной ориентации. В противном случае в поле интерференции будут строиться налагающиеся друг на друга полосы высоких порядков, и картина полос замоеется.

4.7. Принцип определения положения точки равной длины хода

Важной особенностью показанного на рис. 4.7 смесителя является то, что для каждой длины волны, — то есть для каждого значения ординаты на фотокатод светоприемника, — может быть построен инструментальный профиль интерференционных полос. Этот инструментальный профиль являет-

ся функцией только длины волны λ и базы B и легко вычисляется, если задаться соответствием длины волны и координаты на приемнике по калибровке спектрографа и длиной базы B , полученной из метрологических измерений. Накопление фотонных событий следует вести до тех пор, пока ошибка в определении по ним двумерного распределения фотонов, совпадающего с инструментальным профилем, не снизится до заданной величины. При этом положение центра инструментального профиля как раз и составит искомую величину положения центра ахроматической полосы.

Описанная схема поиска будет применена не только для поиска полосы нулевого порядка интерференции звездного пучка, но и для определения полосы нулевого порядка метрологического пучка. Поскольку предполагается применение двухволнового метрологического лазера, условием выхода на полосу нулевого порядка будет равенство ординат полос од- ноименного порядка для обеих длин волн.

4.8. Регистрация интерференционной картины: координато–чувствительный детектор

Накопление слабого сигнала в поле интерференции от измеряемого источника возможно двумя сильно различающимися способами.

Обычно применяется накопление светового сигнала непосредственно на фотокатоде приемника, что позволяет получить суммарную картину с удовлетворительным отношением «сигнал/шум» за счет выбора соответствующего времени накопления. Именно этот вариант выбран разработчиками проекта SIM. Недостатком этого способа является суммирование всех искажений, вносимых в регистрируемую картину во время длительного экспонирования. В частности, дрейф линии визирования телескопов интерферометра приведет к смещению интерференционной картины по поверхности светоприемника, а тепловая нестабильность прибора приведет и к из-

менению длин оптических ходов в плечах интерферометра, и к изменению длины его базы. Поэтому в проекте SIM предусматриваются очень жесткие меры по тепловой стабилизации звездного интерферометра и требования к его пространственной стабилизации.

Вторая возможность заключается в регистрации отдельных фотонных событий с последующим построением регистрируемых изображений наложением на общую картину положений отдельных точек. Этот способ можно применять только в том случае, если для каждого фотонного события отношение «сигнал/шум» велико, и есть возможность выделять значимые события из потока регистрируемых. При этом способе построения полной картины поля интерференции появляется возможность внесения поправок в координаты фотонных событий для учета всякого рода приборных погрешностей.

На наш взгляд, наиболее перспективным для регистрации интерференционной картины в дугомере–интерферометре представляется применение современных светоприемников типа ВКЧД (Время–Координато–Чувствительных Детекторов), позволяющих вести накопление интерференционной картины по второму способу.

ВКЧД имеют такой же квантовый выход, как и ФЭУ, но, практически не уступая им в чувствительности, позволяют регистрировать не только факт прихода фотона (как ФЭУ), но и его координаты на фотоприемнике. В результате сложения большого числа однофотонных событий, зарегистрированных на ВКЧД, можно сформировать на выходе сумматора изображение, соответствующее распределению фотонов на входе приемника, как с обычным панорамным светоприемником.

Помимо этого, добавление временной информации к координатной позволяет использовать корреляционный анализ для фильтрации шумов и проводить коррекцию накапливаемого сигнала за измеряемые в метрологическом канале изменения рабочих параметров дугомера (см. гл. 5). С использованием ВКЧД становится возможной реализация варианта на-

блюдения непосредственно картины полос с высоким контрастом в поле интерференции.

Поскольку выходной сигнал интерферометра Майкельсона в режиме наблюдения системы полос представляет собой вид поля интерференции, отыскание точки с нулевой разностью хода в этом варианте предельно упрощается: сначала ВКЧД накапливает видеосигнал, достаточный для отождествления картины полос и определения их наклона, а после перемещения отражателя линии задержки вдоль оси светового пучка в предвычисленное положение, в котором видна ахроматическая полоса, ВКЧД работает в режиме регистрации единичных фотонных событий.

Сейчас в стадии активной разработки находятся панорамные приемники нового поколения — *Active Pixel Device* (APD), в которых сочетаются большое число элементов разрешения (как в ПЗС-приемниках) и очень большое отношение сигнал/шум. В этих приборах каждый пиксел имеет собственный усилитель с большим коэффициентом усиления, так что выходной сигнал практически свободен от шумов считывания. Если будет реализован режим считывания только от пикселей с сигналом, то такой приемник будет обладать всеми достоинствами ВКЧД, но при этом размер его светочувствительной зоны будет намного больше. В случае реализации APD подобный приемник может быть рекомендован для применения в дугомере-интерферометре вместо ВКЧД.

Преимущества ВКЧД и его аналогов проявятся только при работе со слабыми источниками, наблюдение которых требуют длительного накопления. При наблюдении ярких светил, которые могут формировать интерференционную картину за время, когда девиации прибора не успевают исказить вида интерференционных полос, более удобными представляются ПЗС-матрицы широкого формата. Они могут обеспечить необходимую точность измерений при высокой живучести (ПЗС-приемники в межпланетных миссиях доказали безотказность работы в течение многих лет).

4.9. Величина базы астрометрического интерферометра

Измерение углов в астрометрическом интерферометре сводится к измерению длин базы B и разности оптического хода в двух плечах интерферометра. Последняя величина измеряется как смещение центра полосы нулевого порядка относительно точки равной длины хода до концов базы.

Размер базы интерферометра B определяет достижимую с ним точность угловых измерений. Если требования к единичному измерению ограничены 10 микросекундами дуги, то такая точность может быть достигнута при угловом разрешении $\tau \approx 70$ мс дуги (при условии, что положение центра интерференционной полосы фиксируется с точностью 0,0001 от ее ширины), что в видимом диапазоне с красной границей $\lambda \approx 600$ нм приводит к нижней оценке величины B : длина базы интерферометра должна быть не менее 200 см.

4.10. Требуемая точность измерения положения центра ахроматической полосы

Точность угловых измерений $10\text{мкс} = 5 \cdot 10^{-11}$ рад соответствует относительной точности измерения длин (сторон мерного треугольника) не ниже $\Delta l/l = 5 \cdot 10^{-11}$. При длине базы 2000 мм максимальная ошибка измерения ее длины и положения точки равной длины хода относительно концов базы должна составить не более 0,01 мкм.

Реальный прибор не может обладать стабильностью, соответствующей такой высокой точности измерений. Флуктуации температуры, механические вибрации и нестабильность ориентации самого прибора приводят к отклонениям измеряемых параметров на несколько порядков большим, чем необходимая точность измерений. Единственно приемлемый спо-

соб подавления этих помех³ заключается в метрологическом мониторинге состояния прибора и учете всех изменений его состояния на этапе предварительной обработки потока измерительной информации. Как отмечалось в § 4.8, все поправки за девиации прибора могут быть точно измерены для каждого момента времени, если используется приемник с высоким временным разрешением.

4.11. Приведение результатов измерений координат отдельных фотонных событий в единую систему

Выбор время-координато-чувствительного детектора в качестве панорамного светоприемника обусловлен предоставляемой им возможностью определять точные координаты каждого фотонного события и момента времени, в которое оно произошло. Если одновременно с накоплением измеряемого сигнала проводить непрерывные измерения длины базы B и длин ходов от фиксированной точки в изображении на КЧД до концов базы, то для каждого момента времени прихода фотона от измеряемого источника оба эти параметра могут быть получены непосредственно из результатов метрологических измерений, а измеренные координаты фотонного события исправлены за все подающиеся измерению отклонения. Тем самым все координаты фотонных событий будут представлены в единой системе «замороженного» прибора, что обеспечит применимость описанного в § 4.7 метода измерения положения точки равной длины хода.

Самым существенным моментом в концепции космического астрометрического прибора ОЗИРИС является именно возможность сведения всех измерений в единую систему, что поз-

³В проекте SIM используется концепция прямого подавления всех видов помех. Пространственная стабилизация ориентации SIM обеспечивается с помощью двух «гидирующих» интерферометров, температурная стабильность поддерживается на уровне лучше $0,01^\circ$, а длительное накопление сигнала на приемнике обеспечивает интегрирование остаточных девиаций.

воляет снять ограничения на время накопления сигнала, так как изменения вектора скорости прибора, приводящие к изменениям направления на наблюдаемый источник вследствие абберрации света, могут быть пересчитаны в геометрические искажения наблюдаемой картины и скомпенсированы численным приведением ее к единой системе «замороженного» прибора. Снятие ограничений на время накопления означает, что астрометрические наблюдения с прибором ОЗИРИС могут проводиться с источниками до 18^m .

4.12. Требования к темпу и точности внутренней метрологии для обеспечения угловых измерений с интерферометром

При измерении длины оптического хода в любом плече прибора лазерным интерферометром с длиной волны λ_* точность таких измерений зависит от количества квантов, использованных в единичном измерении для построения интерференционных полос в плоскости локализации интерференционной картины. Если положение полос измеряется с точностью $0,1$ ширины полосы (что соответствует погрешности измерения, равной $0,1\lambda_*$), то дискретность фотоэффекта приводит к погрешности σ_x в величине отсчетов при однократном измерении, нормированной к длине волны интерферометра [30]:

$$\frac{\sigma_x}{\lambda_*} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{eV_{* \max}}{\lambda_* P_*}}, \quad (4.8)$$

где e — заряд электрона, $V_{* \max}$ — максимальная скорость движения отражателя измерительного интерферометра, помещенного на оптической детали, положение которой измеряется, и P_* — мощность лазера в канале измерения.

Это, например, означает, что при мощности измерительного пучка $P_* = 0,1$ мВт и величине световых потерь 10% скорость движения измеряемого узла 20 м/мин приводит к погрешности единичного измерения $\sigma_x/\lambda_* = 0,25 \cdot 10^{-8}$. При ис-

пользовании лазерного источника света такой мощности за минимальное время накопления, за которое перемещение отражателя приведет к изменению положения интерференционных полос на величину погрешности единичного измерения ($0.1\dot{\lambda}_*/V_{*\max} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ сек), на фотоприемник попадет около 10^5 фотонов, необходимых для регистрации положения интерференционной полосы и направления ее перемещения.

Как видно из формулы (4.8), точность измерений метрологического интерферометра линейно зависит от точности определения и поддержания рабочей длины волны λ_* применяемого лазерного источника света. Достигнутая стабильность лазеров для измерений интерференционными методами, т. е. тех, в которых специально приняты все меры для обеспечения этой стабильности, обеспечивает воспроизводимость длины волны λ_* . Реально достигнутая стабильность промышленно освоенного лазера фирмы Хьюлетт-Паккард составляет $[108] \pm 1 \cdot 10^{-7}$. Отечественное приборостроение обеспечивает точность измерения перемещений [30] $\pm 0,32 \cdot 10^{-6}$ на длине 2 м при максимальной скорости перемещения до 0,3 м/сек.

Из приведенного рассмотрения следует, что применение лазерных измерителей перемещений без соответствующих мер стабилизации может ограничить миллисекундным уровнем точность угловых измерений с астрометрическим интерферометром. Для перехода на микросекундный уровень требуется повысить на два порядка относительную точность измерений положений реперных точек прибора.

Для разрешения этой проблемы можно использовать единый высокостабильный лазер для всех каналов измерения положений оптических элементов звездного интерферометра и поддержание в каждом канале высокой мощности измерительного светового потока. Выполнение этого условия позволяет снизить требования к стабильности частоты лазера (по сравнению с независимыми измерителями перемещений), так как при этом все длины измеряются в одной шкале, и относительная точность их измерений оказывается выше уровня стабильности лазера в течение времени одного акта измерений.

4.13. Влияние искажений волнового фронта оптическими элементами на вид интерференционной картины

Приходящий от звезды фронт световой волны является идеально плоским. После отражений от зеркал оптической системы волновой фронт перестает быть плоским вследствие отклонений формы отражающих поверхностей от расчетных. В результате в смесителе складываются не совсем плоские фронты, и сложение не является синфазным, как при наблюдении бесконечной полосы равной толщины, или приводит к искажению формы интерференционных полос при наблюдении системы полос. При малых отклонениях формы оптических поверхностей от плоскости можно считать, что каждой точке интерференционной картины соответствует свое значение дополнительной разности фаз, вызванной несовершенством оптики. Если рассматривать сечение светового пучка в системе координат, связанной со светоприемником, и ориентированной так, что ось X направлена вдоль направления базы интерферометра, то искажения волнового фронта в каждом из плеч, равно как и непосредственно в картине интерференции, можно однозначно описать как функцию координат x, y . Поскольку вероятность регистрации фотона в точке с координатами x, y на светоприемнике является функцией его длины волны λ , разности хода $\Delta(x)$ и дополнительной разности хода $d\Delta(x, y)$, вызванной искажениями в оптике и зависящей от положения луча в световом пучке (причем $d\Delta(x, y)$ является чисто инструментальным параметром), то за последнюю величину можно вводить соответствующую поправку при определении $\Delta(x)$ каждого фотонного события.

Иными словами, можно измерить и учесть при обработке результатов измерений интерференционной картины не только искажения, вызванные нестабильностью геометрии прибора, но и искажения плоской формы волнового фронта оптическими элементами, если, конечно, искажения формы первоначально плоского фронта элементами оптики интерферомет-

ра предварительно табулируются или измеряются в реальном масштабе времени.

Однако, следует оговориться, что все сказанное применимо только к регистрации монохроматического излучения.

В интерферометре-дугомере ОЗИРИС применена схема с дифракционным интегратором волновых искажений на оптических элементах прибора, благодаря которой вклад этих искажений в результаты измерений парируется полностью, а при наблюдении ярких источников обеспечивается полноапертурная метрология измерительных каналов.

4.14. Дифракционный интегратор волновых искажений

Для определения углов прихода волнового фронта от звезды на микросекундном уровне необходимо измерять разности хода на концах базы с точностью порядка 0,0001 длины волны. Это является серьезной проблемой даже для самых современных автоматизированных средств интерферометрических измерений. Реальные технологические возможности не могут пока обеспечить изготовление оптических поверхностей с точностями лучше 0,01 длины волны. Поэтому одной из ключевых проблем разработки астрометрического дугомера–интерферометра является задача контроля искажений волнового фронта по апертуре измерительного пучка.

Для решения этой задачи предлагается использовать принцип пространственной фильтрации звездных пучков при дифракции их на зеркальном экране соразмерным с кружком Эйри в точном канале наведения. Принцип формирования дифракционного эталонного сферического волнового фронта впервые был предложен академиком В.П. Линником [37].

Для решения задачи контроля искажений волнового фронта по апертуре измерительного пучка далее используется вторая ступень наведения на звездный источник (см. § 4.5). Она располагается на выходе непосредственно перед светоделителем интерферометра, и после нее уже происходит сложение

ние пучков из обоих плеч звездного интерферометра. В случае точного наведения на звезду ее изображение на зеркальном участке приемника второй ступени отражает свет как дифракционный источник, формирующий идеальную сферическую волну. Остаточные aberrации пучков отфильтровываются и не участвуют в формировании результирующей интерференционной картины.

4.15. Учет систематических ошибок измерений, вызванных искажением волнового фронта звезды

К причинам, вызывающим систематические отклонения формы приходящего от звезды фронта или его фазы, следует отнести:

- тепловые деформации формы поверхности оптических деталей;
- изменения положения и ориентации оптических деталей, вызванные нестабильностью температуры;
- изменения положения и ориентации оптических деталей, вызванные несовершенством механических узлов (приводов телескопов, несоосностью каретки линии задержки с оптической осью и т.д.);
- изменения фазы интерференции, вызванные изменениями ориентации интерферометра по отношению к линии визирования и aberrациями света, и связанные с неинерциальным характером движения интерферометра во время измерений.

Первые три причины систематических отклонений необходимо, с одной стороны, минимизировать за счет термостабилизации всех элементов оптического тракта и систем демпфирования возникающих колебаний, а с другой стороны, непрерывно проводить измерения остаточных отклонений (в метрологических каналах) для их последующего учета при обработке результатов измерений. Минимизация тепловых девиаций сводится в дугомере ОЗИРИС к уменьшению скорости вызванных ими изменений измеряемой фазы до уров-

на, позволяющего их измерять метрологической системой, и к прекращению измерений во время тепловых ударов, при которых метрологическая система не успевает отслеживать происходящие изменения.

Последняя причина требует обеспечения пространственной стабилизации всего прибора с точностью, при которой ориентация базы не меняется за время измерения направления на яркую звезду. В этом случае пространственная девиация направления базы будет отслеживаться данными одного из интерферометров, что позволит вносить коррекцию в поток измерений второго интерферометра. Во время измерений прибор не должен корректировать свое положение. В случае потери ориентации (выход за пределы допустимой точности ориентации) на время ее восстановления измерения должны прерываться.

4.16. Учет ошибок измерений, вызванных случайными факторами

Помимо ошибок измерений фазы интерференции, вызванных систематическими отклонениями волнового фронта оптическими элементами, будут иметь место ошибки, носящие случайный характер. К ним относятся:

- а) случайные отклонения фазы интерференции отдельных фотонов от истинного значения, подчиняющиеся распределению Пуассона;
- б) отклонения фазы интерференции, связанные со случайным распределением отдельных фотонов по апертуре;
- в) отклонения фазы интерференции, связанные со случайным распределением фотонов по спектральной полосе;
- г) ошибки измерений, связанные с фотонным шумом;
- д) разброс результатов измерений, связанный с конечностью размеров источника излучения.

Функция, описывающая картину полос в интерферометре Майкельсона, сама по себе является описанием статистической характеристики случайного процесса. Если мы рассматриваем поведение потока отдельных фотонов, то эта функция описывает распределение вероятности регистрации фотона по полю интерференции. Поскольку фотонный поток является однородным пуассоновским процессом, случайные отклонения фазы интерференции отдельных фотонов от истинного значения описываются формулой Гаусса со средним значением, совпадающим с истинным значением фазы интерференции (см., например, [108]). Отсюда следует, что усреднение фаз интерференции отдельных фотонов позволяет вычислить среднее (истинное) значение фазы интерференции с точностью, определяемой продолжительностью интервала наблюдений.

Наблюдение слабых источников означает, в первую очередь, что приходится иметь дело со световыми потоками, представленными единичными фотонами в секунду. Точность измерения любого распределения этих фотонов будет определяться пуассоновским характером фотонных событий, для которого стандартное отклонение равно квадратному корню из ожидаемого числа событий. Следовательно, как в случае стабильной геометрии интерферометра, так и в случае жесткой привязки результатов измерений отдельных фотонных событий к математической модели исправленного за искажения интерферометра, можно оценить число зарегистрированных фотонов, которое обеспечит достижение заданной точности измерений. И даже в том случае, когда «исправленная за искажения» модель интерферометра может быть задана только статистически, можно определить то минимальное число квантов, регистрация которых приведет к достижению требуемой точности измерений.

Последний фактор случайного характера, который приводит к разбросу результатов измерений, связан с конечностью размеров источника излучения. Измерения направления на источник будут относиться к фотометрическому центру ис-

точника. Если источником является звезда с равномерным распределением яркости по диску (или с симметричным потемнением к краю), то результаты измерения направления на источник будут относиться к центру звезды. Если же поверхность звезды окажется «пятнистой», это приведет к искажению результата измерений направления на ее центр.

Принципиальное ограничение точности интерференционных измерений, которое не удастся устранить никакими аппаратными мерами, вносит фотонный шум излучения. Примем, что среднеквадратичное значение погрешности измерения дробной части порядка интерференции, обусловленной фотонным шумом, равно 10^{-3} , что при $\lambda = 0.5$ мкм и $B = 2$ м соответствует погрешности измерений угла Ψ , равной 50 мкс дуги. Если допустить, что данная составляющая погрешности измерений составляет 50% от суммарной погрешности измерений Ψ , а погрешность определения направления на яркую звезду в 2–3 раза меньше, то погрешность одного измерения угла дуги будет приблизительно равна 120 мкс. Повторив измерения угла дуги несколько раз и используя при постериорной обработке результатов измерений данные измерений других пар звезд, обеспечивающие астрометрическое замыкание (closure), можно уменьшить указанную погрешность на порядок величины до значений 15–20 мкс дуги.

Можно показать, что среднеквадратичное отклонение случайной погрешности $\delta\varepsilon_{\min}$ измерений дробной части порядка интерференции ε , обусловленной фотонным шумом, определяется выражением:

$$\delta\varepsilon_{\min} = 1/[\pi V \sqrt{2N}], \quad (4.9)$$

где V — видность интерференционных полос, N — число регистрируемых фотонов. Число регистрируемых фотонов приблизительно равно:

$$N = 2QA\Delta\lambda\tau I, \quad (4.10)$$

где Q — квантовая эффективность фотоприемника, $A = \pi D^2/4$ — площадь одной входной апертуры, D — диаметр главного зеркала телескопической системы, $\Delta\lambda$ — регистрируемый интервал длин волн, τ — время накопления, I — интенсивность потока фотонов (*photon rate*), измеряемая в [фотон/($\text{\AA} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}$)].

Из (4.9) для $V = 0.7$ и $\delta\varepsilon_{\min} = 10^{-3}$ получаем необходимое число регистрируемых фотонов $N = 5 \cdot 10^4$. Используя выражение (4.10), можно определить, что для $N = 5 \cdot 10^4$ и реальных параметров инструмента типа ОЗИРИС: $Q = 0.1$, $A = 700 \text{ см}^2$, что соответствует $D = 30 \text{ см}$; и $\Delta\lambda = 5000 \text{ \AA}$ ($\lambda_{\min} = 3000 \text{ \AA}$, $\lambda_{\max} = 8000 \text{ \AA}$) необходимое время накопления τ равно приблизительно 0.2 секунды для звезды 8-ой величины и 38 минут — для звезды 18-ой величины.

Для более полного учета влияния различных воздействующих на результаты измерений факторов в течение времени, необходимого для накопления информации о положении слабой звезды, нам представляется возможным считывать показания нескольких метрологических устройств с частотой 50 Гц. Эти показания содержат информацию о положении линий задержки, т.е. δ , об изменении δ_{int} , получаемую от соответствующего внутреннего лазерного интерферометра, и об изменениях базовых длин. Заметим, что информация об отклонениях разности хода от нулевой в интерферометре «яркой звезды» может быть получена как из показаний измерителя перемещений отражателя линии задержки, так и ю сигнала ошибки устройства автоматического наведения на центр ахроматической полосы. Для считывания этой информации с частотой 50 Гц время накопления в детекторе интерференционных полос, получаемых от света яркой звезды, не должно превышать 0.01–0.02 с.

Расчет по формулам (4.9, 4.10) при $\tau = 0.02 \text{ с}$, $m = 8$ и приведенных выше параметрах инструмента дает $\delta\varepsilon_{\min} = 3.4 \cdot 10^{-3}$ для одного измерения ε , что соответствует астрометрической погрешности 170 мкс дуги. Однако за время, необходимое для одного измерения углового положения слабой звезды (от 30 с

до 40 мин), число таких измерений превысит 1500. Вследствие этого после обработки результатов измерений составляющая погрешности одного измерения дуги, обусловленная фотонным шумом излучения яркой звезды, не превысит 5 мкс дуги.

4.17. Оптическая схема двухбазового дугомера-интерферометра

Работа дугомера по схеме двухбазового интерферометра Майкельсона с общей базой требует наведения на звезды S_1 и S_2 телескопов, поворачиваемых относительно параллельных осей OO поворота телескопов, установленных на противоположных концах базы. Для полного совмещения параллельных интерферирующих пучков необходимо, чтобы каждый из них был сформирован из дифракционных изображений звезд, формируемых этими телескопами.

Принципиальная оптическая схема дугомера-интерферометра содержит четыре одинаковых телескопа, способные наводиться в плоскости, ортогональной параллельным осям OO на противоположных концах базы. Каждый телескоп пары наводится на источник независимо. Поле зрения каналов грубого и точного наведения существенно превышает рабочее поле звездного канала интерферометра.

Внеосевые главные зеркала телескопов T_{11} и T_{21} фокусируют пучки от звездных источников по разные стороны от конца базы на оси поворота OO .

На рис. 4.9 приведена общая схема одного из плеч интерферометров (все четыре плеча имеют тождественные схемы).

Свет, собранный главным внеосевым зеркалом T_{11} 1, фокусируется им в фокальной плоскости, в которой лежит ось вращения телескопа OO . В месте пересечения оптической оси зеркала 1 и оси вращения телескопа установлено диагональное зеркало 2 с центральным отверстием. Световой поток, направленный с осью визирования телескопа, проходит через отверстие в зеркале 2 и попадает на вторичное внеосевое зеркало 3, которое преобразует световой пучок в параллель-

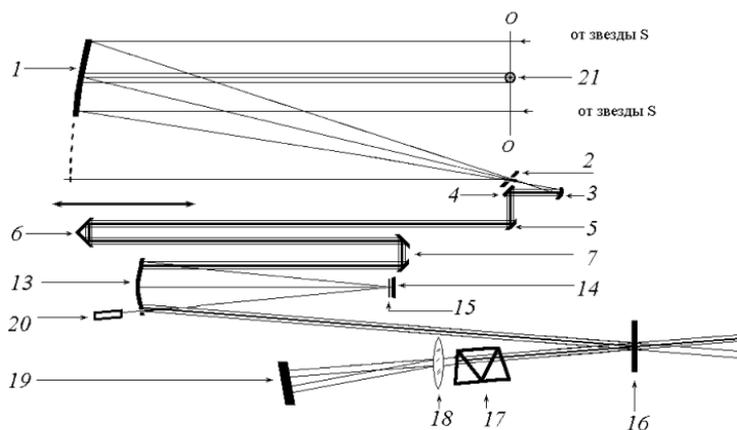


Рис. 4.9. Оптическая схема одного плеча интерферометра без детализации узла канала грубого наведения, приведенного на рис. 4.10. Пояснения в тексте § 4.17, 4.18.

ный и посылает его на диагональное зеркало 4, расположенное на оси вращения телескопа. После диагонального зеркала 4 световой пучок идет параллельно оси вращения телескопа и выходит через полую ось вращения к оптическим элементам, неподвижно размещенным на оптической скамье интерферометра.

Оптический блок, включающий в себя главное 1 и вторичное 3 параболические зеркала и диагональные зеркала 2 и 4, образует афокальный телескоп-кондensor по схеме Мерсена с выведением светового пучка по схеме Нэсмита.

Вышедший из телескопа световой пучок отражается диагональным зеркалом 5 на уголкового отражателя линии задержки, установленный на подвижной каретке. Возвращенный уголкового отражателем пучок попадает на концевой отражатель линии задержки 7, который направляет свет на сферическое зеркало 13. Сферическое зеркало фокусирует свет на ПЗС-приемнике канала точного наведения 14. Непосредственно перед приемником установлена плоская кварцевая

пластинка с зеркальным пятном 15, диаметр которого равен диаметру кружка Эри. При точном наведении линии визирования на программный источник зеркальное пятно отразит световой поток в пределах кружка Эри обратно на зеркало 13, которое вновь преобразует пучок в параллельный и направит его на смеситель световых пучков 16. Смешанный свет от двух плеч интерферометра поступает на призменный диспергирующий элемент 17 с расположенной за ним цилиндрической линзой 18. В фокальной плоскости линзы 18 расположен панорамный светоприемник 19. На рис. 4.9 не показаны спектрограф и светоприемник для регистрации картины картины интерференции во втором пучке после светоделиителя.

В сферическом зеркале 13 точно на оптической оси имеется отверстие, в которое вводится лазерный световой пучок метрологической системы непосредственно на зеркальный пятнышко 15.

Работа оптических элементов рассмотрена ниже поочередно.

4.18. Система наведения телескопов интерферометра на светила

Для высокоточного наведения телескопов дугомера–интерферометра на точечный источник используется изображение звездного неба, которое строится оптикой каждого телескопа независимо от другого телескопа.

Излучение, отраженное от главного зеркала 1, отражается затем от плоского зеркала 2 с отверстием в центре, ограничивающим поле в 6 угловых минут (рис. 4.10). Новое отклоняющее плоское зеркало 8 направляет излучение на сферическое вторичное зеркало 9. Вторичное зеркало 9 имеет наклон 8° для вывода излучения, вторично отраженного от плоского зеркала 8, из области оси вращения телескопа и направления его на двухлинзовый объектив 10–10, который с уменьшением изображает плоское зеркало 2 на матричном приемнике 12. Поскольку на плоском зеркале 2 локализована фокальная по-

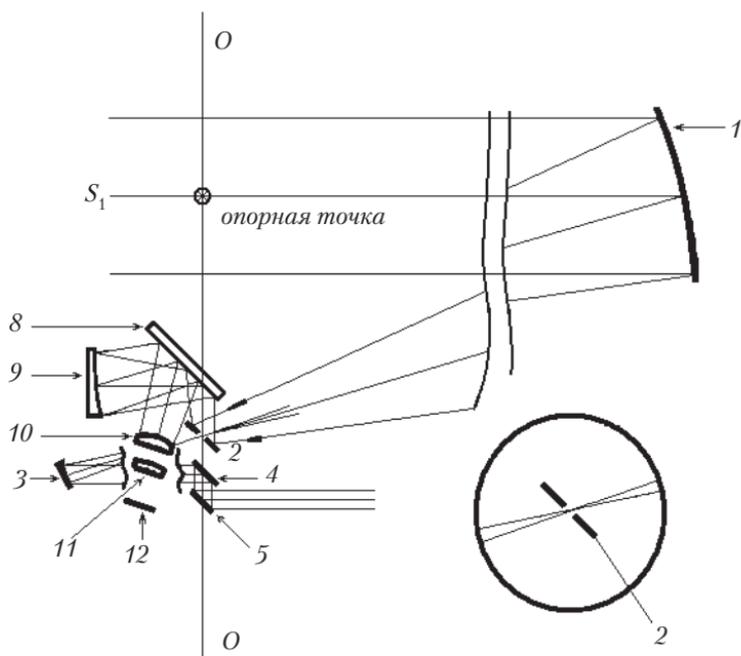


Рис. 4.10. Схема канала грубого наведения телескопа (пояснения в тексте § 4.18).

верхность главного зеркала 1, на приемнике 12 строится изображение звездного неба в окрестности точки визирования.

Из конструктивных соображений диаметры главных зеркал концевых телескопов составляют 200 мм, так что угловой радиус дифракционного изображения точечного источника в их фокальных плоскостях составит около $0,7''$ для видимого диапазона спектра. Следовательно, должна обеспечиваться погрешность наведения на светило и поддержание ориентации оси визирования телескопа не более $\delta\varphi = 0,07''$. Никакая механическая система сопряжения телескопов с гидирующими устройствами не позволяет обеспечить таких параметров. Поэтому оптическая схема дугомера–интерферометра ОЗИРИС предусматривает ориентацию всего инструмента

и осей визирования составляющих его телескопов непосредственно по изображениям звездных полей, формируемых оптикой самих телескопов.

В дугомере-интерферометре ОЗИРИС наведение на измеряемый объект производится в два этапа (рис. 4.11–4.14). Сначала определяется ориентация инструмента в пространстве по звездному узору в канале предварительного или «грубого» наведения. На первый матричный приемник проецируется первичное изображение звездного узора с полем зрения 1° . С помощью матричного приемника и системы регистрации грубого канала звездный узор идентифицируется и осуществляется определение ориентации оптической оси телескопа в системе небесных координат. После наведения T_{11} на выбранный звездный источник его изображение исчезает из поля зрения грубого канала, а излучение от него проваливается в отверстие диагонального зеркала 2, расположенного в фокусе главного зеркала 1 телескопа T_{11} . Угловой размер отверстия равен $6'$. Это излучение поступает в точный канал наведения.

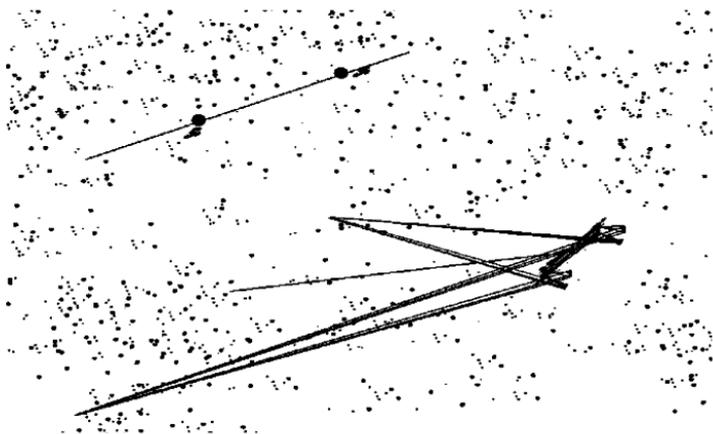


Рис. 4.11. На начальной стадии ориентации дугомера по звездным узорам в грубых каналах телескопов определяются направления визирования и вычисляются координаты программных объектов.

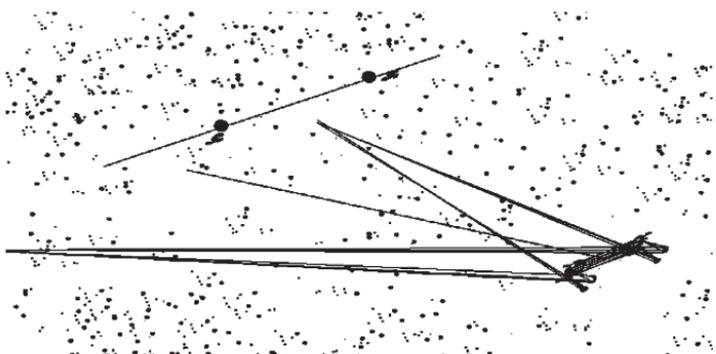


Рис. 4.12. На второй стадии происходит разворот всего спутника так, чтобы плоскость программной дуги совпала с плоскостью, в которой находятся линии визирования телескопов.

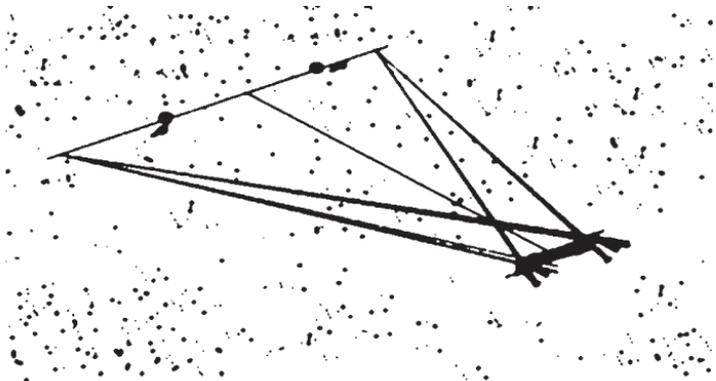


Рис. 4.13. Завершением ориентации спутника является выставление его в положение, при котором нормаль к базе совпадает с серединой дуги между программными светилами.

Точный канал наведения предназначен для определения координат оси визирования телескопа по положению изображения опорного звездного источника на втором матричном приемнике 14. Поскольку координаты программного объекта известны с точностью не хуже $0,01''$, в том числе и относительно опорного звездного источника, по положению по-

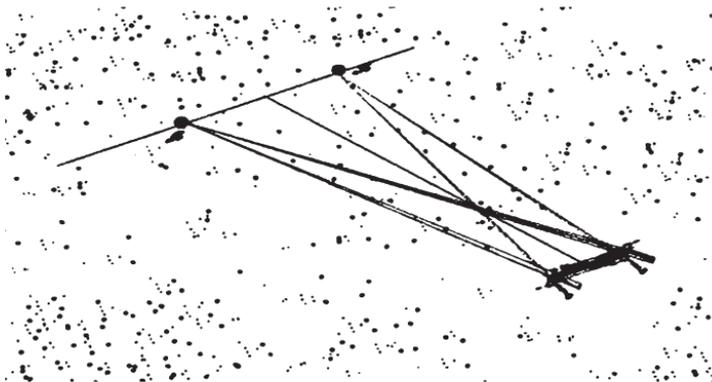


Рис. 4.14. Точное наведение на программные источники осуществляется разворотом телескопов вокруг оси их вращения, которое контролируется каналами грубого и точного наведения.

следнего на втором матричном приемнике определяется рас-согласование положений оси телескопа и программного объ-екта и обеспечивается точное наведение на последний. В слу-чае наблюдения яркой звезды наведение на нее осуществляет-ся непосредственно по ее изображению на втором матричном приемнике.

Вблизи этого приемника на примыкающей к нему про-зрачной пластине располагается зеркальный участок 15 с уг-ловым размером, соответствующим диаметру кружка Эйри для звездного пучка, фокусируемого внеосевым участком па-раболического зеркала 13. Зеркальное пятно позволяет пол-ностью передать излучение наблюдаемого источника в преде-лах центрального максимума дифракционного изображения на светоделитель. Одновременно такой размер позволяет про-пустить без искажений в обратном ходе лазерный пучок си-стемы внутренней метрологии, формируемый от лазера 20. Диаметр этого пучка в несколько раз меньше рабочего звезд-ного пучка.

Вторая пара пучков направляется в аналогичную вторую ступень точного канала наведения, дублирующую первую, и позволяющую как сохранять фотонный сигнал от источников

и сократить время накопления, так и резервировать измерительный канал в случае выхода из строя одного из финишных светоприемников.

Несколько сложнее проходит наведение на слабый источник. Его яркости просто недостаточно, чтобы с кадровой частотой, равной метрологической, можно было увидеть источник на приемниках грубого или точного каналов. В дугомере ОЗИРИС наведение на слабый источник должно проводиться по измерению положения достаточно яркой звезды, близко расположенной к слабому программному объекту (рис. 4.15). Точное взаимное расположение гидирующей звезды и программного объекта определяется на стадии подготовки входного каталога. Гидирующая звезда не должна отстоять от программного объекта далее, чем на $3'$ (половина поля зрения канала точного наведения).

При масштабе $0,05''$ на приемнике точного канала все его поле будет перекрыто матрицей 1200×1200 пикселов. Считывание с матрицы такого размера полнокадровых изображений с телевизионной кадровой частотой невыполнимо на имеющейся элементной базе электронных компонент. Однако, поскольку в поле зрения этого приемника будет находиться лишь один видимый объект, а остальные пикселы будут просто темными, может быть реализован режим считывания части кадра, используемого для наведения (гидирования). Использование этого режима допускает установку в канале точного наведения матрицы большего формата, что может повысить точность выставления источника на зеркальный пятачок.

4.19. Схема проведения дугомерных измерений с интерферометром ОЗИРИС

Наведение телескопов на программные светила осуществляется с точностью до дифракционного предела, определяемого размером входной апертуры. При точном наведении световые пучки проходят в измерительный канал, где регистрируется интерференционная картина.

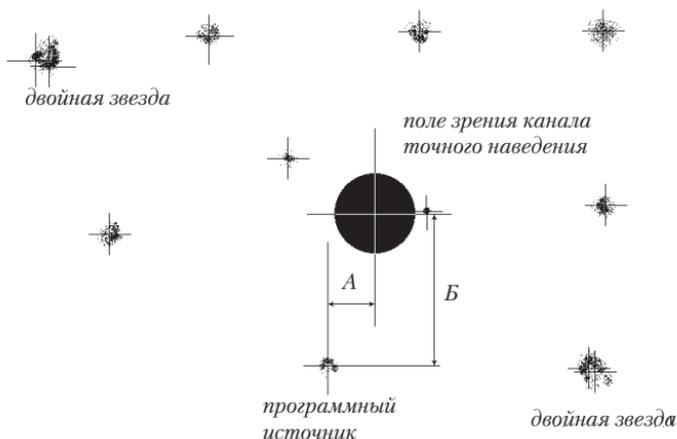


Рис. 4.15. Схематический вид звездного узора в канале грубого наведения. Узор из изображений звезд поля, искаженных абберациями внеосевого главного зеркала, анализируется как система точечных объектов, совпадающих с фотометрическими центрами изображений. Поскольку координаты центра диафрагмы в поле зрения известны, легко вычислить требуемые поворот телескопа «А» и доворот прибора «Б», чтобы программный источник провалился в канал точного наведения.

Вместе с тем само появление интерференционной картины означает только сведение пучков от разных плеч интерферометра. Для проведения измерений необходимо измерить разность оптических ходов в двух плечах интерферометра. Она точно равна нулю для центра ахроматической полосы нулевого порядка. По виду картины полос на светоприемнике (от яркой звезды — рис. 4.3) определяется направление, в котором необходимо переместить концевой отражатель линии задержки, чтобы выйти на полосу нулевого порядка (рис. 4.16). После выставления в нужное положение линии задержки на приемнике видна вертикальная полоса интерференции нулевого порядка (рис. 4.17).

Во время измерений вследствие дрейфа инструмента полоса неизбежно смещается по приемнику. Световой поток от

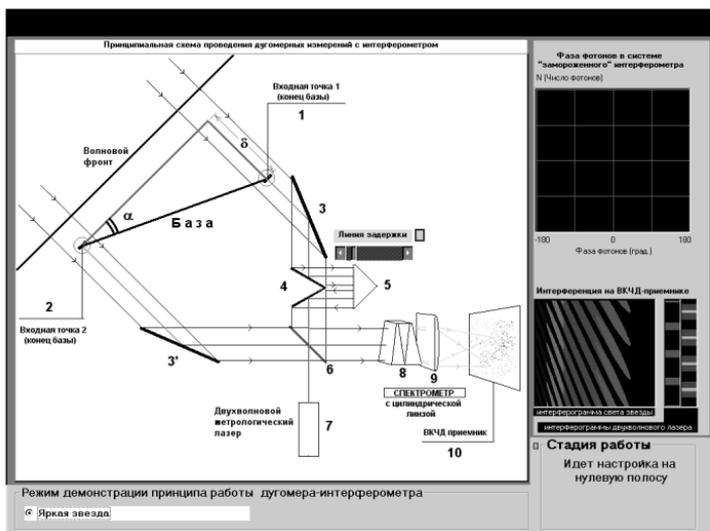


Рис. 4.16. Как только свет от яркой звезды после наведения на нее обоих концевых телескопов попадает в канал измерений, на финишном приемнике возникает картина полос. Их наклон говорит о том, что концевой отражатель линии задержки необходимо переместить, чтобы на приемнике оказалась видна полоса нулевого порядка интерференции.

яркой звезды достаточен, чтобы направление на нее относительно базы измерялось с заданной точностью с метрологической частотой. Однако, если скорость дрейфа полосы по приемнику настолько велика, что невозможно проводить измерения ее положения с необходимой точностью с метрологической частотой, выдается команда на прерывание измерений и на восстановление ориентации прибора. Некоторые особенности процесса измерений с интерферометром проиллюстрированы рисунками 4.16–4.20.

Результаты измерений положения яркой звезды используются для оценки положения слабого программного источника: поскольку его координаты известны с точностью не хуже $0,01''$, то можно вычислить ожидаемое положение линии

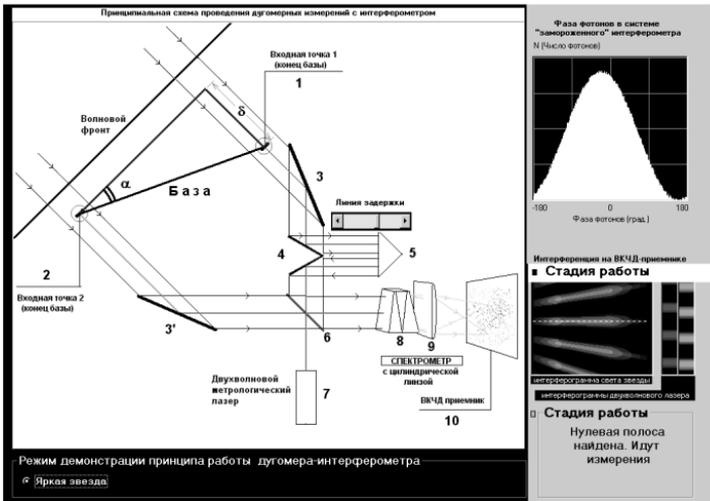


Рис. 4.17. После выставления линии задержки в положение, при котором на финишном приемнике видна полоса нулевого порядка интерференции, в канале измерений яркой звезды с метрологической частотой проводятся измерения положения звезды относительно базы. Для этого на том же финишном приемнике измеряются положения полос метрологических каналов измерений расстояний до входных точек и длины базы (на схематическом рисунке показаны полосы только одного канала).

задержки, соответствующее выставлению ее на центр полосы нулевого порядка в канале слабой звезды. Точности предварительного каталога достаточно, чтобы после выставления линии задержки в поле интерференции наблюдались непосредственно окрестности этой полосы. Поэтому в канале измерения слабой звезды сначала идет выставление линии задержки в предвычисленное положение, после чего выдается команда на начало измерений.

Наблюдение слабого источника сводится к построению картины интерференции методом наложения координат отдельных фотонных событий. Координаты каждого фотона ре-

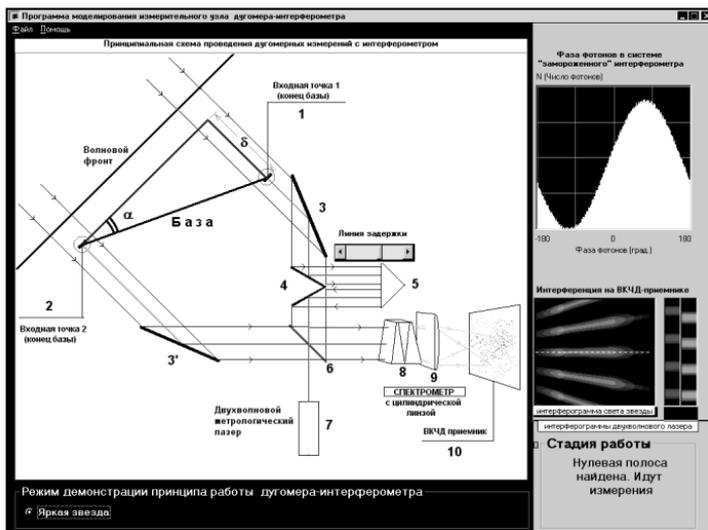


Рис. 4.18. Во время проведения измерений не допускаются никакие гидировки прибора. Остаточный дрейф ориентации дугомера приводит к тому, что полоса нулевого порядка от яркой звезды смещается по финишному приемнику. Соответствующее этому смещению изменение угла между звездой и базой интерферометра используется для введения поправок за дрейф прибора в измерения, проводимые в канале слабой звезды.

дуцируются за все девиации прибора, в том числе и за изменение его пространственной ориентации, измеряемой в канале яркой звезды.

Допустимая величина девиаций определяется частотой метрологических измерений. Поскольку в них с высокой точностью измеряется только дробная часть фазы, суммарные девиации прибора не должны превышать половины периода интерференционных полос; если скорость девиации превышает установленный предел, измерения прерываются и выдается команда на восстановление ориентации прибора или на ожидание прекращения девиаций, вызванных механическими или тепловыми волнами. После восстановления штатных режи-

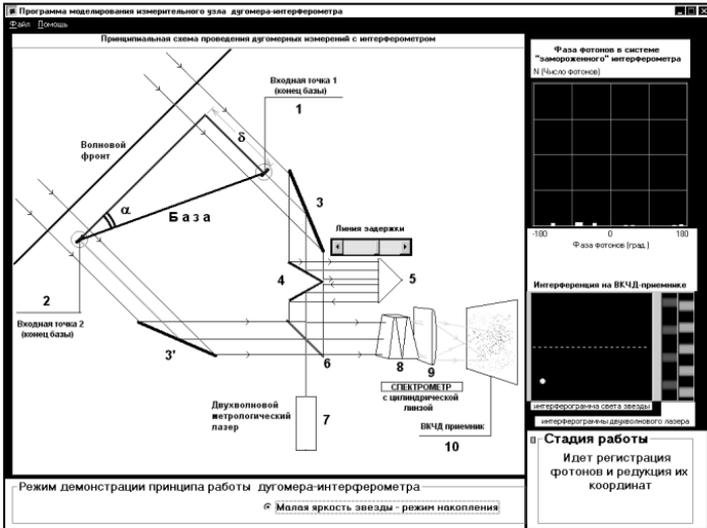


Рис. 4.19. После наведения на слабый источник концевых телескопов по соседней яркой звезде и установки линии задержки в расчетное положение, на финишном приемнике начинается регистрация отдельных фотонных событий. Каждое из них характеризуется длиной волны (на рисунке — вдоль горизонтальной оси) и фазой (по вертикали). Фазовая координата каждого события редуцируется на систему «замороженного» прибора, т. е. вводятся поправки за все изменения в состоянии и ориентации прибора, которые измерены метрологической системой.

мов накопления измерения могут быть продолжены без потери информации от прерывания измерений, поскольку весь пересчет координат фотонных событий проводится на фиксированный набор параметров дугомера.

Прерывание измерений возможно по разным причинам. Помимо превышения допустимой скорости девиаций, ими могут быть выход наблюдаемого источника из зоны видимости, приближение к источнику сильной засветки, вход в область неприемлемых гравитационных искажений луча, потеря требуемой точности координатного обеспечения орбитальных измерений и т.д.

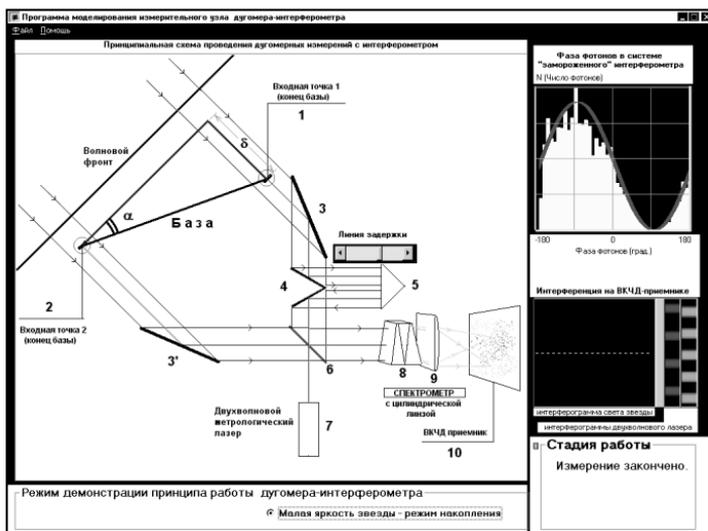


Рис. 4.20. В канале измерений слабой звезды накопление ведется до тех пор, пока полученная картина интерференционной полосы не позволит определить положение ее центра с заданной точностью.

4.20. Метрологическая система двухбазового интерферометра

Для выявления способов обеспечения микросекундных точностей двухбазового звездного интерферометра Майкельсона рассмотрим формулу для разности хода в одиночном звездном интерферометре Майкельсона:

$$\delta = \delta_{ext} + \delta_{int} = B \cdot s + \delta_{int} = B \cdot \cos \psi + \delta_{int}, \quad (4.11)$$

где δ_{ext} , δ_{int} — внешняя и внутренняя разность хода соответственно, B — вектор базы, s — единичный вектор направления на звезду.

Из анализа формулы (4.11) следует, что если δ_{int} изменяется с помощью подвижной линии задержки таким образом, что полная разность хода δ будет равна нулю или какому-либо

другому, известному с необходимой точностью значению, то направление на звезду может быть определено путем измерения смещения подвижного элемента линии задержки. Этот вариант осуществления измерений наиболее предпочтителен, так как измерение перемещений существенно проще, чем абсолютное измерение расстояний, и может быть выполнено с более высокой точностью.

Наиболее ответственной процедурой при этом является предварительное определение с необходимой точностью длины оптического хода в звездном канале (положения подвижного элемента линии задержки), которое принимается за начало отсчета. Удобно, например, принять за начало отсчета координату положения подвижного элемента, которое соответствует $\delta_{int} = 0$ при направлении световых лучей от звезды перпендикулярно базовой линии. После этой процедуры накопительная измерительная система интерференционного измерителя перемещений будет измерять смещение относительно указанного начального положения. При произвольном или планируемом выключении измерителя перемещений информация о начале отсчета будет потеряна, и процедуру фиксации начала отсчета необходимо повторить. Очевидно, что в процессе измерений средствами лазерной метрологии следует определять также длину базы B и, кроме того, изменения δ_{int} .

Для слабых источников света со звездной величиной, превышающей $12^m \div 15^m$, точная регистрация суммарной разности хода δ в реальном времени невозможна из-за малого числа регистрируемых квантов света в единицу времени. В этом случае подвижный элемент линии задержки может быть установлен в некоторое положение, при котором $\delta \approx 0$. Координата этого положения может быть вычислена на основе имеющихся астрометрических данных о программном объекте, параметрах орбиты и текущего положения космического корабля на ней и сведений о положении базы интерферометра в пространстве (на основании текущих измерений углового положения яркой звезды относительно базы). Указанное значение δ , не превышающее длину волны λ_* , можно измерить детекто-

ром положения интерференционных полос (fringe detector), использующим метрологический пучок света. Время одного измерения для очень слабых источников света может достигать нескольких часов. Если при этом с необходимой точностью регистрируется положение подвижного элемента, то δ_{int} также может быть точно определено, и по значениям δ и δ_{int} могут быть рассчитаны δ_{ext} и угол ψ .

Имеется еще один (третий) вариант осуществления рассматриваемого принципа измерений. Если зафиксировать начальное положение подвижного элемента линии задержки с субнанометровой точностью затруднительно, то угловое положение астрономического объекта можно определить из уравнения (4.11), выполнив абсолютные измерения суммарной разности хода δ и внутренней разности хода δ_{int} . Угол дуги между контролируруемыми звездами может быть рассчитан по формуле:

$$\Psi^* = \psi_1 - \psi_2 = \arcsin \frac{\delta - \delta_{1int}}{B} - \arcsin \frac{\delta - \delta_{2int}}{B}. \quad (4.12)$$

В данном случае δ или устанавливается равной нулю, как в первом варианте измерений, или измеряется детектором положения полос с использованием разложения регистрируемого излучения по спектру. Абсолютными измерения δ_{int} названы по аналогии с абсолютными измерениями расстояний, в отличие от измерения изменений разности хода.

Абсолютные измерения δ с субнанометровой точностью весьма затруднительны. Их осуществление облегчается в двух случаях: 1) когда δ_{int} , также как и δ , не превышает нескольких мкм; и 2) когда значение δ_{int} предварительно каким-либо образом определено с погрешностью, не превышающей несколько мкм, и требуется лишь уточнить это ориентировочное значение δ_{int} . В рассматриваемом типе астрометрического инструмента δ_{int} всегда можно предварительно определить с погрешностью, не превышающей 10 мкм, что и дает возможность уточнить значение δ_{int} без чрезмерного усложнения аппаратуры и процедуры измерений.

Серьезное затруднение, которое при этом имеется, связано с тем, что точное измерение δ_{int} можно осуществить лишь с помощью вспомогательного лазерного интерферометра. При этом входные точки инструмента имитируются вершинами отражателей лазерного интерферометра, а лазерное излучение вводится в интерферометр через светоделитель звездного интерферометра Майкельсона. Узкий пучок лазерного излучения проходит путь до отражателей и обратно, вследствие чего разность хода во внутреннем лазерном интерферометре, которая может быть измерена с субнанометровой точностью, равна $2\delta_{int}$. Погрешность измерения внутренней разности хода, обусловленная заменой звездного пучка на лазерный, определяется в основном ошибкой совмещения вершин отражателей с входными точками и угловыми смещениями лазерного пучка относительно звездного пучка. Вторая причина при хорошей юстировке интерферометра и удовлетворительном качестве работы системы гидрирования не оказывает существенного влияния на результаты измерений [59].

Что касается первой причины, то совмещение вершин отражателей с входными точками, особенно в направлении распространения света от звезды, по-видимому, невозможно выполнить точнее, чем до 0,1 мкм. Поскольку небольшие области пространства, содержащие указанные отражатели, могут быть хорошо термостатированы, причем даже пассивными средствами, то систематическая погрешность, обусловленная смещениями вершин, практически не изменяется во времени. Это дает возможность ввести поправку в результаты измерений, используя специально организованный цикл астрометрических измерений.

4.20.1. Принципы лазерных метрологических измерений

Устройства регистрации разности хода во внутреннем лазерном интерферометре и лазерном интерферометре для измерения длины базы основаны на использовании метода фазовой модуляции [25, 55, 67]. Модуляция разности фаз (хода) на частоте 20 кГц осуществляется с помощью колеблющего-

ся пьезокерамического элемента. Из сигнала фотоприемника, установленного на выходе интерферометра, с помощью полосовых усилителей и синхронных детекторов выделяются первая и вторая гармоники

$$U_w = U_1 \sin \Phi \quad \text{и} \quad U_{2w} = U_2 \cos \Phi,$$

где $\Phi = 2\pi(m + \varepsilon) = 2\pi m + \varphi = 4\pi\Delta l/\lambda$ — разность фаз, m — целая часть порядка интерференции. Эти выпрямленные в синхронном детекторе сигналы поступают через адаптер с аналого-цифровыми преобразователями в электронное вычислительное устройство. Дробная часть порядка интерференции ε вычисляется этим устройством по формуле

$$\varepsilon = (1/2\pi) \operatorname{arctg} \left(\frac{U_w \cdot U_2}{U_{2w} \cdot U_1} \right). \quad (4.13)$$

Более детально принцип действия и устройство интерферометра с фазовой модуляцией описаны в работе [67].

При измерениях с субнанометровой точностью следует уделять особое внимание так называемой периодической систематической ошибке. Период изменения этой ошибки обычно соответствует одному порядку интерференции (или 2π по разности фаз). Значение периодической ошибки зависит от дробной части порядка интерференции и мало изменяется даже при больших изменениях целой части порядка интерференции. Поэтому при соответствующей калибровке эту ошибку можно учесть. В работе [67] исследовался один из методов измерения периодической ошибки и приведены результаты эксперимента, в котором значения периодической ошибки были определены с погрешностью (СКО) $\Delta\varepsilon = 1.4 \cdot 10^{-3}$, что соответствовало погрешности измерения перемещений 0.42 нм. Метод циклического усреднения, примененный в работе [75], позволил, по данным автора, уменьшить периодическую ошибку более чем в 1000 раз, до пикометрового уровня. Этот результат все-таки требует дополнительного подтверждения в экспериментах, в которых реально осуществляется измерение пикометровых смещений.

Источниками периодической ошибки могут быть как оптические дефекты, так и погрешность системы регистрации разности хода. Из источников ошибок оптического характера следует выделить несовершенство поляризационных свойств оптических элементов. Типичное для коммерческих гетеродинных интерферометров значение амплитуды периодической ошибки, обусловленной поляризационными явлениями, составляет 10 нм [59]. В связи с этим большинство предлагаемых в данном проекте схем лазерной метрологии, а также схема звездного интерферометра, являются схемами неполяризационных интерферометров. Вынужденное использование поляризационного интерферометра предполагается для измерений перемещений отражателя линии задержки. Эти измерения должны выполняться с высоким быстродействием, в связи с чем необходимо повысить частоту модуляции до 400 кГц (см. ниже), а модуляцию на такой частоте проще всего осуществить с помощью электроннооптического модулятора. Но и в неполяризационном интерферометре результат измерений (хотя и в меньшей степени) зависит от ориентации вектора поляризации лазерного излучения, поступающего в интерферометр. В наиболее точных измерениях это учитывают, одновременно регистрируя (с последующим усреднением) два показания прибора, соответствующие двум ортогональным состояниям поляризации на выходе интерферометра [59].

Наиболее кардинальным решением данной проблемы мы считаем использование компенсационного метода измерений. Тогда при измерениях фиксируется только одно значение ϵ (0 или $1/2$), и вместо определения функциональной зависимости требуется измерить лишь одно значение фазового сдвига. В этом случае можно определить поправку с ошибкой, соизмеримой с разрешающей способностью регистрирующей системы интерферометра, хотя, возможно, эти измерения потребуют больших затрат времени.

При использовании компенсационного метода метрологии в сочетании с интерферометрическим методом фазовой модуляции точность измерений определяется точностью ин-

терференционного компенсатора. По нашему мнению, наиболее точную компенсацию можно осуществить путем изменения частоты излучения лазера и последующего измерения частотного сдвига [39, 102]. Этот метод компенсации уже много лет используется в ведущих метрологических институтах при измерении эталонных длин волн лазерного излучения (см. напр., [23]). Он был опробован также в макете лазерного интерферометра, предназначенного для измерения длин в космическом астрометрическом инструменте POINTS [102].

В качестве примера может быть рассмотрен перестраиваемый по частоте He–Ne лазер с Т-образным резонатором. Одночастотный режим работы лазера при перестройке частоты в широких пределах обеспечивается благодаря селекции продольных мод резонатора. Разность хода в интерферометре модулирована по синусоидальному закону. Сигнал первой гармоники содержит информацию о дробной части порядка интерференции и используется для управления частотой перестраиваемого лазера. Частота лазера изменяется таким образом, чтобы выполнялось условие максимума интерференции. Иногда бывает более удобно настраиваться на минимум интерференции. При замыкании петли обратной связи осуществляется автоматическое наведение на максимум (или минимум) интерференции. Излучение перестраиваемого лазера смешивается на фотоприемнике с излучением лазера, характеризующегося высокой стабильностью частоты излучения. В качестве такого лазера может быть, например, использован метрологический He–Ne лазер с йодной ячейкой. Разностная частота сигнала биений измеряется частотомером. Регистрируя изменение частоты перестраиваемого лазера $\delta\nu$, можно вычислить дробную часть порядка интерференции по формуле:

$$\varepsilon = d \cdot \delta\nu / c = \delta\nu / \Delta\nu, \quad (4.14)$$

где $\delta\nu = c/d$ — свободный спектральный интервал интерферометра, c — скорость света. Требуемый диапазон перестройки частоты равен $\Delta\nu$.

Для абсолютных измерений длины базы, а также абсолютных измерений разности хода во внутреннем лазерном интерферометре мы предполагаем использовать двухдлинноволновый метод интерферометрии. Используемая нами модификация этого метода заключается в том, что одновременно измеряются дробные части порядка интерференции $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ для двух излучений с длинами волн λ_1 и λ_2 . Разность измеренных дробных частей равна дробной части порядка интерференции, которая могла бы быть зарегистрирована в данном интерферометре для излучения с длиной волны

$$\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 - \lambda_2), \quad (4.15)$$

то есть

$$\delta = (m_1 + \varepsilon_1)\lambda_1 = (m_2 + \varepsilon_2)\lambda_2 = [m_L + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)] \cdot \Lambda, \quad (4.16)$$

где m_1, m_2, m_L — целые части порядков интерференции для длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \Lambda$ соответственно.

Если $(\lambda_1 - \lambda_2)/\lambda_1 \ll 1$, то $\Lambda \gg \lambda_{1,2}$, благодаря чему появляется возможность, предварительно грубо измерив δ (с погрешностью, меньшей $\Lambda/2$), определить целый порядок интерференции m_L , для длины волны Λ . Если погрешность измерений ε_1 и ε_2 равна $\delta\varepsilon$, то разность хода d при этом может быть получена из уравнения

$$\delta = [m_L + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)]\Lambda$$

с погрешностью $\Delta\delta \approx \sqrt{2} \cdot \Lambda \cdot \delta\varepsilon$.

При выполнении условия

$$\sqrt{2} \cdot \Lambda \cdot \delta\varepsilon < \lambda_{1,2} \quad (4.17)$$

можно безошибочно определить значения m_1 и m_2 и снова вычислить δ , но уже с более высокой точностью. Погрешность нового значения δ , равная $\lambda_{1,2} \cdot \delta\varepsilon$, значительно меньше, чем на первой стадии расчета δ .

Применительно к нашей задаче измерения разности хода с максимальной достижимой точностью требуемая точность измерения для одного из излучений должна соответствовать желаемой точности конечного результата измерений, а для другого излучения — достаточно, чтобы выполнялось условие (4.17). Если в качестве излучения, обеспечивающего максимальную точность измерения, использовать излучение метрологического He–Ne/ $^{127}\text{I}_2$ лазера с длиной волны $\lambda_1 = 632.99$ нм в вакууме, а длина волны второго излучения $\lambda_2 = 629.54$ нм, то $\Lambda = 116$ мкм. При этом погрешность предварительного определения не должна превышать 50 мкм, что не представляет больших затруднений в астрометрическом инструменте типа ОЗИРИС. Погрешность $\delta\varepsilon_2$ измерений ε для излучения с длиной волны λ_2 в соответствии с условием (4.17) должна быть меньше $1.2 \cdot 10^{-3}$. Требуемая стабильность частоты второго излучения за время, необходимое для выполнения одного измерения, зависит от максимального значения d_{\max} измеряемой разности хода: $\delta\nu_2/\nu_2 \leq 0.5\lambda_2 \cdot \delta\varepsilon_2/d_{\max}$. При $d_{\max} = 0,2$ м, например, стабильность частоты этого излучения должна быть не хуже $2 \cdot 10^{-9}$ за $\tau = 0,02$ с.

Как упоминалось выше, интерферометр для измерения перемещений отражателя линии задержки должен быть быстродействующим и в то же время точным. Предполагается, что отражатель перемещается в пределах ± 0.35 м относительно среднего положения. Полагая, что время перемещения отражателя от среднего положения в одно из крайних не должно превышать 10 с, мы найдем, что максимальная скорость перемещения должна быть порядка 10 мм/с. Мы предполагаем использовать метод фазовой модуляции и для измерения перемещений отражателя линии задержки. При быстром движении отражателя во время перехода с одного измеряемого объекта на другой будет измеряться только изменение целой части порядка интерференции. Или говоря другими словами, будет осуществляться реверсивный счет интерференционных полос. Только после захвата центральной ахроматической полосы (для яркой звезды) или остановки отражателя (для сла-

бой звезды) будет включаться также устройство отсчета дробной части порядка интерференции. Для обеспечения надежного измерения изменений целой части порядка при скорости отражателя 10 мм/с и длине волны используемого лазерного излучения $\lambda = 0.63$ мкм, частота модуляции должна быть не менее 300 кГц. Предполагается осуществлять модуляцию разности фаз на частоте 400 кГц с помощью электрооптического модулятора. Излучение с двумя взаимно ортогональными составляющими, вышедшее из электрооптического модулятора, поступает в стандартный измеритель перемещений (интерферометр типа Майкельсона) с двумя уголковыми отражателями и поляризационным светоделительным кубиком. На выходе интерферометра установлен поляризатор, приводящий к одному направлению интерферирующие световые колебания. Обработка сигнала фотоприемника осуществляется так же, как в интерферометре с синусоидальной фазовой модуляцией.

4.20.2. Осветительная система лазерной метрологии

Одним из вариантов реализации метрологического лазера мог бы быть гелий–неоновый лазер, стабилизированный по иоду. Однако, учитывая бортовое базирование системы метрологии, в качестве метрологических лазеров целесообразно использовать частотно-стабилизированные твердотельные лазеры с лазерной диодной накачкой активного элемента. В отличие от гелий–неоновых, твердотельные лазеры с диодной накачкой имеют существенно меньшие габариты и вес, а кроме того, характеризуются высокой жесткостью конструкции и имеют очень большой ресурс наработки на отказ (несколько десятков тысяч часов).

В настоящее время успешно развивается техника твердотельных лазеров с диодной накачкой, реализованных на базе активных элементов из кристаллов, легированных ионами неодима. При этом для накачки маломощных лазеров (со средней мощностью излучения на уровне 100:200 мВт, что вполне достаточно для проведения измерений в нашем слу-

чае) в настоящее время разработаны и серийно выпускаются надежные полупроводниковые лазерные диоды с длиной волны излучения около 808 нм, на базе которых могут быть реализованы малогабаритные, конструктивно жесткие излучатели. Преобразование частоты излучения неодимовых лазеров во вторую гармонику обеспечивает перенос частоты их излучения в видимую область спектра, где имеется достаточное число расположенных близко друг от друга линий поглощения молекулярного йода $^{127}\text{I}_2$, которые представляют собой хороший репер для стабилизации частоты.

Особенностью предлагаемой системы метрологии интерферометра ОЗИРИС является использование двухдлинно-волнового метода интерферометрии для абсолютных измерений длины базы. При этом предполагается использовать модификацию указанного метода, которая предполагает измерение дробных частей порядков интерференции для двух излучений с близкими значениями длин волн. По этой причине для измерения каждого из пяти расстояний возникает необходимость использования двух частотно-стабилизированных лазеров с близкими, но сдвинутыми друг относительно друга длинами волн излучения.

Известно, что в разных кристаллических матрицах ионы неодима имеют несколько отличающиеся частоты. Благодаря этому, при построении лазеров для системы метрологии могут быть выбраны следующие активные элементы — Nd:LSB с длиной волны генерации 1,0625 и Nd:YVO₄ с длиной волны 1,064 мкм. Соответственно, вторые гармоники их излучения будут иметь длины волн 531,25 и 532 нм. Синтетическая длина волны, соответствующая разностной частоте излучения данных активных сред, будет составлять 376,8 мкм.

Особенностью частотно-стабилизированных твердотельных лазеров является то, что при их реализации на практике может существовать значительный разброс в характеристиках активных и нелинейных кристаллов, а также параметрах лазерных диодов накачки и фокусирующей оптики, что делает необходимым уточнение окончательной конфигурации ре-

зонатора лазера и диапазона значений рабочих уровней тока инжекции (при которых обеспечивается устойчивый одночастотный режим генерации со стабильным по частоте выходным излучением) на стадии реализации экспериментального макета лазера.

Частотно-стабилизированный микрочип-лазер проще всего реализовать на базе активной лазерной среды Nd:YVO_4 с удвоением частоты излучения. В последние годы лазеры с активной средой Nd:YVO_4 находят все более широкое применение на практике. Это связано с тем, что кристаллы Nd:YVO_4 имеют высокий коэффициент поглощения на длине волны полупроводникового лазера накачки 809 нм, что приводит к низкому порогу (около 10 мВт) и высокой эффективности накачки. Несмотря на то, что теплопроводность кристаллов Nd:YVO_4 почти в 2.5 раза меньше, чем у кристаллов Nd:YAG , в них получена одночастотная генерация с уровнем выходной мощности 1 Вт на частоте второй гармоники излучения, что соответствует требованиям многих измерительных систем.

Задача обеспечения высокой долговременной стабильности частоты излучения неодимовых лазеров в лазерной технике обычно решается за счет ее привязки к однородно уширенным компонентам линий поглощения молекулярного иода или цезия. Поскольку вторая гармоника излучения Nd:YVO_4 лазера (532 нм) лежит в видимом диапазоне спектра, где имеется большое количество линий поглощения молекул иода $^{127}\text{I}_2$, представляется логичным стабилизировать частоту по линиям иода.

В предлагаемой нами схеме частота излучения лазера стабилизируется не по однородно уширенным компонентам сверхтонкой структуры насыщенного молекулярного поглощения иода, а по максимуму доплеровски-уширенной линии, поскольку в первом случае система стабилизации хотя и имеет в современном исполнении небольшие габариты, но все-таки не совсем «вписывается» в схемотехнику микролазеров. Упрощенная оптическая схема лазера приведена на рис. 4.21 и включает резонатор, образованный двумя тонкими

плоско-параллельными кристаллическими пластинками — из Nd:YVO₄ (активный элемент) 1 и КТР (нелинейный кристалл для генерации второй гармоники) 2, на торцевые грани которых нанесены высокоотражающие диэлектрические покрытия на длину волны генерации 1064 нм. За нелинейным кристаллом помещается кювета с молекулярным иодом 3.

Режим одночастотной генерации в таком лазере достигается за счет использования линейного резонатора стоячей волны, в который помещается активный элемент с высоким коэффициентом поглощения на длине волны излучения накачки, что позволяет получить генерацию на одной продольной моде при использовании кристалла Nd:YVO₄ длиной около 1 мм. Стабилизация частоты излучения осуществляется по максимуму доплеровски-уширенной линии поглощения иода. Для обеспечения работы системы стабилизации с выхода фотоприемника берется сигнал, пропорциональный величине интенсивности флюоресценции иода. При этом фотоприемник располагается не на выходе кюветы с иодом (как это обычно имеет место в системах стабилизации, работающих по однородно уширенным линиям насыщенного молекулярного поглощения), а на ее боковой стенке, что позволяет существен-

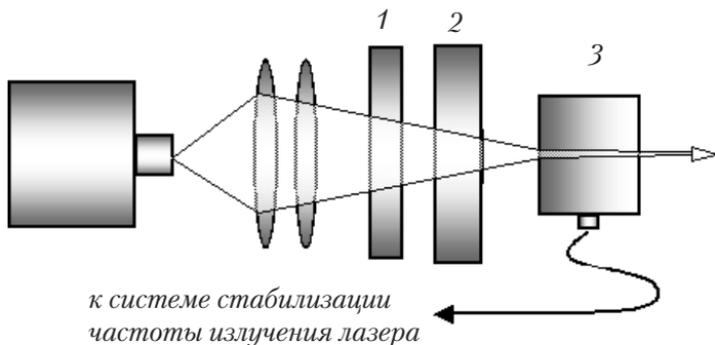


Рис. 4.21. Упрощенная оптическая схема частотно-стабилизированного Nd:YVO₄ микрочип-лазера

но уменьшить габариты схемы. Система автоматической подстройки служит для удержания сигнала флуоресценции на максимуме линии поглощения молекул иода. Перестройка частоты излучения лазера осуществляется за счет изменения температуры резонатора, а модуляция — путем подачи модулирующего напряжения на нелинейный кристалл.

Следует отметить, что из-за большой ширины линии поглощения иода (~ 1 ГГц), обусловленной как наличием доплеровского уширения, так и внутренней структурой исходной линии (несколько однородно уширенных компонент), в описанной схеме невозможно обеспечить очень высокую стабильность и воспроизводимость частоты излучения лазера. По нашим оценкам, долговременная стабильность частоты составляет около 30 МГц, что соответствует длине когерентности около 10 м и является вполне достаточной для решения большинства измерительных задач.

Следует отметить, что хотя указанная стабильность частоты излучения далека от рекордных результатов в области частотно-стабилизированных твердотельных лазеров, отмеченное обстоятельство вполне компенсируется предельной простотой схемы лазера, а также отсутствием каких-либо специальных требований к изготовлению кюветы с иодом, выполнение которых является необходимым условием создания метрологических лазеров. Кроме того, в рассматриваемом случае имеется возможность дальнейшей минимизации габаритов оптической схемы лазера за счет уменьшения размеров кюветы с иодом. Так, например, она может быть изготовлена в виде небольшой капсулы (длиной ~ 0.5 см), поскольку в данной схеме стабилизации используется однократное прохождение лазерного излучения через кювету. Это дает возможность сохранить микрочип-исполнение стабилизируемого лазера, и сделать генерацию более стабильной к температурным воздействиям и вибрациям. При этом само значение частоты излучения лазера может быть заранее аттестовано и использовано для проведения последующих интерференционных измерений.

В заключение этого параграфа необходимо отметить, что ответ на вопрос о принципиальной возможности предложенного здесь конструктивного решения лазера может быть дан только на этапе экспериментальной проверки работы системы лазерной метрологии интерферометра ОЗИРИС.

4.20.3. Интерферометр для измерения длины базы

К интерферометру для измерения длины базы, помимо обычных требований, предъявляются два дополнительных требования:

- зависимость разности хода от измеряемой длины должна выражаться простым уравнением, желательна первой степени, коэффициенты которого известны с достаточной степенью точности;
- оптическая разность хода должна быть одинаковой для используемых излучений с разными длинами волн.

Второе требование обусловлено выбранным нами методом двухволновой интерферометрии. В случае двухлучевого интерферометра это требование выполняется, когда длина хода лучей в стекле или другом прозрачном материале одинакова в обеих ветвях интерферометра.

Было рассмотрено несколько вариантов схем, в основном отвечающих указанным требованиям. В окончательном варианте предполагается, что вершины концевых отражателей совмещены с входными точками звездного интерферометра. При хорошей юстировке интерферометра разность хода $d = 2l$.

Важное достоинство интерферометра — нечувствительность результата измерений к небольшим поворотам падающего на него пучка относительно осей, перпендикулярных оптической оси интерферометра. Разность хода в интерферометре $d = 2l - \lambda\delta/\pi$, где δ — скачок фазы при отражении света от поверхностей зеркал. При наличии аппаратуры, позволяющей измерять дробную часть порядка интерференции ε с погрешностью $3 \cdot 10^{-4}$, скачок фазы δ , а также его изменения при старении покрытий могут быть измерены с такой же погрешностью. Недостатком интерферометра является ограни-

чение выбора метода измерений ε только компенсационным методом. Для проекта ОЗИРИС это сопряжено с некоторым усложнением аппаратуры из-за необходимости введения перестраиваемого лазера и устройства для измерения изменений его частоты.

4.20.4. Лазерная метрология в астрометрическом инструменте с общей базой

В инструменте с общей базой принят вариант измерений, в котором интерферометры внутренней лазерной метрологии производят абсолютные измерения внутренних разностей хода d_{int} , а также изменений внутренних разностей хода во время накопления данных об угловом положении слабой звезды. В звездном интерферометре «яркой звезды» в процессе измерений производится наведение на центр интерференционной ахроматической полосы, полученной в свете неразложенного по спектру света, поступающего от яркой звезды. Следовательно, суммарная разность хода d в интерферометре яркой звезды в пределах ошибки следящей системы равна нулю. Разность хода для слабой звезды определяется путем обработки сигналов двух фотоприемников, регистрирующих разложенные по спектру излучения двух выходных пучков звездного интерферометра.

Детали оптико-механических узлов, содержащие отражатели систем лазерной метрологии, должны быть выполнены из материала с низким коэффициентом линейного расширения. Из-за того, что вершины отражателей блоков входных точек совмещены, а сами блоки выполнены в виде кварцевых монолитов, необходимости в дополнительной термостабилизации этих блоков нет.

В каждой ветви обоих звездных интерферометров световой пучок, с диаметром, приблизительно равным 15 мм, на выходе афокального телескопа проходит после отражения от двух отклоняющих зеркал через линию задержки (рис.4.9). Линии задержки состоят из зеркального триэдра и плоского зеркала. В одной ветви интерферометра уголкового отра-

жатель линии задержки перемещается, в другой — неподвижен. Диапазон перемещений уголкового отражателя (corner cube) равен 0.35 м, что позволяет скомпенсировать изменение внешней разности хода при поворотах телескопа в пределах $\pm 20^\circ$ относительно среднего положения, когда ось телескопа составляет угол 35° с базовой линией.

После прохождения линий задержки пучки падают на светоделитель с металлическим покрытием на основе серебра. На выходе светоделителя образуются две пары интерферирующих пучков, формирующих дополнительные относительно друг друга интерференционные картины. Каждая пара пучков поступает в свой канал регистрации положения интерференционных полос. Углы падения световых пучков на светоделитель не превышают 15° , благодаря чему искажения состояний поляризации, вызванные светоделителем, незначительны, а скачок фазы при отражении от светоделительного покрытия одного из пары интерферирующих пучков мало отличается от 180° . Оптические схемы разных ветвей звездного интерферометра идентичны, за исключением одного лишнего зеркала в одной из ветвей. Это позволяет надеяться на то, что искажения состояний поляризации пучков в разных ветвях будут мало отличаться и, в некоторой степени, будут компенсироваться.

Если при калибровке финишных светоприемников уравнять коэффициенты передач в двух измерительных каналах, то получаемые в процессе регистрации сигналы фотоприемного элемента на координате i , соответствующей длине волны

$$\lambda_i = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/2n + (i - 1)(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/n,$$

равны

$$U_1 = \int_0^{T/2} U_0 (1 + V \cos \varphi) d\varphi,$$

$$U_2 = \int_{T/2}^T U_0 (1 + V \sin \varphi) d\varphi,$$

$$U_3 = \int_0^{T/2} U_0 (1 - V \cos \varphi) d\varphi,$$

$$U_4 = \int_{T/2}^T U_0 (1 - V \sin \varphi) d\varphi.$$

Отсюда ε выражается как

$$\varepsilon = (1/\pi) \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{U_2 - U_4}{U_1 - U_3} \right). \quad (4.18)$$

Для других длин волн λ_i дробная часть порядка вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = (1/2\pi) \cdot \operatorname{arctg} \left\{ \sum_1^4 [(-1)^j + 1] \cdot u^j \times \right. \\ \left. \times \sin \left\{ \frac{\pi}{1} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_j} + \frac{\pi}{2} \cdot [(-1)^{j/2} + 1] \right\} / 2(U_1 - U_3) \right\} \quad (4.19)$$

При совместной обработке данных всех элементов приемника с использованием (4.18) и (4.19) находится уточненное значение разности фаз (хода). При этом для определения целой части порядка интерференции в метрологических каналах предполагается использовать соотношение, характерное для двухдлинноволновой интерферометрии:

$$d = [m_L + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)] \cdot \Lambda,$$

где $\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2 + 2)$ — эффективная длина волны для двух λ , соответствующих соседним элементам фотоприемника. Предел достоверных измерений d с использованием всего излучения, падающего на фотоприемник, равен половине эффективной длины волны, соответствующей паре соседних элементов у коротковолнового края линейки. При

$\lambda_{1,2} = 300$ нм, $n = 50$ эффективная длина волны $\Lambda \sim 13$ мкм, что соответствует пределам измерений ± 6.5 мкм. Другое ограничение диапазона измерений связано с конечной шириной $\Delta\lambda$ спектрального интервала выделяемого одним элементом. Если допустить уменьшение видности полос, обусловленное шириной спектрального интервала, до 0.75, то максимальная измеряемая разность хода равна $d_{\max} = 0.4\lambda^2 / \Delta\lambda$. Это ограничение диапазона измерений более жесткое. Для $\lambda = 0.3$ мкм и $n = 50$ спектральная ширина элемента $\Delta\lambda \approx 7$ нм (с учетом нелинейности хода угловой дисперсии спектральной призмы). Для $\Delta\lambda \approx 7$ нм и $\lambda = 0.3$ мкм $d_{\max} \approx 5$ мкм. Следовательно, пределы достоверных измерений d с использованием всего выходящего излучения составляют ± 5 мкм, что соответствует при $B = 2$ м смещению звезды на $\pm 0.5''$. Принятая схема наведения концевых телескопов должна обеспечить наведение на слабую звезду и установку подвижного элемента линии задержки точнее указанных пределов.

В дугомере-интерферометре ОЗИРИС принята схема диспергирующей системы, в которой для регистрации канальных спектров используется двумерный матричный фотоприемник. Этот вариант предусматривает кодирование информации об интерференционных полосах вдоль одного направления фотоматрицы и кодирование спектральной информации вдоль другого направления. Наклоном одного из пучков звездного интерферометра создается угол между интерферирующими пучками в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии, который дает возможность наблюдать несколько полос в поле интерференции. Спектральная призма обеспечивает разложение излучения по спектру в направлении, перпендикулярном направлению фазовой модуляции. Цилиндрическая линза, расположенная за спектральной призмой, изображает плоскость локализации интерференционных полос в плоскости фотоприемника. В результате на панорамном фотоприемнике формируется картина полос равного хроматического порядка, содержащая необходимую фазовую информацию.

В оптической системе интерферометра используется пространственное разделение пучков, относящихся к различным каналам измерений (интерферометрам). Узкие метрологические лазерные пучки занимают центральную осевую область пространства, свободную от пучков звездного света (в области тени от оптического блока входной точки). Пучок звездного интерферометра — кольцевую зону. Ввод лазерных пучков в интерферометре внутренней лазерной метрологии осуществляется через небольшие зеркала (зеркальные пятачки), расположенные вблизи светоделиителя.

Одновременно с измерением положения интерференционных полос в звездном канале производится измерение длины базы, измерение внутренней разности хода и ее изменений в обоих интерферометрах Майкельсона с помощью интерферометров внутренней лазерной метрологии. Все измерения метрологических каналов производятся теми же системами регистрации, что и в звездных каналах. Это позволяет не только полностью совместить трассы метрологических измерений с трассой прохождения звездных пучков, но и обеспечить тождественность масштабов во всех каналах измерений. Показания всех лазерных метрологических интерферометров считаются с частотой 30–50 Гц.

Следует отметить, что при абсолютных измерениях длины базы, а также внутренних разностей хода в обоих интерферометрах два излучения с разными длинами волн запускаются в соответствующий лазерный интерферометр только на начальной стадии измерений. После определения целых частей порядков интерференции лазер, генерирующий на длине волны 659,54 нм, выключается, и продолжают измерения на одной длине волны, которые дают информацию об изменениях длины базы и внутренних разностей хода.

Предложенная система лазерной метрологии должна обеспечить выполнение измерений длин дуг в космическом астрометрическом интерферометре ОЗИРИС с погрешностью единичного измерения на уровне не хуже 20 мкс дуги. Благодаря используемой в проекте концепции интерферометра с

общей базой предложенная система метрологии существенно проще, чем системы, разработанные в известных проектах POINTS и SIM. Вследствие этого интерферометр-дугомер ОЗИРИС обещает быть сравнительно компактным, легким и дешевым космическим астрометрическим инструментом, позволяющим проводить измерения с точностью не ниже 20 мкс дуги и с проникающей способностью до 18-ой звездной величины.

4.20.5. Система ввода лазерного метрологического пучка

Для проведения всех метрологических измерений в единой шкале длин, задаваемой текущим значением длины волны метрологического лазера, в интерферометре ОЗИРИС используется один лазерный осветитель для всех метрологических каналов измерений. Лазерный пучок системой светоделителей расщепляется на 5 пучков, которые направляются в измерители перемещений четырех звездных каналов и базы. Если в процессе ОКР окажется, что целесообразно использовать не один двухволновый (перестраиваемый) лазер, а два независимых с близкими рабочими частотами, то заведение света в систему расщепителей будет предваряться оптическим переключателем пучков; при этом все каналы метрологических измерений будут вести измерения на общей для всех них длине волны.

РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА-ДУГОМЕРА ОЗИРИС

Эта глава посвящена двум аспектам функционирования космического интерферометра: отбору классов объектов и отдельных объектов во входной каталог и обсуждению алгоритмов астрометрической редукции наблюдений интерферометра-дугомера ОЗИРИС. Две эти задачи взаимосвязаны и ориентированы на достижение максимально возможной точности результирующих координатных определений с помощью оптического интерферометра.

5.1. Входной каталог для космического интерферометра

Существенной особенностью космического астрометрического эксперимента, основанного на двойном оптическом интерферометре с общей базой, является относительно большее, чем в приборах с другими схемами, значение априорной программы наблюдений. Технологические и метрологические во-

просы организации эксперимента будут более подробно рассмотрены ниже, а пока необходимо отметить, что измерение каждой дуги на небе требует наведения прибора на два источника, а приоритеты в очередности измерений разных источников определяются задачей минимизации времени наблюдений при заданной их точности.

Позиционные измерения, точность которых составит микросекунды дуги, позволят решить многие научные проблемы. Решение некоторых из них требует обзорных наблюдений большого числа разнообразных объектов, решение других — долгого мониторинга отдельных, «экзотических» объектов. Среди научных задач назовем следующие: уточнение астрономической шкалы расстояний, обнаружение или подтверждение астрометрическими методами существования планетных систем у других звезд, изучение явления микролинзирования. Важнейшей научной задачей астрометрического космического эксперимента, безусловно, является установление фундаментальной системы координат в оптической диапозоне.

При этом нам представляется важным, с одной стороны, непременно включить во входной каталог набор объектов, наблюдение которых наилучшим образом решает поставленные в эксперименте научные задачи, кратко перечисленные выше. Выбор объектов должен учитывать возможное изменение программы наблюдений в процессе эксперимента без заметного уменьшения точности. С другой стороны — необходимо обеспечить наличие во входном каталоге объектов, наблюдение которых позволит решить внутренние метрологические задачи эксперимента. Необходимы также объекты, наблюдение которых позволит сопоставить результаты данного эксперимента с результатами других космических экспериментов.

Ниже будут более подробно описаны научные задачи, решаемые в рамках эксперимента. Общая особенность наблюдаемых при этом объектов состоит в том, что подавляющее их большинство является переменными или имеет сложную (ожидаемую) пространственную структуру. Это предьявля-

ет весьма специфические требования к остальным объектам входного каталога, измерения которых, не претендуя на отдельную научную значимость, должны позволить космическому интерферометру выполнить свою основную задачу — стать высокоточным инструментом для измерения координат небесных объектов.

Измерения координат объектов Солнечной системы и соответствующее уточнение динамической системы координат будут рассмотрены ниже. Безусловно, объекты Солнечной системы также должны включаться в программу наблюдений.

5.1.1. Функциональное назначение основных классов объектов, включаемых во входной каталог

Итак, основной задачей, стоящей перед оптическим интерферометром в космосе, является установление собственной системы отсчета возможно более близко к идеальной инерциальной системе. Сама реализация инерциальной системы координат в оптическом диапазоне и точность этой реализации должна быть конкретизирована на начальном этапе наблюдений. Проще говоря, поскольку структура изображений объектов, которые мы априори относим к реперным, на микросекундном уровне точности просто не может быть сейчас себе представлена, то преждевременно жестко разделять подмножества. Пока рано утверждать, какое из подмножеств объектов входного каталога станет более точной реализацией инерциальной системы координат:

- звезды сферической составляющей Галактики, относящиеся к спектральному классу К, кинематика которых проста, а двойственность мало значима [51, 119];
- или квазары, непосредственно образующие международную небесную опорную систему отсчета (ICRF, см. [96]), когда относительно некоторых из них появляются обоснованные подозрения в неточности и переменности [116].

Окончательно предлагается разделить объекты входного каталога условно на три класса, различающихся как по предполагаемому назначению, так и по методике измерений:

1. Объекты, реализующие инерциальную систему координат.
2. Объекты, позволяющие исследовать собственные измерительные характеристики интерферометра.
3. Звезды, изучение которых важно для исследования строения Вселенной.

При этом наибольшее относительное число угловых измерений в начальный период эксперимента должно быть выполнено между объектами первого класса и несколько меньшее — между объектами классов 1 и 2.

Только после того, как будет набрана достаточная статистика наблюдений и появится возможность давать гарантированную оценку точности, следует переключаться и на измерения звезд собственно научной программы. Столь жесткое требование по методике наблюдений объектов входного каталога связано с имеющимся обширным опытом наблюдений, когда переменность или двойственность объектов, считавшихся стандартными (реперными) приводила к порче значительной доли наблюдений программных объектов [29, 106, 125].

5.1.2. Отбор объектов, реализующих инерциальную систему координат

Для абсолютизации измерений космического оптического интерферометра совершенно необходимо измерение точных координат квазаров до 17 звездной величины. Они относятся к числу самых далеких объектов и обладают практически нулевыми параллаксами и собственными движениями. Следовательно, они задают фундаментальную (квазиинерциальную) систему отсчета для всех позиционных исследований. В настоящее время система ICRS реализована радиоинтерференционными наблюдениями 608 радиоисточников,

среди которых большинство квазаров, и независимые оптические наблюдения необходимы для согласования систем координат, используемых в радиодиапазоне и оптическом диапазоне. Примерно 117 объектов ярче 17^m могут наблюдаться с помощью интерферометра (см. рис. 5.1).

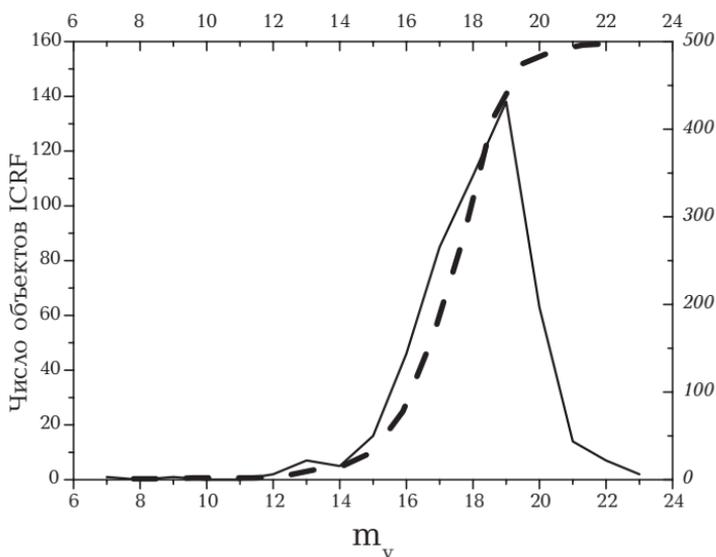


Рис. 5.1. Гистограмма распределения объектов ICRF [3] по видимым величинам. Пунктиром приведена функция светимости.

Научные задачи могут быть решены, если только на небе будет определена стабильная инструментальная система координат и исследовано преобразование от инструментальных координат к стандартной (фундаментальной) системе координат. В оптическом диапазоне фундаментальная система (HCRF — *Hipparcos Celestial Reference Frame*) задаётся положениями звёзд каталога Гиппаркос [76]. Согласование этих систем произведено косвенно, через радиоинтерферометрические наблюдения нескольких ярких радиозвезд Галактики, которые одновременно входили в программу наблюде-

ний Гиппаркоса. Звезды эти на заявленном уровне точности (1 миллисекунда дуги) показывают разрешимую двойственность и заметное собственное и орбитальное движение, кроме того некоторые из них являются переменными. Для наблюдений РСДБ эти объекты также не очень хороши, точность их координат в системе ICRS оказалась на уровне 2–3 мс дуги. В результате, остаточное вращение (отличающееся от галактического вращения, что указывает на неинерциальность) системы HCRF оценивается в 0.25 мс дуги за год, что довольно много по сравнению с точностью данных оптических измерений в случайном отношении. Поэтому представляется совершенно необходимым включить в программу наблюдений внегалактические радиисточники, излучающие также и в оптическом диапазоне. Среди них приходится отобрать объекты ярче 17 звездной величины, ещё доступные космическому интерферометру. Таких объектов имеется в видимых лучах — 56, в фотовизуальных (с большой ошибкой) — 117. Вклад этого небольшого числа внегалактических объектов в абсолютизацию параллаксов и собственных движений может оказаться определяющим (точно это известно будет только апостериори)¹. Заметим, что не для всех квазаров известны структурные индексы, показывающие их пригодность для астрометрических целей.

Особенности оптического интерферометра таковы, что наряду с объектами, служащими для абсолютизации координат, требуется определить «рабочую» систему координат, т. е. совокупность объектов, относительно которых и будут производиться текущие измерения координат астрофизически интересных источников.

При разработке проектов космических интерферометров за рубежом был поднят и начал активно разрабатываться во-

¹Эти же объекты целесообразно включить в программу наблюдений проекта «Радиоастрон». Наземно-космический интерферометр, обладая более высокой разрешающей способностью, чем чисто наземные интерферометры, позволит исследовать структуру радиисточников, определяющих фундаментальную систему координат (и, может быть, её изменения).

прос о выборе подмножества достаточно ярких объектов, которые будут использованы в качестве опорной Сетки при измерениях программных звезд. Поскольку наиболее точные координаты и собственные движения объектов Сетки будут получаться в ходе самого космического эксперимента, очень важным является выбор класса объектов с достаточно простой кинематикой, для которого возможно построение точной модели, а влияние (пока не обнаруженных) спутников опорных звезд будет не очень велико.

В проекте космического интерферометра SIM (*Space Interferometry Mission*), разрабатываемом Лабораторией реактивного движения (JPL) и Военно-морской обсерваторией США (USNO) основных предложений было два [119]: звезды-гиганты спектрального класса К, принадлежащие гало нашей Галактики, и звезды-карлики класса G (естественно, принадлежащие ближайшему окружению Солнца). Относительно второго предложения можно только заметить, что многолетние специальные программы поиска звезд-аналогов Солнца дают некоторую уверенность в том, что в настоящее время большинство их известно. На этом преимущества второго варианта на наш взгляд практически заканчиваются. В силу своей близости к Солнцу, все эти звезды будут обладать большими собственными движениями, поэтому большее значение приобретут кинематические эффекты более высоких порядков, связанные, в частности, с возможными слабыми спутниками этих звезд. Зато, отвергнутые в качестве кандидатов в собственно опорную Сетку, звезды-аналоги Солнца могут сослужить значительную службу в качестве объектов второго класса, т. е. послужить тестами для проверки точности измерения координат, в связи со слабой переменностью и темными спутниками. Значительное их число также может оказаться интересными для поиска планет. Тут список звезд класса G может быть ограничен только общим объемом наблюдательной программы космического оптического интерферометра, но это не проблема данной статьи.

Другой класс звезд-кандидатов в Сетку исследован зна-

чительно хуже. Исходя из статистических подсчетов, следует ожидать существования 2–4 тысяч звезд-гигантов класса К ярче $V = 12^m$. В опубликованных каталогах содержится от четверти до половины этого количества. В связи с последним обстоятельством, сейчас большой интерес вызывают работы по составлению обзорного каталога звезд-гигантов (GGSS – Grid Giant Star Survey) [104, 81]. Видимо, именно список таких объектов будет, в конце концов, принят в качестве опорного каталога для американского космического интерферометра. Основных причин здесь две:

1. малометаллические звезды класса К, принадлежащие гало Галактики, обладают достаточно простой кинематикой, а их большие пекулярные скорости сделают незначимым влияние любой еще не открытой двойственности;

2. как правило, эти звезды – хорошие постоянные звезды очень малой металличности, поэтому в работе с подобной выборкой опорных объектов ослабеет актуальность вопросов, связанных с уравнениями блеска и цвета.

Недостатком существующей в настоящее время выборки К-гигантов является ее неполнота. Вместе с тем, включение даже такого ограниченного списка звезд в программу наблюдений российского космического оптического интерферометра представляется крайне важным, ибо откроет перспективу увязки разных координатных систем.

Изначально по материалам каталога III/221A по Страсбургской классификации [62] был составлен список 105 звезд класса К. Из каталога по следующим критериям отобрано примерно 10% звезд:

1. Спектральный класс – К (отбрасывались составные спектры).

2. Индекс металличности – меньше минус 1.

3. Отсутствие указаний на переменность.

Ограничение по видимой звездной величине не вводилось, поскольку сама величина V в каталоге крайне неточная. Отброшен один объект 4.5^m . В дальнейшем выяснилось, что список объектов опорной Сетки, сформированный на пер-

вом этапе работы, содержит слишком мало объектов и нуждается в дополнении. Список был существенно расширен. В качестве исходного каталога был взят библиографический каталог двумерной спектральной классификации Баскомба (Buscombe), точнее, его 14-я версия (III/222, [61]). Из этого каталога сначала были отобраны все звезды-гиганты и сверхгиганты спектрального класса К (т. е. звезды I, II и III классов светимости). Изначально список насчитывал около 2000 звезд. Затем были удалены все звезды с составными спектрами (т. е. спектрально-двойные), все компоненты известных оптических двойных, а также все звезды, показывавшие какую-либо переменность.

Результирующий список, насчитывавший 1650 звезд, был подвергнут процедуре отождествления с Опорным каталогом Тихо (Tycho Reference Catalog, TRC, см.[78]). В процессе отождествления пришлось отбросить еще 262 звезды, или не отождествленных (46 звезд), или показавших неуверенное отождествление (два или более кандидата на расстоянии, меньшем 2 угловых минут). Выборка однозначно отождествленных звезд насчитывает 1289 записей.

Относительно предлагаемых кандидатов в Сетку следует заметить, что значительная, но пока неизвестная часть их принадлежит плоской составляющей Галактики. Отбросить их можно будет только апостериори, по параллаксам и кинематике.

5.1.3. Объекты, позволяющие исследовать измерительные характеристики интерферометра-дугомера

Важной задачей при формировании программы наблюдений является соблюдение преемственности с уже выполненными космическими экспериментами и возможности сопоставления результатов с другими будущими экспериментами. Кроме того, необходимо предусмотреть включение классов объектов, позволяющих исследовать аппаратные характеристики оптического интерферометра. Сразу упомянем об-

суждавшиеся звезды-карлики класса G. Всего звезд с известной спектральной классификацией G2 V в каталоге Tycho-2 (т. е. с приличными координатами) – около 1200, однако, во входном каталоге космического интерферометра из 138 звезд класса G примерных аналогов Солнца всего 3 (Tycho-2 номер: 4809-02172-1, 7658-00229-1, 8837-00850-1).

Результаты первого космического эксперимента – Гиппаркос – широко используются в настоящее время. Пока нет возможности судить об уровне систематических ошибок этого каталога. Включение в программу наблюдений космического оптического интерферометра выборки звезд выходного каталога Гиппаркос позволит получить представление о систематических ошибках каталога и таким образом уточнить уже полученные на его основе результаты. Предлагается использовать выборку звезд каталога Гиппаркос, обладающих следующими признаками: не отмечены как переменные или двойные, видимые звездные величины заключены в пределах $6 < V < 10^m$ (более слабые звезды очень плохо измерены), корень из суммы квадратов ошибок пяти астрометрических параметров (координаты, собственные движения и параллакс) не превышает 7 мс дуги, звезды не имеют соседей ближе 5 минут дуги а также образуют на небе квазиравномерную решетку с шагом в несколько градусов. Общий объем такой выборки уточняется по соответствию суммарной выборки требованиям технического задания.

Следующим классом-кандидатом в тестовые объекты являются лацертиды – внегалактические сильно переменные объекты. Ярких среди них немного, зато они представляют собою великолепную возможность непосредственного определения урвнения блеска в космическом эксперименте.

В таблицах 5.1, 5.2 и 5.3 приведены списки лацертид, классифицированных в Общем каталоге переменных звезд [114], а также из специального обзора активных ядер галактик (см.[131]). Из-за характера переменности лацертид списки сильно различаются. Заметим также, что ОКПЗ по замыслу авторов и не ориентирован на внегалактические объекты.

Таблица 5.1. Объекты типа BL Lac в Общем каталоге переменных звезд

N п/п	GCVS	α_{2000}	δ_{2000}	V_{\max} :	Примечание
1	W Com	12 21 31.7	+28 13 58	11.5	радиоисточник ON 231.
2	AU CVn	13 10 28.7	+32 20 44	14.2	= SVS 1254
3	AP Lib	15 17 41.8	-24 22 19	14.0	$Z = 0.0486$
4	BL Lac	22 02 43.3	+42 16 40	12.4	$Z = 0.07$; $B - V = +1.0$

Таблица 5.2. Ярчайшие в оптическом диапазоне объекты типа BL Lac из каталога Верона

N п/п	Название	α_{2000}	δ_{2000}	z	V_{\max}
1	RXS J00031-1805	00 03 07.9	-18 05 50	0.054	13.28
2	MARK 421	11 04 27.2	+38 12 32	0.031	12.90
3	RXS J12161+0929	12 16 06.3	+09 29 09	0.093	13.20
4	RXS J12211+4742	12 21 07.8	+47 42 30	0.210	9.00
5	NGC 5128	13 25 28.0	-43 01 00	0.001	12.76
6	MARK 501	16 53 52.2	+39 45 36	0.033	13.78
7	1ES 1959+650	19 59 59.9	+65 08 55	0.047	12.80
8	PKS 2005-489	20 09 25.4	-48 49 53	0.071	12.81
9	PKS 2155-304	21 58 52.0	-30 13 32	0.116	13.09
10	NPM1G-09.0688	22 17 25.9	-09 07 06	0.095	13.15

5.1.4. Звезды, позволяющие исследовать масштабы во Вселенной. Описание классов объектов, предлагаемых для включения в программу наблюдений

Главная астрономическая задача (из тех, что выходит за пределы собственно астрометрии) всякого астрометрического проекта — это обеспечение дальнейшего продвижения на пути уточнения шкалы расстояний во Вселенной. Умение опре-

Таблица 5.3. Ярчайшие в оптическом диапазоне квазары
из каталога Верона

N п/п	Название	α_{2000}	δ_{2000}	z	V_{\max}
1	NPM1G-22.0017	00 41 32.1	-22 38 38	0.063	13.24
2	4U 0241+61	02 44 57.6	+62 28 06	0.045	12.19
3	LB 1727	04 26 00.8	-57 12 01	0.104	O 13.20
4	WENSS 0648+733	06 54 26.6	+73 19 50	0.114	11.70
5	1WGA J0820.1+3728	08 20 07.7	+37 28 39	0.082	R 11.80
6	MCG -02.28.039	11 01 29.9	-12 26 56	0.026	O 12.70
7	CG 825	11 21 08.4	+34 55 21	0.040	13.19
8	RXS J12252+3213	12 25 13.0	+32 14 01	0.059	13.00
9	3C 273.0	12 29 06.7	+02 03 08	0.158	12.85
10	Zw 244.025	12 30 11.9	+47 00 23	0.039	R 13.04
11	IC 4296	13 36 39.0	-33 57 58	0.013	10.50
12	GB6 13455+2851	13 47 51.5	+28 36 30	0.741	I 13.50
13	WPVS 95	14 51 33.0	-36 25 56	0.028	O 12.30
14	WPVS 97	14 55 53.0	-35 48 22	0.035	O 12.00
15	NPM1G+27.0587	18 53 03.9	+27 50 28	0.062	O 12.50
16	MARK 509	20 44 09.7	-10 43 24	0.035	13.12
17	FIRST J21398-0804	21 39 51.0	-08 04 54	0.051	13.39
18	Q 2138-4432	21 41 54.7	-44 18 35	1.660	* 0.00
19	FIRST J22060-0821	22 06 02.6	-08 21 06	0.067	12.34
20	RXS J22289-0904	22 28 52.7	-09 04 52	0.070	12.80
21	RX J23273+1524	23 27 22.0	+15 24 37	0.044	12.60
22	3C 465.0	23 38 29.4	+27 01 52	0.030	13.30

делять надежные расстояния до космических объектов является необходимым условием для построения моделей строения Галактики, скоплений галактик и даже структуры обозримой части Вселенной. От принятой шкалы расстояний напрямую зависят оценки масс звездных систем (поскольку масса и линейный размер однозначно связаны со скоростью враще-

ния галактики или скоростями звезд, населяющих звездное скопление), а следовательно и оценка такого важнейшего параметра Вселенной как средняя плотность видимого вещества в ней и относительная доля скрытой массы. Проблема шкалы расстояний непосредственно затрагивает и другие фундаментальные космологические параметры, такие как величина постоянной Хаббла H (которая характеризует скорость расширения Вселенной и является коэффициентом пропорциональности между скоростью удаления далеких галактик и расстоянием, $V \approx H \times R$ где R — расстояние), возраст Вселенной и возраст представителей старого населения галактик, в первую очередь шаровых звездных скоплений. Может показаться удивительным, что, несмотря на большой прогресс астрономических исследований, мы до сих пор не знаем с достаточной точностью шкалу расстояний во Вселенной. Несмотря на стремительный прогресс астрономических исследований, неопределенность в наших знаниях о шкале расстояний во Вселенной все еще остается недопустимо большой: две основные конкурирующие шкалы расстояний — так называемые «короткая» и «длинная» шкалы — различаются друг от друга более чем на 20% и это различие практически не сократилось за два прошедших десятилетия.

Как известно, главным источником прямых данных о расстояниях до астрономических объектов является измерение их тригонометрических параллаксов. Исследователи надеялись, что результаты, полученные европейским астрометрическим спутником Гиппаркос, обеспечат существенный прорыв в решении проблемы шкалы расстояний и позволят однозначно решить накопившиеся в этой области противоречия. Наблюдения, проведенные в рамках проекта Гиппаркос, позволили определить параллаксы и собственные движения около 120 тысяч звезд с точностью около 1 мс дуги и 1 мс дуги в год, соответственно, но вопреки ожиданиям не позволили сделать окончательный выбор между конкурирующими шкалами расстояний. Проблема состоит в том, что параллаксы даже самых ближайших объектов из тех, что могут с до-

статочной высокой точностью наблюдаться в других галактиках, слишком малы и сравнимы с ошибками их определения спутником Гиппаркос. В результате получаемые выводы оказываются крайне чувствительными к возможным (пусть даже небольшим!) систематическим ошибкам данных Гиппаркос, а решение некоторых задач — например однозначное определение мод пульсации пульсирующих переменных, необходимое для установления нуль-пунктов их шкал расстояния, — оказывается невозможным. В этой связи представляется целесообразным определение параллаксов и собственных движений целого ряда объектов из так называемых индикаторов расстояний с гораздо более (примерно в 30–50 раз) высокой точностью. Особый интерес с точки зрения уточнения шкалы расстояний представляют пульсирующие переменные в связи с наличием у каждого их класса своей зависимости период–светимость. В случае калибровки нуль-пунктов этих зависимостей по звездам с хорошо известными расстояниями их можно применять для определения расстояний до других — даже весьма далеких — галактик, содержащих такого рода объекты.

Важнейшими из переменных с этой точки зрения являются классические цефеиды, исследование которых в других галактиках с целью определения расстояний последних явилось целью ключевого проекта космического телескопа имени Хаббла. При этом следует отметить, что определенные таким образом расстояния галактик остаются относительными, поскольку привязаны к расстоянию до одной из ближайших к нам галактик — Большого Магелланова облака, оценки которого — даже те, что получены с использованием данных космического астрометрического проекта Гиппаркос — до сих пор разнятся на 15–20%. Цефеиды представляют собой пульсирующие переменные звезды-сверхгиганты спектральных классов F–G, обладающие очень высокой светимостью и практически стабильными радиальными пульсациями оболочки. Эти объекты играют огромную роль в изучении галактик. В нашей Галактике открыто более 1000 звезд этого ти-

па, имеющих периоды изменения блеска от 2 до 68 суток с амплитудой, достигающей 2^m ; из-за их высокой светимости цефеиды видны даже в далеких спиральных галактиках (на расстояниях свыше 10 Мпк — 10 млн. пк), а очень регулярные и сильные изменения блеска позволяют легко отличить эти звезды от других. У цефеид имеется четкая зависимость между периодом пульсаций и средней абсолютной величиной (или средней по периоду пульсаций светимостью), имеющая вид (для желтого участка спектра):

$$M_{V_{cp}} \approx -1.0^m - 2.9^m \lg P, \quad (5.1)$$

где P — выраженный в сутках период изменения блеска. Параметры зависимости «период—светимость» определяются по небольшому числу цефеид — членов молодых рассеянных скоплений или же по цефеидам с известными высокоточными параллаксами. При этом шкала расстояний молодых скоплений тоже, в свою очередь, калибруется по скоплениям с известными параллаксами для некоторых их членов. Парадокс заключается в том, что использование для самих цефеид и членов молодых рассеянных скоплений единственного и наилучшего на данный момент источника высокоточных параллаксов (с ошибками около 1000 мкс дуги) — каталога Гиппаркос — приводит к существенно (на 15–20%) различающимся нуль-пунктам шкалы расстояний классических цефеид. Одна из возможных причин этого противоречия — систематические ошибки в параллаксах Гиппаркос. В связи с этим, очень большое значение приобретает повышение точности определения параллаксов как цефеид, так и членов молодых рассеянных скоплений, чтобы ошибки определения параллаксов стали существенно меньше самих параллаксов исследуемых объектов (300–3000 мкс дуги; в большинстве случаев — 300–1000 мкс). Решение проблемы нуль-пункта зависимости период—светимость классических цефеид позволит оценивать фотометрические расстояния до других галактик, содержащих цефеиды, причем космический телескоп имени Хаббла — а исследование цефеид в далеких галактиках является одним из

ключевых элементов его научной программы - позволяет делать это на расстояниях до десяти миллионов парсек.

Учитывая вышесказанное, для определения нуля-пункта этой зависимости с учетом мод пульсации (основной тон, первый или второй обертон) мы предлагаем включить в список программных объектов 586 классических цефеид нашей Галактики, тригонометрические параллаксы которых необходимо определить с точностью не менее 50 мкс дуги, а желательно — не менее 20 мкс дуги (для надежного определения мод пульсаций у далеких звезд: ошибка в определении моды пульсации для той или иной звезды приводит к ошибке около 30% при определении расстояния до нее). В этом случае мы сможем построить для цефеид нашей Галактики наблюдаемую зависимость период–светимость, по точности не уступающую тем, что мы имеем для других галактик (в частности, для Большого Магелланова облака).

Однако цефеиды, будучи молодыми объектами, наблюдаются только в звездных системах с продолжающимся звездообразованием (спиральных и неправильных галактиках). В галактиках же ранних типов такие объекты отсутствуют. В этом случае в качестве индикаторов расстояний могут выступать старые объекты вроде цефеид сферической составляющей (типа W Vir) или переменные типа RR Лиры. У первых имеется зависимость период–светимость, напоминающая аналогичную зависимость для классических цефеид (но светимости их при том же периоде примерно в 4 раза ниже). Светимости же переменных типа RR Лиры определяются их металличностью, а в инфракрасной области — опять-таки периодом, и тоже могут быть определены с высокой точностью. До недавнего времени для определения абсолютных величин звезд типа RR Лиры и W Vir использовался единственный доступный и надежный способ — метод статистических параллаксов. Однако, в случае значительного повышения точности определения тригонометрических параллаксов (в 10–15, а лучше в 30–50 раз — до 20 мкс дуги) станет возможной непосредственная калибровка нуля-пункта шкалы их расстояний

(в случае звезд типа W Девы и инфракрасной зависимости период–светимость для звезд типа RR Лиры — опять-таки с учетом моды пульсации). В связи с этим необходимо определить с упомянутой выше точностью тригонометрические параллаксы 139 цефеид сферической составляющей (тоже подчиняющихся своей зависимости период–светимость) и 1099 переменных типа RR Лиры. Следует отметить, что калибровка зависимости период–светимость для переменных типа RR Лиры крайне важна для установления шкалы расстояний и возрастов шаровых скоплений — одних из самых старых представителей населения нашей Галактики.

Еще одним важным классом объектов для уточнения шкалы расстояний являются переменные типа Миры Кита. Эти звезды могут служить хорошими индикаторами расстояния в силу их высокой светимости, широкой распространенности и того факта, что они подчиняются своей инфракрасной зависимости период–светимость. Для надежного установления нуль-пунктов этой зависимости предлагается определить высокоточные (с точностью не хуже 50 мкс дуги) тригонометрические параллаксы 925 мирид и родственных им (в частности, подчиняющихся той же зависимости период–светимость) полуправильных переменных типа SRA.

Одной из важнейших задач представляется измерение тригонометрических параллаксов и собственных движений членов рассеянных звездных скоплений. Шкала расстояний рассеянных скоплений Галактики лежит в основе общепринятых методов определения фотометрических расстояний до звезд высокой светимости. Ее независимое определение позволит уточнить шкалы расстояний других звезд (прежде всего, высокой светимости), кинематику подсистемы рассеянных скоплений, спиральную структуру диска Галактики, а также выявить фотометрические эффекты, связанные с различиями химического состава и стадий эволюции на диаграмме Герцшпрунга–Рессела, прокалибровать соотношения между болометрическими и широкополосными звездными величинами и связи между показателями цвета и шкалой эффек-

тивных температур. В связи с этим предлагается определить высокоточные тригонометрические параллаксы и собственные движения 1000 членов рассеянных скоплений. Следует, однако, отметить, что определение тригонометрических параллаксов членов скоплений может оказаться невозможным из-за высокой плотности звезд в их полях. Еще одной важной группой индикаторов расстояния являются звезды-сверхгиганты, которые в силу своей высокой светимости могут наблюдаться на больших расстояниях, в том числе и в достаточно далеких галактиках. Для ряда типов сверхгигантов известны хорошие индикаторы светимости. Это эквивалентные ширины (или соответствующие фотометрические индексы) линий водорода (для сверхгигантов спектральных классов O–A3), эквивалентные ширины триплета кислорода на длине волны 7774 \AA (для сверхгигантов спектральных классов A4–G5) или интенсивность полос циана (для сверхгигантов спектральных классов K5–M5). В связи с этим предлагается определить тригонометрические параллаксы 2841 звезды-сверхгиганта нашей Галактики.

Очень большое значение имеет определение не только высокоточных параллаксов, но и высокоточных собственных движений цефеид и членов рассеянных скоплений. Дело в том, что цефеиды и другие молодые объекты тесно связаны с областями текущего звездообразования, и, следовательно, анализ их распределения и движений в Галактике позволяет распознать строение ее спирального узора, наиболее четко намечаемого именно самыми молодыми объектами высокой светимости, и тем самым позволит лучше сравнивать ее с другими галактиками, которые — в отличие от нашей — мы имеем возможность наблюдать со стороны. В настоящее время для большого числа цефеид определены с очень высокой точностью, до 1 км/с, лучевые скорости. Для полноты анализа кинематики этих объектов желательно определение компонент их скоростей, перпендикулярных лучу зрения, со сравнимой точностью. Для этого требуется знание собственных движений для далеких объектов (на расстояниях около 3–5 кпк) с

точностью 60 мкс дуги в год, то есть примерно в 15 раз точнее, чем это возможно в настоящее время.

Наконец, переменные типа Миры Кита и родственные им полуправильные переменные типа SRA тоже подчиняются зависимости период–светимость — но уже в инфракрасной области, которая позволяет определять расстояния индивидуальных объектов с точностью всего около 13%. Калибровка нуль–пункта этой зависимости по данным Гиппаркоса затруднена тем обстоятельством, что не все мириды пульсируют в одном тоне, а точность имеющихся параллаксов не позволяет надежно определять моду пульсации. Эта проблема может быть решена в случае повышения точности определения параллаксов в 10–15 раз, что позволит, наконец, использовать красные полуправильные переменные для определения расстояний до ряда внегалактических объектов.

5.1.5. Коррекция программы

Предложенные выборки звезд в настоящее время несколько превышают по численности требования технического задания на входной каталог. Для жесткого удовлетворения техническим требованиям эксперимента следует ранжировать звезды внутри выборок и собирать общий список одновременно с оптимизацией программы наблюдений по предложенным критериям: по крайней мере половина объектов должна обеспечивать собственную инструментальную систему космического оптического интерферометра (т. е. являться объектами Сетки), не менее 20 процентов списка должны быть тест–объектами для абсолютизации системы отсчета и измерения параметров прибора (таким образом внешняя точность эксперимента программируется на уровне в три раза хуже внутренней). Последнее обстоятельство (худшая внешняя точность) вызвано тем, что объекты для абсолютизации измерений значительно слабее опорных рабочих объектов и реально их наблюдение займет большую часть времени. Требование равенства внутренней и внешней точностей привело бы реально к тому, что интерферометр все время занимался бы наблюдени-

ем очень слабых квазаров и стал бы неспособен работать по собственным программным объектам.

Примерно треть входного списка остается на собственно априорную научную программу и будет только дополняться в процессе работы. Указанное сокращение списка может быть произведено только после уточнения технических параметров спутника и реалистичного моделирования процесса измерений, т. е. на стадии опытно-конструкторских работ.

5.2. Реализация инерциальной системы координат с помощью космического интерферометра-дугомера ОЗИРИС

Основными задачами астрометрии являются построение инерциальной системы координат и определение пространственных положений изучаемых небесных тел. До последнего времени в современной астрометрии при построении опорной системы небесных координат наиболее высокоточными являлись наблюдения внегалактических радиоисточников с помощью наземных радиоинтерферометров. Это связано с тем, что искажения волнового фронта, приходящего от астрономических источников излучения, ограничивают точность координатных измерений в оптическом диапазоне величиной $0,001''$, причем такая точность достижима только для нескольких десятков звезд ярче 2 звездной величины.

Объекты, находящиеся за пределами Галактики, имеют ничтожно малое собственное движение; их взаимное расположение стабильно и позволяет основывать на них систему координат, совершенно независимую от движений наблюдателя – инерциальную систему небесных координат.

Для решения прикладных задач внутри Солнечной системы, наоборот, необходимо знать положение постоянно движущихся Солнца и планет по отношению к наблюдателю, который также движется очень сложным образом. Построение теории всех этих движений основывается на измерении положений светил по отношению к центру Земли. Определяемая

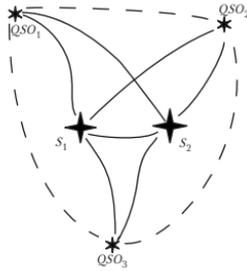


Рис. 5.2. Схема измерений дуг.

этимися наблюдениями система небесных координат называется динамической.

Связь между инерциальной и динамической системами координат устанавливается через наблюдения опорных звезд инерциальной системы наземным наблюдателем и установления мгновенного соответствия между ними, и – на основе накопленного массива измерений – теории учитываемых движений в динамической системе.

Взаимное расположение квазаров (опорных объектов инерциальной системы координат) измерено с субмиллисекундной точностью методами радиоинтерферометрии. Неравномерность распределения квазаров по небесной сфере для задания координатных осей системы не имеет значения.

Большинство точечных внегалактических объектов имеют довольно малую яркость. Ярчайшие из квазаров имеют яркость 12^m . Исходя из особенностей угловых измерений с помощью интерферометра-дугомера, при измерении слабого объекта другой объект в паре должен быть ярким. В соответствии с особенностями измерений для получения координат квазаров с точностью 20 мкс предлагаем схему измерений, представленную на рис. 5.2.

Звезды S_1 и S_2 яркие ($m < 7$), являющиеся буферными при построении системы координат, основанной на квазарах. Сплошными линиями обозначены измеряемые дуги. Пунктирными линиями обозначены определяемые дуги между ква-

зарами. Координаты определяются по формулам сферической тригонометрии из сферических треугольников. Дуга $QSO_1 - QSO_2$ определяется из сферических треугольников $QSO_1 - S_1 - S_2$, $QSO_2 - S_1 - S_2$ и $QSO_1 - QSO_2 - S_1(S_2)$ в соответствии с формулой 5.2. Аналогично определяются и две другие дуги между квазарами (формулы 5.3 и 5.4).

$$\begin{aligned} \cos(QSO_1 - QSO_2) &= \\ &= \cos(QSO_1 - S_1) \cos(QSO_2 - S_1) + \\ &+ \sin(QSO_1 - S_1) \sin(QSO_2 - S_1) \cos(c_1 - c_2), \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \cos(QSO_1 - QSO_3) &= \\ &= \cos(QSO_1 - S_1) \cos(QSO_3 - S_1) + \\ &+ \sin(QSO_1 - S_1) \sin(QSO_3 - S_1) \cos(2\pi - c_1 - c_3), \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \cos(QSO_2 - QSO_3) &= \\ &= \cos(QSO_2 - S_1) \cos(QSO_3 - S_1) + \\ &+ \sin(QSO_2 - S_1) \sin(QSO_3 - S_1) \cos(c_2 + c_3), \end{aligned} \quad (5.4)$$

где:

$$\cos(c_1) = \frac{\cos(QSO_1 - S_2) - \cos(S_1 - S_2) \cos(QSO_1 - S_1)}{\sin(S_1 - S_2) \sin(QSO_1 - S_1)},$$

$$\cos(c_2) = \frac{\cos(QSO_2 - S_2) - \cos(S_1 - S_2) \cos(QSO_2 - S_1)}{\sin(S_1 - S_2) \sin(QSO_2 - S_1)},$$

$$\cos(c_3) = \frac{\cos(QSO_3 - S_2) - \cos(S_1 - S_2) \cos(QSO_3 - S_1)}{\sin(S_1 - S_2) \sin(QSO_3 - S_1)}.$$

5.2.1. Определение собственных движений и параллаксов звезд

Целью наблюдений с помощью интерферометра-дугомера ОЗИРИС является проведение угломерных измерений с микросекундной точностью. Основными определяемыми параметрами при астрометрических наблюдениях являются: положения объектов (экваториальные координаты α и δ); собственные движения звезд μ_α и μ_δ ; параллаксы π .

На основе измерений этих параметров получают знание о геометрии и кинематике Вселенной (по мере возрастания точности измерений – все более и более удаленных ее частей). К основным результатам такого знания относятся:

- построение «инерциальной» системы координат, к которой можно относить движение тел солнечной системы и звезд Галактики;
- определение абсолютных параллаксов всех типов объектов в Галактике, а также некоторых объектов в ближайших галактиках;
- создание базы данных для изучения геометрии Вселенной, для изучения кинематики и динамики Галактики (включая распределение видимой и невидимой материи).

Для реализации других целей требуется знание в первую очередь тригонометрических параллаксов звезд, которые представляют астрофизический и общастрономический интерес.

Методы определения собственных движений и параллаксов

При проведении любых астрометрических измерений определяются угловые координаты объектов на момент наблюдений. Эти координаты изменяются со временем, что является следствием движения объекта в пространстве. Это может быть как движение свободного объекта в пространстве, так и движение внутри гравитационно связанной системы, в том числе системы кратной звезды. Скорости изменения каждой из угловых координат, определяемые в инерциальной системе, называются собственными движениями объекта.

При наблюдениях с Земли или с космического аппарата, к изменениям координат прибавляется параллактическое смещение. Оно обусловлено конечным расстоянием до объекта и вызывается орбитальным движением Земли вокруг Солнца. Параллактическое смещение характеризуется параллаксом. По определению, параллакс равен $\arcsin(a/r)$, где a — величина астрономической единицы, а r — расстояние от центра масс Солнечной системы до объекта.

При традиционно используемых методах абсолютной астрометрии производится определение мгновенных координат объектов. Получив ряд измерений в различные моменты времени осуществляется выделение линейного тренда изменений угловых координат и периодической (с периодом 1 год) компоненты изменений координат. Величина линейного тренда изменений координат численно равна величине собственных движений по обеим координатам, а амплитуда годовых изменений координат равна величине годового параллакса объекта. Таким методом определяются собственные движения и параллаксы при меридианных наземных наблюдениях. В космическом эксперименте Гиппаркос измерения проводились методом непрерывного сканирования небесной сферы. Поправки к координатам, обеспечившие знание точных координат объектов на эпоху каталога, равно как собственные движения и параллаксы объектов, были определены при совместной обработке (уравнивании) всего массива наблюдений. При рассмотренных выше абсолютных методах определения собственных движений определяются по отношению к осям заданной или определяемой системы координат. Точность собственных движений будет тем выше, чем ближе опорная система координат к инерциальной.

При относительных измерениях координат производится измерение собственных движений измеряемых звезд по отношению к выборке близко к ним расположенных на небесной сфере других звезд. Для этого требуется либо точное знание собственных движений этих опорных звезд, либо подтверждение предположения о том, что суммарное собственное движе-

ние этой выборки опорных звезд равно нулю. При наземных фотографических наблюдениях или наблюдениях с приборами с зарядовой связью (ПЗС) обычно считается, что выборка более слабых по блеску звезд в среднем расположена дальше и имеет меньшие собственные движения. В общем случае это утверждение неверно. Все звезды, принадлежащие Галактике, участвуют в ее вращении.

Единственный класс объектов, для которого собственные движения на микросекундном уровне точности можно считать равными нулю² — это достаточно удаленные внегалактические объекты. Среди них наиболее компактными являются квазары и объекты типа VL Lac. К сожалению, ярких объектов этого типа немного, они показывают переменность блеска и неравномерно распределены по небу. Поэтому при узкопольных фотографических и ПЗС измерениях затруднительно привязать измеряемые собственные движения к внегалактическим объектам. Это делается в несколько этапов. К внегалактическим объектам привязываются измеряемые относительные координаты и собственные движения достаточно ярких звезд в их окрестностях, а яркие звезды измеряются абсолютным методом и на их основе строится опорная система координат. В дальнейшем, опять-таки относительным методом, производится распространение этой опорной системы на более слабые звезды.

Параллаксы звезд, также как и собственные движения, могут определяться как абсолютным, так и относительным методом. Относительные измерения осуществляются в настоящее время на длиннофокусных инструментах в малом поле зрения. При этом определяется параллактическое смещение программных звезд относительно некоторого числа опорных объектов. Параллакс опорных объектов должен быть известен или быть пренебрежимо малым. При микросекундном уровне точности ни одна звезда нашей Галактики и ближайших галактик не может считаться достаточно удаленной, чтобы счи-

²Если пренебречь явлениями гравитационного линзирования, описанными в главе 3. *Прим. ред.*

тать ее параллакс равным нулю. Только достаточно удаленные внегалактические объекты, такие как квазары и объекты типа VL Лас, могут считаться достаточно удаленными, чтобы считать их параллакс пренебрежимо малым. Таким образом, обязательным требованием для определения собственных движений и параллаксов с микросекундной точностью является их привязка к системе удаленных внегалактических объектов.

Определение собственных движений и параллаксов звезд из дугомерных измерений

Осуществление позиционных наблюдений по проекту ОЗИРИС представляет собой измерение длин дуг между звездами. При измерении длин дуг между звездами, а не положений звезд, появляется возможность определять абсолютные параллаксы звезд независимо от составления каталога. Именно поэтому, учитывая, что специфической чертой измерения по проекту ОЗИРИС является измерение длины дуги между двумя звездами, нами рассмотрена возможность определения собственных движений и параллаксов звезд непосредственно из дугомерных измерений.



Рис. 5.3. Измерение длины дуги между звездами.

Рассмотрим пару звезд i и j . Измеренную дугу между ними обозначим через ψ_{ij} . Длина дуги выражается через координаты измеряемых звезд следующей формулой:

$$\cos \Psi_{ij} = \sin \delta_i \sin \delta_j + \cos \delta_i \cos \delta_j \cos(\alpha_j - \alpha_i). \quad (5.5)$$

В силу малости величин собственных движений и параллаксов, изменение длины дуги за время t может быть получено из дифференциальной формы, записанной как:

$$-\sin \Psi_{ij} \Delta \Psi_{ij} = \Delta_0 + \Delta \mu t + \pi_i f_{ij}(t) + \pi_j f_{ji}(t) + f_{ij}(t), \quad (5.6)$$

где: Δ_0 — компонента, уточняющая координаты объектов; $\Delta \mu$ — компонента, обусловленная собственными движениями звезд; $\pi_i f_i(t)$ и $\pi_j f_j(t)$ — компоненты, обусловленные параллаксами звезд; $f_{ij}(t)$ — компонента, обусловленная возможным вхождением одной или обеих звезд в состав двойной или кратной системы.

Рассмотрим определение только компонент, обусловленных собственными движениями и параллаксами звезд. Поскольку параллакс обусловлен движением Земли вокруг Солнца, параллактическое смещение происходит в системе координат, задаваемой движением Земли вокруг Солнца, то есть в эклиптических координатах (β, λ) . Тогда координаты звезд будут (β_i, λ_i) и (β_j, λ_j) . Соответственно для каждой из звезд обозначим тригонометрический параллакс и компоненты собственного движения через $\pi_i, \mu_{\lambda_i}, \mu_{\beta_i}$ и $\pi_j, \mu_{\lambda_j}, \mu_{\beta_j}$.

Изменение длины дуги между звездами за счет собственных движений $\Delta \mu$ можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \Delta \mu = & \\ = \mu_{\beta_i} \cdot t \cdot [\cos \beta_i \cdot \sin \beta_j - \sin \beta_i \cdot \cos \beta_j \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_j)] + & \\ + \mu_{\beta_j} \cdot t \cdot [\sin \beta_i \cdot \cos \beta_j - \cos \beta_i \cdot \sin \beta_j \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_j)] - & \\ - (\mu_{\lambda_i} - \mu_{\lambda_j}) \cdot t \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \beta_j \cdot \sin(\lambda_i - \lambda_j), & \end{aligned} \quad (5.7)$$

где t — время, отсчитываемое от принятой эпохи.

Наблюдая данную пару звезд в два разнесенных момента времени, можно определить линейную комбинацию β -компонент собственных движений каждой из звезд и разности λ -компонент собственных движений обеих звезд.

Изменения длины дуги между двумя звездами за счет тригонометрических параллаксов звезд f_{ij} и f_{ji} можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
f_{ij} = & \cos \beta_i \cdot \sin \beta_i \cdot \sin \beta_j \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_{\oplus}) + \\
& + \cos^2 \beta_i \cdot \cos \beta_j \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_j) \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_{\oplus}) - \\
& - \cos \beta_i \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_j) \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_{\oplus}) - \\
& - \cos \beta_j \cdot \sin(\lambda_i - \lambda_j) \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_{\oplus}),
\end{aligned} \tag{5.8}$$

$$\begin{aligned}
f_{ji} = & \cos \beta_j \cdot \sin \beta_j \cdot \sin \beta_i \cdot \cos(\lambda_j - \lambda_{\oplus}) + \\
& + \cos^2 \beta_j \cdot \cos \beta_i \cdot \cos(\lambda_j - \lambda_i) \cdot \cos(\lambda_j - \lambda_{\oplus}) - \\
& - \cos \beta_j \cdot \cos(\lambda_j - \lambda_i) \cdot \cos(\lambda_j - \lambda_{\oplus}) - \\
& - \cos \beta_i \cdot \sin(\lambda_j - \lambda_i) \cdot \sin(\lambda_j - \lambda_{\oplus}),
\end{aligned} \tag{5.9}$$

где λ_{\oplus} — эклиптическая долгота Земли. Зависимость величин f_{ij} и f_{ji} происходит вследствие изменения эклиптической долготы Земли с течением времени.

Тригонометрические параллаксы обеих звезд в паре могут быть определены из по крайней мере двукратных наблюдений (в два момента времени) длины дуги между двумя звездами. Таким образом, произведя наблюдения дуги Ψ_{ij} в четыре момента времени, мы сможем отделить изменение длины дуги за счет параллаксов от изменения длины дуги за счет собственных движений обеих звезд. Если мы выберем 2 момента времени для определения изменения дуги Ψ_{ij} за счет собственных движений звезд пары, то для раздельного определения параллаксов π_i и π_j необходимо использовать еще два наблюдения в моменты, не совпадающие с выше обозначенными.

Детерминант системы уравнений для определения тригонометрических параллаксов в этом случае можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
\det = & \sin \Psi_{ij} \cos \beta_i \cos \beta_j \sin(\lambda_j - \lambda_i) \times \\
& \times [\sin(\lambda_0^{(3)} - \lambda_0^{(2)}) + \sin(\lambda_0^{(2)} - \lambda_0^{(1)}) + \\
& + \sin(\lambda_0^{(1)} - \lambda_0^{(3)})],
\end{aligned} \tag{5.10}$$

где: $\lambda_0^{(k)}$ — эклиптическая долгота Солнца в момент времени t_k .

Наилучшее определение тригонометрических параллаксов может быть получено при максимальном значении модуля детерминанта системы. Максимальное значение, равное единице, достигается при $\beta_i = \beta_j = 0$, $\lambda_i - \lambda_j = \pi/2$, $l = \pi/2$, $(\lambda_0^{(1)} - \lambda_0^{(3)}) = \pi/2$ (т. е. интервал между наблюдениями (5.5) и (5.6) равен 1/4 года).

Таким образом, при дугомерных измерениях абсолютные тригонометрические параллаксы могут определяться из каждой измеренной дуги между двумя звездами. Эти определения параллаксов не зависят от создания каталога, реализующего опорную систему координат. Наилучшим образом этим методом, как это следует из рассмотрения формулы (5.10), могут быть определены параллаксы звезд, не слишком далеко отстоящих от плоскости эклиптики.

В отличие от тригонометрических параллаксов, при измерениях дуги между двумя звездами, как следует из формулы (5.7), может быть определена лишь комбинация собственных движений двух звезд. То есть, из измерений одной дуги может быть определена одна комбинация из четырех компонент собственных движений звезд, а именно разность проекций собственных движений звезд на измеряемую дугу. Для получения собственных движений индивидуальных звезд необходимо проводить наблюдения группы звезд.

При измерении длин дуг в группе, состоящей из n звезд, общее число дуг определяется как число сочетаний из n по два. Длины дуг оказываются связанными через формулы сферических треугольников. Независимыми являются длины только $n_2 = 2n - 3$ длин дуг. Каждая измеренная длина дуги может рассматриваться как линейное уравнение относительно неизвестных величин собственных движений звезд. Число определяемых величин компонент собственных движений составляет $2n$ (две компоненты собственного движения у каждой звезды). То есть, при любой выборке звезд число неизвестных превышает число уравнений для их определений на три. Так как каждая звезда имеет две компоненты собственных движений, то для нахождения собственных движений

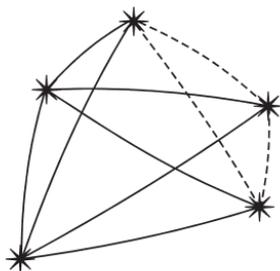


Рис. 5.4. Измерение группы звезд методом дугомерных измерений. Жирной линией показаны независимые дуги, а пунктирной линией — дуги, длина которых однозначно определяется через длины независимых дуг.

всех звезд в измеряемой группе необходимо знание собственных движений по крайней мере двух звезд. На микросекундном уровне точности это возможно только включением в каждую измеряемую группу по крайней мере двух удаленных внегалактических объектов: квазаров или лацертид. За счет измерения дуг, длины которых являются зависимыми, может быть обеспечена избыточность условных уравнений для определения неизвестных величин методом наименьших квадратов или методом максимального правдоподобия. Измерения дополнительного набора дуг, длины которых являются зависимыми, позволит также обеспечить калибровку инструмента. При этом группа звезд для определения собственных движений может быть как ограниченной по числу звезд, так и включать весь набор измеряемых объектов за период работы инструмента.

Влияние двойственности звезд на точность определения собственных движений и параллаксов

При угловых измерениях с помощью интерферометра-дугомера определяется положение фотометрического центра наблюдаемого объекта. Если объект имеет структуру с угловыми размерами, меньшими углового разрешения прибора ($0.2''$ в слу-

чае инструмента ОЗИРИС), но превышающими точность угломерных измерений (20 мкс дуги), то фотометрический центр изображения будет перемещаться в соответствии с вращательным движением объекта. Такая структура может быть обусловлена асимметрией градиента яркости по лимбу звезды, наличием газовых оболочек, колец и потоков. Все эти явления при микросекундной точности угломерных измерений неизбежно приведут к появлению периодических и систематических уклонений центров светимости объектов от прямолинейного движения и, как следствие, — к ошибкам, способным очень быстро размыть субмиллисекундный астрометрический каталог. Если измеряемый объект является двойной звездой, то при орбитальном движении компонент тоже будет происходить периодическое (с периодом обращения двойной звезды) смещение фотометрического центра объекта.

Более половины всех звезд нашей Галактики входят в состав двойных и кратных систем. Таким образом, объектов, подверженных периодическим и систематическим смещениям, вероятно, будет очень много. При величине периода обращения двойной звездной системы вокруг барицентра более 0,1 года, смещение фотоцентра превосходит 1 мс дуги и вероятное количество таких звезд приближается к 30%. Смещаются звезды и своими планетами и другими невидимыми спутниками. Например, с расстояния 100 пк Солнце смещается Юпитером на 50 мкс дуги. Плотность заселенности Галактики планетными системами нам неизвестна, неизвестно и количество невидимых спутников звезд, но именно задача поиска планетных систем выходит в настоящее время в первоочередные задачи астрономии.

При микросекундной точности становится необходимым, как мы отмечали, выявить и определить периодические компоненты собственных движений всех наблюдаемых объектов. Программа наблюдений должна быть настолько универсальной, чтобы можно было выявить индивидуальные периодические компоненты во всем диапазоне длительностей периодов, доступных наблюдениям инструментом ОЗИРИС — от

нескольких суток до нескольких лет. Например, при десятилетней длительности наблюдений, можно будет уверенно выявить двойные звезды и планетные системы с длительностями орбитальных периодов до 15 лет.

При использовании интервалов между наблюдениями избранной звезды, распределенных по геометрической прогрессии или ряду Фибоначчи, для такого выявления достаточно 20–30 наблюдений за десятилетний период наблюдений. Благодаря такому порядку наблюдений, можно уверенно выявлять периодические компоненты с любой длительностью периода от 4 суток до 15 лет, поскольку для каждого периода можно отыскать 3–4 точки, делящие этот период на 3–4 приблизительно равные между собою части. Конечно не весь входной каталог звезд будет наблюдаться синхронно: его надо разбить на группы и каждая группа должна наблюдаться по своему графику, причем половину групп, по-видимому, надо наблюдать в обратном порядке — с увеличением темпа наблюдений.

Как следует из формулы (5.6), все измерения длин дуг могут зависеть от возможного вхождения измеряемой звезды в состав двойной или кратной системы. Неучет смещения фотометрического центра изображения измеряемой звезды за счет орбитального движения вокруг центра масс системы неизбежно приведет к ошибкам в определении параллакса и собственных движений звезды. Таким образом, для корректного определения параллакса и собственных движений необходимо исключить влияние орбитального движения в двойной системе на значение наблюденной длины дуги между звездами. В случае достаточно долгопериодических двойных звезд для такого исключения разработана следующая методика.

Рассмотрим измерения в 4 последовательных года в одни и те же даты. В каждый из годов, измерения проводятся в несколько дат. В этом случае компонента в длине дуги, обусловленная параллаксами, будет одинаковой при наблюдениях в каждый из 4 годов в соответствующую дату. Считая, что период обращения в двойной системе намного превосходит 4

года, компоненты в длине дуги, обусловленные орбитальными и собственными движениями, могут быть интерполированы на моменты измерений длины дуги внутри четырехлетнего цикла наблюдений. Вычитая интерполированные значения этих компонент, получаем, что остаточная длина дуги будет содержать только компоненту, обусловленную параллаксами измеряемых звезд. По двум измерениям длины дуги в течение года параллаксы обеих звезд определяются. При этом полученные значения параллаксов не будут отягощены ошибками, обусловленными двойственностью измеряемых звезд.

Были проведены модельные расчеты ошибок определения параллаксов в зависимости от длительности периода обращения. В этих расчетах считалось, что одна из звезд, входящих в пару, является одиночной, а вторая является двойной. Расчеты выполнялись для широкого набора эксцентриситетов (от 0 до 0.7), наклонов орбит (от 0 до 90°) и периодов (от 10 до 1000 лет) двойной звезды. В результате этих расчетов оказалось, что ошибки определения параллаксов зависят от периода обращения в двойной системе следующим образом:

$$\sigma_{\pi} = 127 \exp(-0.176T), \quad (5.11)$$

где T — период обращения двойной системы в годах; σ_{π} — ошибка определения параллаксов в мкс дуги.

На рисунке 5.5 приведены расчетные изменения длины дуги между звездами в случае, когда одна из звезд является долгопериодической двойной системой. Также показаны компоненты длины дуги, обусловленные параллаксами, собственными движениями и орбитальным движением в двойной системе.

Таким образом, предложенная методика позволяет определять параллаксы, свободные от эффектов двойственности в случае длительных периодов обращения в двойной системе.

Для случая коротких периодов обращения (менее 1 года) в двойной системе разработана другая методика. Для учета

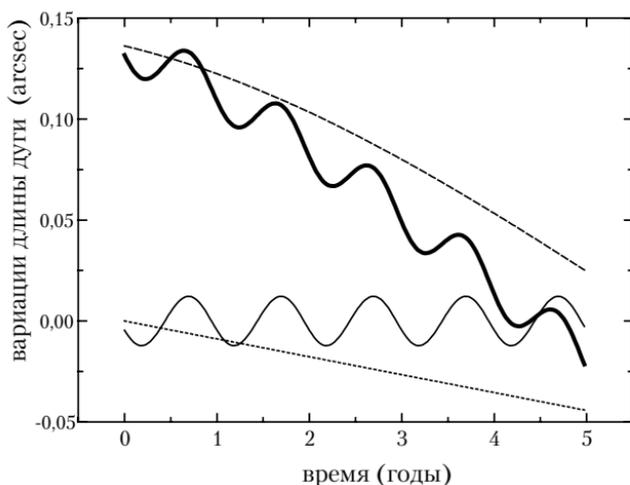


Рис. 5.5. Изменения длины дуги между звездами на интервале 5 лет (*жирная линия*), *тонкой линией* показана компонента, обусловленная параллаксом звезд, *пунктирной линией* — компонента, обусловленная орбитальным движением в двойной системе, *короткими штрихами* — компонента, обусловленная собственными движениями.

эффекта двойственности рассмотрим измерения длины дуги между звездами в 3 последовательных года в набор одних и тех же дат в течение каждого года. На рисунке 5.6 приведены расчетные изменения длины дуги между звездами в случае, когда одна из звезд является короткопериодической двойной системой. Образует разности между длинами дуг, измеренными в разные моменты времени: 1) в одни и те же даты второго и первого годов наблюдений; 2) в одни и те же даты третьего и второго годов измерений. Величины этих разностей приведены на рисунке 5.7. Виден сдвиг по фазе графиков этих двух разностей. Величина фазового сдвига составляет:

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t \pm 2\pi n, \quad (5.12)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$, Δt равняется 1 году.

Выбирая моменты измерений длины дуги для определе-

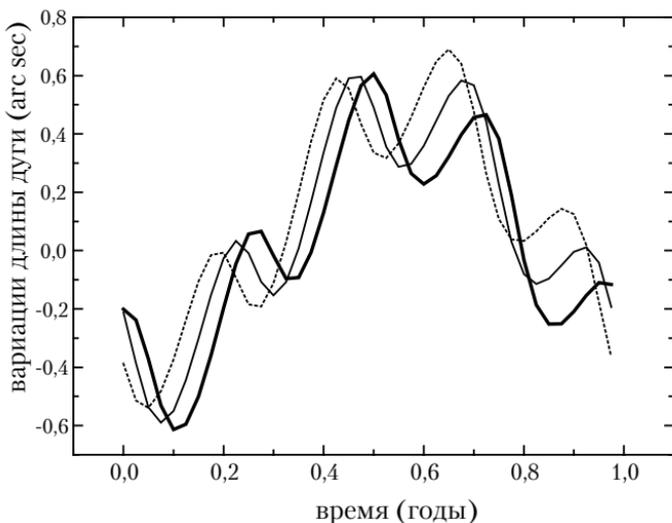


Рис. 5.6. Изменения длины дуги со временем в течение года: *жирной линией* показаны изменения в течение первого года, *тонкой линией* — в течение второго года, *пунктирной линией* — в течение третьего года.

ния параллакса и собственных движений в течение годов наблюдений так, что интервал времени между ними составляет

$$\delta t = \Delta t + (1 \text{ год}) \cdot \Delta\varphi/2\pi, \quad (5.13)$$

получим, что в формуле (5.6) величина компоненты, обусловленной двойственностью звезд, будет одинаковой в каждый год измерений. Проведенные модельные расчеты показали применимость предложенной методики. Таким образом, могут быть определены величины параллакса и собственных движений звезд, свободные от эффектов двойственности в случае короткопериодических двойных систем.

Следовательно, имеется возможность избежать ошибок определения параллакса из дугомерных измерений в случае вхождения одной или обеих звезд пары в состав двойной системы.

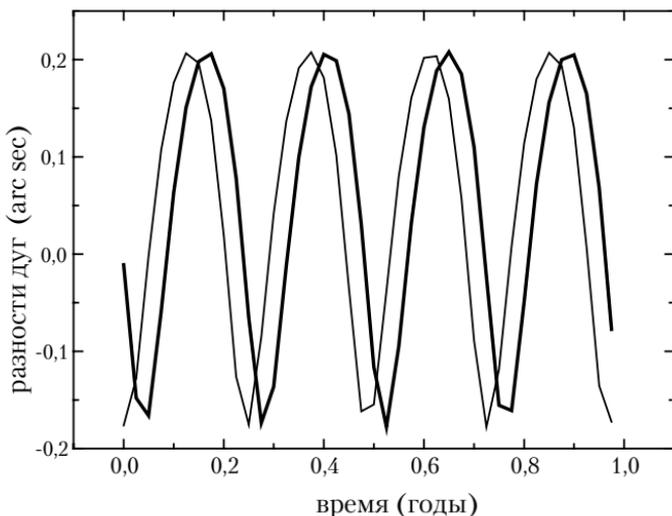


Рис. 5.7. Разности измеренных длин дуг в одни и те же даты: *жирной линией* показана разность между измеренными длинами дуг во второй и первый годы; *тонкой линией* — в третий и второй годы наблюдений.

5.3. Наблюдения двойных звезд и экзопланет

Помимо измерений длин дуг между двумя звездами, с помощью интерферометра ОЗИРИС можно исследовать структуру источника излучения.

В общем случае интенсивность излучения двух сложенных монохроматических пучков света с видностью интерференционных полос, равной V , составляет [11]:

$$I = J_0(\lambda) \left\{ 1 + V \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\ell_1 - \ell_2 + B \cos \beta) \right] \right\}, \quad (5.14)$$

где: $J_0(\lambda)$ — интенсивность излучения в каждом плече интерферометра; λ — длина волны, $\ell_1 + B \cos \beta$ — длина хода лучей в левом плече интерферометра, ℓ_2 — то же в правом плече, B — длина базы, β — измеряемый угол направления на звезду.

Контрастность интерференционных полос характеризуют видностью полос V , которая определяется формулой:

$$V = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}}. \quad (5.15)$$

Из формулы (5.14) видно, что при изменении угла β происходит изменение разности хода. В случае, если два объекта находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, можно выбрать величину длины базы так, что максимум интерференционной полосы второго объекта будет приходиться на минимум интерференционной полосы первого объекта. В этом случае появляется возможность проводить прямые измерения слабого объекта на очень малом угловом расстоянии от значительно более яркого. Для определения углового расстояния между объектами необходимо проводить наблюдения с набором различных длин баз. Такой метод называют нуллинг-интерферометрией.

Инструмент ОЗИРИС представляет собой двухбазовый интерферометр с совмещенными базами. Каждый из интерферометров выполнен по схеме Майкельсона.

Входные телескопы ограничивают поле зрения собираемого света углом дифракции входных апертур. Угловой диаметр поля зрения составляет $1.22\lambda/D$, где D диаметр входных апертур телескопов. Это накладывает ограничение на максимальное угловое расстояние между объектами, которое может измеряться методом нуллинг-интерферометрии. При диаметре входной апертуры 20 см (ОЗИРИС) оно составляет $0.24''$ для длины волны 0.4 мкм. Первая темная интерферометрическая полоса приходится на участок с угловым расстоянием от центральной звезды $\lambda/(2B \sin \beta)$, соответственно вторая темная полоса — на $3\lambda/(2B \sin \beta)$. Инструмент ОЗИРИС имеет фиксированную длину базы. Нуллинг-интерферометрия может быть осуществлена путем наблюдений одного и того же объекта с различными углами β . Диапазон допустимых углов β в инструменте ОЗИРИС составляет $35^\circ - 75^\circ$. При длине базы 2 м минимальное угловое удаление первой тем-

ной полосы составляет $0.021''$ для длины волны 0.4 мкм. Таким образом, пределы угловых измерений методом нуллинг-интерферометрии для инструмента ОЗИРИС заключены в интервале $0.021'' - 0.24''$.

Для осуществления нуллинг-интерферометрии необходимо, чтобы видность интерференционных полос была близкой к 1. Для удобства дальнейших вычислений введем величину ε — остаточную интенсивность в темной интерференционной полосе. Она однозначно связана с видностью полос:

$$\varepsilon = \frac{1 - V}{V}. \quad (5.16)$$

В инструменте ОЗИРИС в плоскости светоприемника может регистрироваться несколько интерференционных полос. При этом осуществляется одновременная регистрация в длинах волн $0.4 - 0.8$ мкм.

Пусть мы имеем два объекта (с интенсивностью излучения J_1 и J_2 , причем $J_1 \gg J_2$), разнесенных на небольшое угловое расстояние так, что максимум интенсивности интерференционной полосы второго объекта приходится на минимум интерференционной полосы первого объекта. Будем проводить регистрацию сигнала в области, центрированной на минимум интерференционной полосы первого объекта и имеющей полуширину, соответствующую разности хода δ . Проинтегрировав в пределах $(-\delta, +\delta)$ интенсивность интерференционных полос от первого и второго объектов, получаем:

$$S = \left[J_1 \left(1 + \varepsilon - \frac{\sin \delta}{\delta} \right) + J_2 \left(1 + \varepsilon - \frac{\sin \delta}{\delta} \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right) \right] \cdot \frac{2\delta}{\theta}, \quad (5.17)$$

где x — разность оптического хода лучей в интерферометре для второго объекта, по сравнению с первым, задаваемая угловым расстоянием между объектами: $x = B \sin \beta \Delta\beta$, где $\Delta\beta$ — угловое расстояние между объектами, а θ — интервал разностей оптического хода, регистрируемого в интерферометре.

В формуле (5.17) имеются три малых параметра: ε и δ в явном виде и еще один малый параметр (J_2/J_1) в неявном виде. Разлагая в ряд по всем малым параметрам и оставляя члены до второго порядка малости, получаем:

$$S = P + Q \cos(2\pi x/\lambda), \quad (5.18)$$

где: $P = J_1(2\delta/\theta)[\delta^2/3 + \varepsilon + (J_2/J_1)(1 + \varepsilon)]$, $Q = J_2(2\delta/\theta)$.

Максимальное изменение регистрируемого излучения за счет изменения разности длин оптических ходов от первого и второго объектов составляет $2Q$. А максимальный регистрируемый сигнал равен $P + Q$. Если величины регистрируемого излучения выразить в числе зарегистрированных событий, то среднеквадратическое отклонение регистрируемого сигнала составит $(P+Q)^{1/2}$. Для уверенной регистрации (на уровне 3σ) изменений сигнала при варьировании величины разности оптических ходов требуется, чтобы

$$(P + Q)^{1/2} < 2Q/3. \quad (5.19)$$

Для рассмотрения более общего случая введем величину k , характеризующую превышение сигнала над ошибкой так, что:

$$(P + Q)^{1/2} < Q/k. \quad (5.20)$$

Это неравенство может быть разрешено относительно величины δ . Данное неравенство выполняется при $\delta_1 < \delta < \delta_2$, где δ_1 и δ_2 — корни уравнения, получающегося при знаке равенства в неравенстве (5.20). Дискриминант этого уравнения равен:

$$\frac{9J_2^2}{k^4\theta^2} \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^2 - 3\varepsilon - 3. \quad (5.21)$$

Для существования двух вещественных корней необходимо, чтобы дискриминант был положительным. Отсюда получаются требования к двум малым параметрам (ε и J_2/J_1) и яркости второго объекта (J_2):

$$J_2^2 \geq \frac{k^4 \theta^2}{3} \left[\varepsilon + (2 + \varepsilon) \left(\frac{J_2}{J_1} \right) \right] / \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^2, \quad (5.22)$$

$$\varepsilon \leq \frac{\frac{3J_2^2}{k^4 \theta^2} \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^2 - 2 \left(\frac{J_2}{J_1} \right)}{1 + \left(\frac{J_2}{J_1} \right)}, \quad (5.23)$$

$$\left(\frac{J_2}{J_1} \right) \geq \frac{k^4 \theta^2}{6J_2^2} (2 + \varepsilon) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{12J_2^2}{k^4 \theta^2} \cdot \frac{\varepsilon}{(2 + \varepsilon)^2}} \right) \quad (5.24)$$

Эти три неравенства ((5.22)–(5.24)) определяют область возможности осуществления нуллинг-интерферометрии с помощью оптического интерферометра схемы Майкельсона.

Рассмотрим возможность осуществления нуллинг-интерферометрии с помощью инструмента ОЗИРИС. Примем для параметров, входящих в неравенства (5.22)–(5.24), следующие значения: $k = 1.5$, $\theta = \pi$. При квантовой эффективности светоприемника 10%, получаем следующую зависимость величины J_2 (в числе зарегистрированных событий) от звездной величины второго объекта (m_2) и времени накопления t (в секундах):

$$J_2 = 3 \cdot 10^{7-0.4m_2 t}. \quad (5.25)$$

Подставляя эти значения в неравенство (5.22), получаем минимальное значение времени накопления для регистрации объекта звездной величины m :

$$\lg t = 0.4m_2 + 0.5 \lg[2 + \varepsilon + \varepsilon \left(\frac{J_2}{J_1} \right)] - 0.5 \lg \frac{J_2}{J_1} - 6.8862. \quad (5.26)$$

Остаточная интенсивность интерференционных полос (ε) зависит от следующего:

- а) качества оптики инструмента;

- б) высокочастотной составляющей ошибок наведения инструмента;
- в) конечности углового размера диска звезды.

Для оптического интерферометра Майкельсона, размещенного на искусственном спутнике Земли, при наблюдении точечного объекта достижима величина остаточной интенсивности интерференционных полос $\varepsilon = 10^{-4}$ (материалы проекта [107]). Для источника излучения конечного углового размера (угловой радиус — r) на угловом расстоянии минимума интерференционной полосы d имеем:

$$\varepsilon = 10^{-4} + \frac{1}{6} \left(\frac{r}{d} \right)^2. \quad (5.27)$$

Соотношения (5.26) и (5.27) позволяют оценить возможность детектирования объектов.

Рассмотрим использование инструмента ОЗИРИС для прямых наблюдений экзопланет. На сегодняшний день известно более 100 экзопланет [69]. Для 99 из них известны тригонометрические параллаксы, позволяющие определить видимую звездную величину и угловое расстояние между звездой и планетой. Все экзопланеты имеют массу в интервале 0.3–15 масс Юпитера. Известно, что в этом диапазоне масс диаметр планеты мало зависит от ее массы. Поэтому для оценок мы взяли все планеты идентичными по своим фотометрическим характеристикам Юпитеру. Для величины фазового угла 90° получаем:

$$\lg(J_2/J_1) = -7.297 - 2 \lg(a)m_2 = m_1 + 5 \lg(a) + 18.24, \quad (5.28)$$

где a — большая полуось орбиты экзопланеты в а.е.; m_1 и m_2 — видимые звездные величины звезды и экзопланеты соответственно. На рисунке 5.8 приведены видимые звездные величины всех 99 экзопланет в зависимости от логарифма углового расстояния от звезды. Из рисунка видно, что все экзопланеты имеют яркость от 16^m до 29^m . Причем, при угловых рассто-

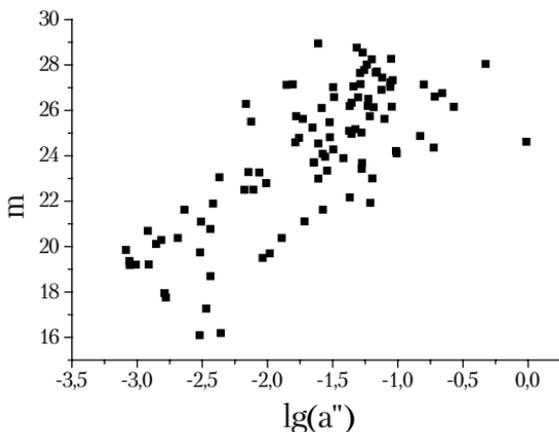


Рис. 5.8. Видимые звездные величины экзопланет в зависимости от углового расстояния между экзопланетой и звездой.

яниях свыше $0.021''$ (доступные для ОЗИРИСа) — от 21.5^m до 29^m .

Используя формулу (5.26), определена минимально достаточная длительность накопления сигнала для детектирования экзопланеты на уровне 3σ с помощью инструмента ОЗИРИС. Результаты представлены на рисунке 5.9.

Из рисунка 5.9 видно, что при угловом расстоянии планеты от звезды свыше $0.021''$ две экзопланеты могут быть зарегистрированы за время $3 \cdot 10^6$ с. Остальные экзопланеты — за существенно большее время. Так что можно сделать вывод — с помощью инструмента ОЗИРИС невозможно провести прямые наблюдений ни одной из известных экзопланет. В случае увеличения базы до 4.5 м доступными для наблюдений становятся 2 экзопланеты при временах накопления сигнала около 10 часов. При увеличении длины базы до 10 м, доступной для наблюдений станет еще одна экзопланета, с временем регистрации 0.3 часа. При длине базы 15 м — еще 3 экзопланеты станут доступными для наблюдений. Для увеличения списка экзопланет, доступных для наблюдения, хотя бы еще на одну

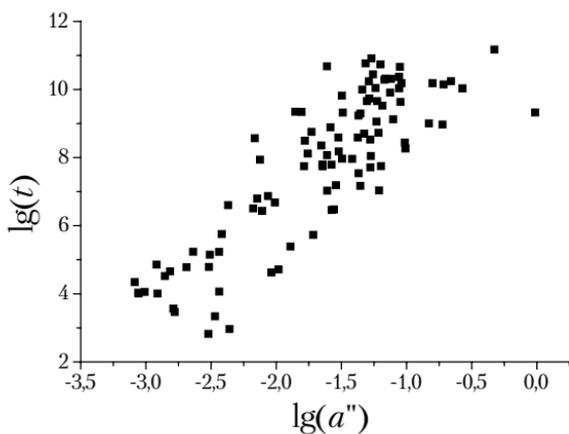


Рис. 5.9. Логарифм минимально необходимой длительности накопления сигнала для регистрации экзопланет на уровне 3σ с помощью инструмента ОЗИРИС в зависимости от углового расстояния между экзопланетой и звездой.

экзопланету потребуется длина базы свыше 21 м. Таким образом, даже для оптического интерферометра с длиной базы 15–20 м доступными для наблюдений методом нуллинг-интерферометрии окажутся только 6 экзопланет (из известных в настоящее время).

Помимо экзопланет, методом нуллинг-интерферометрии могут проводиться наблюдения двойных звезд. Доступными для наблюдений с помощью инструмента ОЗИРИС окажутся несколько сот двойных звезд, для которых может быть определена орбита каждой компоненты. Методом наземной оптической интерферометрии изображений успешно проводятся исследования двойных звезд со сравнительно малой разностью звездных величин компонент. С помощью инструмента ОЗИРИС доступными для наблюдений станут двойные звезды с разностью звездных величин компонент до 10^m . Вопрос о возможности наблюдений тесных двойных систем нуждается в дальнейшей проработке.

5.4. Бюджет ошибок

При астрометрических измерениях с помощью инструмента ОЗИРИС измеряется угловое расстояние (длина дуги) между двумя звездами. На основе этих измерений и моментов времени, в которые они произведены, получают поправки к координатам звезд, их собственные движения, параллаксы и другие параметры, например, характеризующие двойственность звезд. В этом разделе мы рассмотрим только ошибки, связанные с измерениями, и не будем касаться окончательных ошибок определения астрометрических характеристик измеряемых звезд. Ошибки определения длины дуги между звездами носят как случайный, так и систематический характер. Рассмотрим основные источники ошибок. Их два: во-первых, это ошибки, связанные с инструментом, а во-вторых, ошибки, связанные с редукцией полученных данных.

С инструментом связаны следующие ошибки: (1а) наведение инструмента на звезды, (1б) поддержание ориентации инструмента, (1в) несовпадение баз, (1г) ошибки метрологической системы, (1д) ошибки при регистрации сигнала, (1е) ошибки оптического тракта инструмента.

Эти ошибки обусловлены следующими причинами: конечной точностью изготовления, наличием внутренних подвижек вследствие недостаточной жесткости конструкции, термических эффектов, недостаточной стабильности метрологической системы и системы регистрации сигнала, а также вследствие старения материалов и целого ряда других причин.

Ошибки, связанные с инструментом, включают в себя как случайные ошибки, так и систематические. При этом систематические ошибки имеют зависимость от времени в широком спектре частот. Для наиболее низкочастотной части систематических ошибок строится их модель, позволяющая вносить коррекцию на основе калибровок инструмента. Калибровки включают как внутренние тесты, например измерение шумовых и других характеристик светоприемника, так и специальные калибровочные наблюдения пар «эталонных» звезд, урав-

нивание наблюдений групп звезд, в которых имеются дуги, длины которых не являются независимыми от длин других дуг в группе.

Ошибки, связанные с редукцией измерений включают, прежде всего, (2а) ошибки навигационного обеспечения, ограничивающие точность внесения поправок за аберрацию света. Ошибки навигационного обеспечения носят как случайный, так и систематический характер. Величина и случайных и систематических ошибок зависит от угловых координат обеих измеряемых звезд и положения космического аппарата на орбите. Обозначим систематическую компоненту ошибки измеряемой длины дуги между звездами в результате ошибок навигационного обеспечения как $\Delta\psi_N$, а случайную компоненту — как $\delta\psi_N$. Другой источник ошибок редукции — (2б) за искривление световых лучей в неоднородном гравитационном поле Солнечной системы — может быть учтен с достаточно высокой точностью в рамках принятой теории гравитации.

Дополнительным источником ошибок определения координат объекта является наличие других источников излучения в близких окрестностях измеряемой звезды. Это могут быть и спутники звезды (физические и оптические), неразделенные звезды фона, туманности и галактики, прохождения астероидов и других космических объектов через поле зрения инструмента. Влияние этих ошибок обратно пропорционально блеску измеряемой звезды. Факторы, связанные с неоднородностью межпланетной и межзвездной среды, при длине базы 2 метра и наблюдениях в оптическом диапазоне влияния на точность измерения не оказывают.

5.4.1. Ошибки наведения и установки инструмента

При наведении инструмента на пару звезд совмещенная база интерферометров выставляется в плоскости, задаваемой на небесной сфере этими звездами. Обозначим ошибку наведения в направлении, перпендикулярном этой плоскости как $\Delta\theta$ (см. рис. 5.10). В процессе наблюдений пары звезд ориентация обоих интерферометров поддерживается с неко-

торой точностью. Будем характеризовать точность поддержания ориентации углами $\delta\varphi$ и $\delta\theta$ в направлении вдоль и поперек измеряемой дуги, соответственно. Таким образом, мы принимаем, что ошибки наведения и поддержания ориентации в направлении перпендикулярном измеряемой дуге имеют нормальное распределение с ненулевым математическим ожиданием $\Delta\theta$ и дисперсией $\delta\theta$. Распределение же ошибок вдоль измеряемой дуги принимается нормальным с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\delta\varphi$. Для каждого интерферометра, составляющего дугомер, эти величины будем обозначать с индексами 1 и 2, соответственно. Хотя считается, что оба интерферометра имеют общую базу, это верно только с определенной точностью. На рисунке 5.10 показаны две входные точки A и B . Длина совмещенной базы измеряется между точками A_0 и B_0 , длины плеч первого интерферометра — до точек A_1 и B_1 , а второго интерферометра — до точек A_2 и B_2 .

При этом фактические базы каждого из интерферометров оказываются несовпадающими между собой и с измеряемой совмещенной базой. Они не совпадают ни по длине, ни по направлению. Будем характеризовать угловое несовпадение между базами двумя углами, по аналогии с ошибками установки инструмента, то есть вдоль измеряемой дуги — ϕ и в перпендикулярном направлении — ϑ . С помощью каждого из интерферометров, входящих в дугомер, измеряется угол β между направлением базы интерферометра и направлением на звезду. Измеряемые углы, ошибки наведения и ошибки углового несовпадения баз показаны на рисунке 5.11.

Из рисунка 5.11 легко увидеть, что ошибка наведения в направлении, перпендикулярном измеряемой дуге, для первого интерферометра составляет $\Delta\theta_1 = \Delta\theta + \vartheta/2$, а для второго интерферометра — $\Delta\theta_2 = \Delta\theta - \vartheta/2$, где, как было отмечено выше, величина $\Delta\theta$ есть математическое ожидание нормального распределения ошибки наведения и поддержания ориентации в направлении перпендикулярном измеряемой дуге.

Существование ошибок наведения, поддержания ориента-

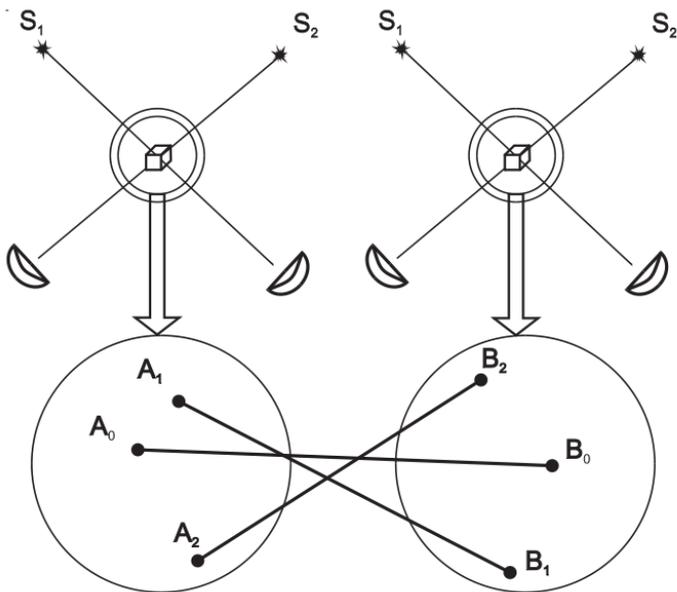


Рис. 5.10. Несовпадение баз интерферометров.

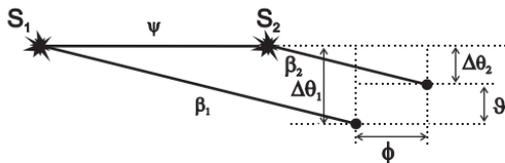


Рис. 5.11. Дугомерные измерения в случае несовпадения баз и ошибок установки.

ции и углового несовпадения баз приводит к следующей систематической ошибке измерения длины дуги между звездами:

$$\Delta\psi_S = \phi + \operatorname{ctg} \beta_1 (\Delta\theta_1 + \delta\theta_1)^2 - \operatorname{ctg} \beta_2 (\Delta\theta_2 + \delta\theta_2)^2. \quad (5.29)$$

В этой формуле каждая сумма в круглых скобках может интерпретироваться как ошибка соответствующего интерферометра.

Из формулы (5.29) видно, что указанные систематические ошибки действуют в сторону занижения длины измеряемой дуги между звездами. Величина угла ϕ может быть определена из калибровочных измерений, например, из серии наблюдений одной и той же пары звезд при разной ориентации базы интерферометра.

Случайная ошибка, обусловленная ошибками наведения и поддержания ориентации в направлении вдоль измеряемой дуги, приводит к снижению видности интерференционных полос.

Следовательно, систематические ошибки наведения, рассовмещения баз интерферометров и случайные ошибки поддержания ориентации в плоскости, перпендикулярной направлению дуги между измеряемыми звездами, приводят к появлению систематической ошибки в длине измеряемой дуги, а случайные ошибки поддержания ориентации в направлении перпендикулярном измеряемой дуге — к снижению видности интерференционных полос и, тем самым, к уменьшению точности измерений. Снижение видности можно характеризовать коэффициентом $K < 1$, на который умножается величина исходной видности полос. Обозначим тот коэффициент, который обусловлен влиянием ошибок наведения и поддержания ориентации, индексом S :

$$K_S = 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{2\pi B}{\lambda} \sin \beta \right)^2 (\delta\varphi)^2, \quad (5.30)$$

где B — длина совмещенной базы, λ — длина волны, на которой производятся измерения. Формула (5.30) приводит к ограничению на точность поддержания ориентации на интервале времени, соответствующем частоте измерения прибора, на уровне:

$$|\delta\varphi| \leq 0.03''/B, \quad (5.31)$$

где B — в метрах.

5.4.2. Ошибки оптического тракта инструмента

При наведении каждого из интерферометров на звезду угол между направлением базы интерферометра и направлением на звезду определяется из картины интерференционных полос, получаемых в результате интерференции световых пучков из обоих плеч интерферометра в выходном зрачке. Интенсивность регистрируемой интерференционной картины выражается через измеряемые и определяемые параметры следующим образом:

$$I = J_0(\lambda) \left\{ 1 + V \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\ell_1 - \ell_2 + B \cos \beta) + \Theta \right] \right\}, \quad (5.32)$$

где: $J_0(\lambda)$ — интенсивность излучения в каждом плече интерферометра; λ — длина волны, $\ell_1 + B \cos \beta$ — длина хода лучей в левом плече интерферометра, ℓ_2 — то же в правом плече, B — длина базы, β — измеряемый угол направления на звезду, Θ — фазовый сдвиг, обусловленный систематическими ошибками оптического тракта и системы регистрации сигнала, V — видность интерференционных полос.

Величины ℓ_1 , ℓ_2 и B измеряются системой лазерной метрологии. В дальнейшем будем также использовать измеряемую величину разности длин плеч интерферометра, выражаемую через измеряемые длины как: $d = \ell_1 - \ell_2$. Производится определение положения интерференционной полосы на светоприемнике и, тем самым, определяется угол β между направлением базы и направлением на измеряемую звезду. Видность полос не равна единице в силу наличия искажений в оптике инструмента и неидеальности светоприемника. И величина видности полос и величина фазового сдвига Θ могут иметь зависимость от длины волны.

Оптическая система инструмента состоит из большого количества оптических элементов, каждый из которых не идеален, то есть вносит искажения и имеет не равное единице пропускание. Пропускание снижает величину светового потока, обозначим это снижение как (p). Аберрации приводят

к неравномерной освещенности выходного зрачка, что является источником систематических ошибок определения фазы интерференционных полос. В любой измерительной системе сделать световые пучки в обоих плечах интерферометра совершенно одинаковыми невозможно. Поэтому происходит снижение контраста интерференционных полос.

Обозначим интенсивность излучения в двух плечах интерферометра как J_1 и J_2 . В формуле (5.32) использована среднеарифметическая их величина. В случае неэквивалентности световых пучков в плечах, видность интерференционных полос составит:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{J_1 \cdot J_2}}{J_1 + J_2}, \quad (5.33)$$

где $I_{\max} = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 \cdot J_2}$, а $I_{\min} = J_1 + J_2 - 2\sqrt{J_1 \cdot J_2}$, то есть величину заведомо меньшую единицы, в силу того, что среднеарифметическое всегда больше среднегеометрического. Неидеальность оптики также приведет к снижению видности полос. Видность равняется единице только в случае идеальной оптики и строгой эквивалентности пучков света.

Обозначим видность интерференционных полос, даваемую оптической системой интерферометра, как (V_0). Обозначим, кроме того, систематические ошибки измерения угла между направлением на звезду и направлением базы интерферометра, обусловленные несовершенством оптики, как ($\Delta\beta_0$). Эта ошибка может иметь зависимость как от величины измеряемого угла β , так и от длины волны.

5.4.3. Ошибки регистрации сигнала

Ошибки регистрации сигнала включают в себя статистические ошибки, возникающие вследствие конечного количества зарегистрированных фотонных событий. Это чисто случайные ошибки. Темновой ток и неравномерность чувствительности приводят как к случайным, так и к систематическим ошибкам измерений. Случайная компонента приводит к снижению эффективного квантового выхода светоприемника

и снижению эффективной видности интерферометрических полос, будем характеризовать ее величиной K_R . Величина K_R , зависящая от яркости исследуемой звезды и длины волны, является величиной, характеризующей конкретный образец используемого светоприемника. Систематическая компонента может быть частично учтена с помощью внутренних калибровок. Обозначим неучтенную часть как $\Delta\psi_R$. Данная систематическая ошибка не зависит от величины измеряемого угла, зависимость от длины волны возможна. Что касается случайной статистической компоненты ошибок светоприемника, то она определяется как:

$$\delta\beta_R = \frac{\lambda \operatorname{cosec} \beta}{4B\sqrt{NV}}. \quad (5.34)$$

где N — число зарегистрированных фотонных событий. Случайная ошибка определения длины дуги будет соответственно:

$$(\delta\psi_R)^2 = \frac{\lambda^2 \operatorname{cosec}^2 \beta_1}{16B^2 N_1 V_1} + \frac{\lambda^2 \operatorname{cosec}^2 \beta_2}{16B^2 N_2 V_2}. \quad (5.35)$$

где индексы соответствуют измерениям первой и второй звезды.

Число зарегистрированных фотонных событий (используемое в формулах (5.34) и (5.35)) составит:

$$N \approx \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \Delta\lambda \cdot Q \cdot p \cdot \Delta t \cdot 10^7 - 0.4^m. \quad (5.36)$$

В формуле (5.36) введены следующие обозначения: D — диаметр входной апертуры каждого из 4 телескопов интерферометра в метрах, $\Delta\lambda$ — полоса длин волн в ангстремах, Q — квантовая эффективность светоприемника (с учетом ее эквивалентного снижения вследствие шумов светоприемника), p — пропускание оптической системы, Δt — длительность измерения, m — звездная величина объекта. Формула (5.36) написана для видимого диапазона длин волн.

5.4.4. Ошибки метрологии инструмента

Измеряемые каждым интерферометром углы β_1 и β_2 связаны с измерениями линейных величин разности оптического хода в плечах каждого интерферометра (d_1 и d_2) и длин баз (B_1 и B_2) следующим соотношением: $\cos \beta_i = d_i/B_i$ ($i = 1, 2$ — номера интерферометров; каждый интерферометр смотрит на «свою» звезду). В инструменте ОЗИРИС измеряется длина «общей» базы B . Все измеряемые метрологической системой длины отягощены случайными и систематическими ошибками. Обозначим систематические составляющие как $\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta B_1, \Delta B_2$, а случайные составляющие, как $\delta d_1, \delta d_2, \delta B$. Наличие систематических составляющих обусловлено использованием относительной метрологии, несовпадением входных точек каждого интерферометра и измеряемой базы, а также неодинаковостью оптического хода измерительного и метрологического каналов. Систематическая составляющая запишется в следующем виде:

$$\Delta\psi_M = \frac{-\frac{\Delta d_1}{\sin \beta_1} + \frac{\Delta d_2}{\sin \beta_2} + \Delta B_1 \operatorname{ctg} \beta_1 - \Delta B_2 \operatorname{ctg} \beta_2}{B}. \quad (5.37)$$

В рамках модели систематических ошибок они могут быть учтены с помощью калибровочных измерений. Случайные ошибки, обусловленные метрологической системой, запишутся в виде:

$$(\delta\psi_M)^2 = \frac{\frac{(\delta d_1)^2}{\sin^2 \beta_1} + \frac{(\delta d_2)^2}{\sin^2 \beta_2} + (\delta B)^2(\operatorname{ctg}^2 \beta_1 + \operatorname{ctg}^2 \beta_2)}{B^2}. \quad (5.38)$$

5.4.5. Определение нуль-пунктов метрологической системы

Необходимость определения нуль-пунктов метрологической системы, обеспечивающей линейные измерения в приборе (длина базы и разность оптического хода в каждом ин-

терферометре), вызвана систематической погрешностью установки вершин отражателей лазерных пучков, материализующих входные точки инструмента. Данная систематическая ошибка входит в измерение каждого угла звезда–база и каждой измеренной дуги между звездами. Обозначим измеряемые метрологической системой инструмента разности длин ходов лучей в первом и втором интерферометрах через Δl_1 и Δl_2 соответственно, а систематические поправки к ним через δl_1 и δl_2 . Аналогичная систематическая поправка к измеряемой длине базы B обозначена нами через δB .

При наблюдениях первый интерферометр направлен на звезду S_1 , а второй интерферометр – на звезду S_2 . Косинусы углов между соответствующими направлениями на звезды и базой выражаются с учетом систематических ошибок следующими формулами:

$$\begin{aligned}\cos \beta_1 &= (\Delta l_1 + \delta l_1)/(B + \delta B), \\ \cos \beta_2 &= (\Delta l_2 + \delta l_2)/(B + \delta B).\end{aligned}\tag{5.39}$$

Введем обозначение для «невозмущенных» (без систематической ошибки) измерений соответствующих углов $\tilde{\beta}_1$ и $\tilde{\beta}_2$ так что $\cos \tilde{\beta}_1 = \Delta l_1/B$, $\cos \tilde{\beta}_2 = \Delta l_2/B$. Теперь, исходя из соотношения для длины измеряемой дуги между звездами $\psi = \beta_1 - \beta_2$ и $\tilde{\psi} = \tilde{\beta}_1 - \tilde{\beta}_2$, получаем, ограничиваясь первым порядком малости искомых величин δl_1 , δl_2 и δB :

$$\cos \psi = \cos \tilde{\psi} + \frac{\delta l_1 \cdot \sin \tilde{\psi}}{B \cdot \sin \beta_1} - \frac{\delta l_2 \cdot \sin \tilde{\psi}}{B \cdot \sin \beta_2} + \frac{\delta B \cdot \sin^2 \tilde{\psi}}{B \sin \beta_1 \sin \beta_2}.\tag{5.40}$$

Формула (5.40) описывает ситуацию после единичного измерения направлений на звезды S_1 и S_2 с помощью двух интерферометров с совпадающими базами, причем первый интерферометр направлен на звезду S_1 , а второй интерферометр на звезду S_2 . В выражении (5.40) неизвестными величинами, подлежащими определению из наблюдений, являются следующие: $\tilde{\psi}$, δl_1 , δl_2 и δB . Для их определения необходимо иметь

четыре измерения одной пары звезд. В проекте ОЗИРИС углы β_1 и β_2 могут принадлежать интервалам:

$$\begin{aligned}\beta_1 &\in [135^\circ \pm 7.5^\circ] \vee [315^\circ \pm 7.5^\circ], \\ \beta_2 &\in [45^\circ \pm 7.5^\circ] \vee [225^\circ \pm 7.5^\circ].\end{aligned}\tag{5.41}$$

При этих значениях вариаций измеряемых углов определитель системы из четырех уравнений (5.40) с четырьмя неизвестными не равен нулю. Это позволяет осуществлять калибровочные измерения для определения нуль-пунктов метрологической системы несколько раз в сутки, используя звезды из входного каталога.

5.4.6. Влияние инструментальных ошибок на измерения

Рассмотрены основные случайные и систематические ошибки, влияющие на измерение длины дуги между звездами. В результате видность интерференционных полос составит:

$$V = V_0 \cdot K_R \cdot K_S.\tag{5.42}$$

Для оценки общих ошибок измерения длины дуги будем считать все рассмотренные источники ошибок независимыми. Тогда общую ошибку измерения длины дуги можно считать распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием, равным сумме рассмотренных систематических ошибок, и квадратом дисперсии, равным сумме квадратов дисперсий рассмотренных случайных ошибок. При этом случайная компонента ошибки определения длины дуги составит:

$$(\delta\psi)^2 = (\delta\psi_M)^2 + (\delta\psi_R)^2 + (\delta\psi_S)^2 + (\delta\psi_N)^2.\tag{5.43}$$

Здесь первое слагаемое определяется в соответствии с формулой (5.38), второе — в соответствии с формулой (5.35), третье слагаемое является той частью случайной компоненты, которая обусловлена ошибками наведения, а заключительное слагаемое есть случайная компонента, обусловленная ошибками навигационного обеспечения.

Систематическая компонента ошибки определения длины составит:

$$\Delta\psi = \Delta\psi_M + \Delta\psi_R + \Delta\psi_S + \Delta\psi_N + \Delta\beta_{01} - \Delta\beta_{02}, \quad (5.44)$$

где первые четыре слагаемых имеют ту же природу, что и случайные компоненты с теми же индексами, а последние два члена обусловлены несовершенством оптики обоих плеч интерферометра.

Систематическая ошибка содержит члены, прямо входящие в итоговую ошибку, и члены, содержащие сомножителями функции измеряемых углов. Часть членов зависит от яркости измеряемых звезд. Систематическая ошибка не постоянна во времени, а имеет широкий спектр частот. Постоянная и долгопериодическая составляющие систематической ошибки могут быть определены с помощью калибровок инструмента, естественно с некоторой точностью, обозначим ее как $\Delta_1\psi$. Высокочастотная составляющая систематической ошибки, обозначим ее как $\Delta_2\psi$, при этом так же сохранится. Для окончательной оценки точности измеряемой дуги с учетом случайных и систематических ошибок получим следующее выражение:

$$\sigma_\psi^2 = (\delta\psi_M)^2 + (\delta\psi_R)^2 + (\delta\psi_S)^2 + (\delta\psi_N)^2 + (\Delta_1\psi)^2 + (\Delta_2\psi)^2. \quad (5.45)$$

В рамках проведенного рассмотрения сделаем оценки величины ошибок измерения длины дуги между звездами с помощью интерферометра–дугомера ОЗИРИС. Предположим, что величина неучтенной систематической ошибки равна величине случайной ошибки. Величина видности интерферометрических полос определяется точностью поддержания ориентации, осуществляемой с использованием более яркой из наблюдаемых звезд пары, яркость которой положим, для определенности, 5^m . Точность измерения длины базы и обоих плеч в каждом из интерферометров с помощью метрологической системы составляет 20 пм. Рассчитанная при этих услови-

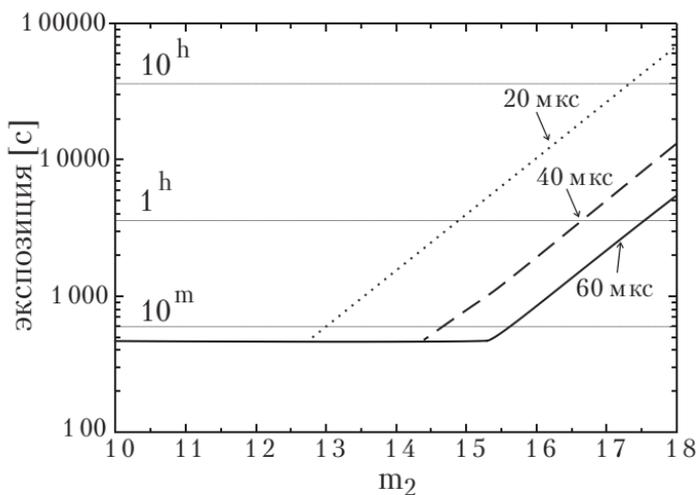


Рис. 5.12. Точность измерения длины дуги между звездами.

яч точность измерения длины дуги в зависимости от яркости второй звезды (m_2), при различных временах накопления (exposure, в секундах) и длине дуги в 30° , представлена на рисунке 5.12.

На рисунке 5.13 приведена зависимость точности измерения длины дуги от длины дуги. Для расчета использовано время накопления 10 минут, $m_1 = 5^m$, $m_2 = 10^m$.

Рассмотрение основных ошибок — случайных и систематических — которые влияют на точность измерения длины дуги между звездами с помощью инструмента ОЗИРИС, показало: общая ошибка измерения длины дуги есть величина, распределенная по нормальному закону с математическим ожиданием, равным сумме рассмотренных систематических ошибок, и квадратом дисперсии, равным сумме квадратов дисперсий рассмотренных случайных ошибок. Случайная компонента ошибки определения длины дуги определена формулой (5.43), а систематическая компонента — формулой (5.44).

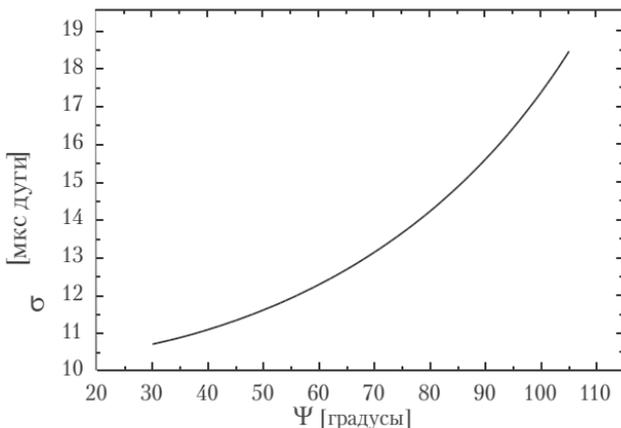


Рис. 5.13. Точность измерения длины дуги между звездами в зависимости от длины дуги (об остальных параметрах рассказано в тексте).

Результаты расчетов по этим формулам, приведенные на рисунках 5.12 и 5.13, показывают, что заявленная точность измерения длины дуги между двумя звездами с помощью дугомера-интерферометра ОЗИРИС порядка 20 мкс может быть достигнута для звезд вплоть до 18 звездной величины.

5.5. Выводы

Двумя основными задачами настоящей главы были отбор объектов во входной каталог и анализ алгоритмов астрометрической редукции наблюдений космического оптического интерферометра. Две этих задачи взаимосвязаны и ориентированы на достижение максимальной возможной точности результирующих координатных определений. Окончательный вывод относительно входного каталога дугомера-интерферометра ОЗИРИС может быть сделан только после детального моделирования всего цикла наблюдений с учетом конкретных инженерных решений, т.е. на стадии опытно-конструкторских работ. Однако, основные параметры входного каталога на стадии предварительного исследования оцениваются достаточно точно:

- объекты, задающие инструментальную систему координат, должны составлять не менее половины входного каталога и должны быть достаточно яркими одиночными звездами постоянного блеска с простой кинематикой, задающими систему отсчета, максимально (в рамках возможностей) совпадающую с системами других астрометрических экспериментов (т.е. в опорной Сетке должны присутствовать звезды-гиганты класса К из программы интерферометра SIM и нормальные звезды, отобранные из выходного каталога Гиппаркос);
- объекты, позволяющие абсолютизировать координатные определения ОЗИРИСа, могут составлять до 20 % входного каталога, и должны занимать около половины времени наблюдений, что связано с их слабым блеском и фотометрической переменностью (квазары ICRF и лачертиды);
- звезды, позволяющие уточнить масштабы Вселенной и составляющие до трети входного каталога, должны отбираться из разных классов переменных звезд, для того чтобы обеспечить гарантированную точность инструментальных измерений и надежность определения расстояний в случае изменения в будущем физических моделей разных классов объектов.

Рассмотренное в рамках модели независимых ошибок влияние различных инструментальных ошибок и ошибок редукации позволяет априори оценить точность измерений интерферометра в зависимости от различных параметров прибора и наблюдаемых объектов.

Инструментальные ошибки, т.е. ошибки наведения, ошибки слежения, несовпадение измерительных баз, ошибки метрологической системы, ошибки регистрации и абберрации оптического тракта инструмента, включают в себя как случайные, так и систематические составляющие. Низкочастотная часть систематических ошибок может быть устранена калиб-

ровками (в т. ч. и внутренними тестами инструмента). Ошибки редукции состоят из ошибок навигационного обеспечения (случайных и систематических), искривления световых лучей в неоднородном гравитационном поле Солнечной системы и неучтенной двойственности измеряемых объектов.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ НАБЛЮДЕНИЙ

6.1. Составление расписания наблюдений КА ОЗИРИС

На завершающем этапе подготовки проекта к реализации составление расписания наблюдений является сложной и ответственной задачей. Современный подход к эксперименту требует максимально возможной его оптимизации, так как стоимость эксперимента высокая, а временные, энергетические, и информационные ресурсы ограничены. Существует много исследований в области оптимизации эксперимента, выработаны основные принципы и математический аппарат. Методы линейного и нелинейного программирования позволяют найти оптимальный план эксперимента, если условия эксперимента и критерии оценки результата точно определены. В сложных экспериментах, подобных миссии «Целеста», имеющих большое число параметров, даже если все они точно определены, задача становится конечной, но необъятной, подобно программе для игры в шахматы. Однако, шахматные программы существуют и успешно используются. Пошаговый подход к планированию космического эксперимента будет эффективен и позволит избежать многих затруднений. Естественным ограничением подробности планирования яв-

ляется ограниченность вычислительных ресурсов при работе в режиме реального времени, поэтому скелетный план должен быть составлен заранее, а при работе КА корректироваться по мере необходимости.

Астрометрический спутник должен обеспечить получение точных положений, собственных движений и параллаксов звезд, равномерно распределенных по всему небу. Продолжительность миссии должна составлять не менее 2,5 лет, а увеличение срока работы спутника приведет к получению дополнительной информации.

Основной трудностью при проведении миссии будет необходимость наблюдений большого числа слабых объектов. Квазары и лацертиды, на которых будет основана система инерциальных небесных координат, являются слабыми объектами — с видимой звездной величиной 15^m и слабее [19]. Уточнение шкалы межзвездных расстояний также требует измерения параллаксов самых удаленных — и, естественно, самых слабых — звезд. В то же время наблюдения слабых источников на инструменте с рабочей апертурой 20 см требует продолжительных экспозиций — до десятков минут.

Задача оптимизации всех режимов работы дугомера-интерферометра по параметру сокращения продолжительности единичного измерения является крайне важной для достижения заявленных результатов миссии.

Эта задача оптимизации рассмотрена по нескольким слабо зависящим друг от друга направлениям:

1. разработка целесообразной программы эксперимента, обеспечивающей минимальные переориентации КА в процессе наблюдений;
2. оптимизационное моделирование для предвычисления положений объектов запланированных наблюдений;
3. построение алгоритма регрессионного анализа потока наблюдательных данных для формирования команды прерывания измерений;

4. построение программы наблюдений, допускающей разделение параллаксов и собственных движений при обработке результатов измерений. Доработка входного каталога на основе кластерного подбора наблюдаемых объектов и оценка возможности наблюдений экзопланет с помощью дугомера-интерферометра.

Для лучшего использования времени работы КА для проведения собственно измерений важно стремиться к сокращению времени на проведение необходимых технологических операций со служебными системами КА и, в частности, сокращению времени на операции, связанные с переориентацией КА с одного исследуемого объекта на другой.

Обеспечение сокращения времени переориентации возможно следующими способами:

- аппаратными, т. е. повышением скорости разворотов КА вокруг центра масс и совершенствование алгоритмов работы бортовой аппаратуры, позволяющих в максимальной степени автономно и быстро решать задачу переориентации на борту (эта задача не рассматривается, так как считается, что конструкторы КА сделали всё возможное);
- специальным выбором объектов наблюдений, позволяющим минимизировать число перенаведений инструмента.

Возможно составить жесткое расписание наблюдений на всё время работы КА, но удобнее ограничиться общим планом, в который вносятся коррективы по ходу работы, в зависимости от хода предварительной обработки результатов и технического состояния аппарата.

Исходные данные для расписания:

- список объектов наблюдений (несколько тысяч источников), а именно:

- яркие звезды (опорные для ведущего плеча дугомера);
- квазары;
- звезды типа VL Ящерицы;
- цефеиды;
- звезды типа RR Лиры;
- рассеянные звездные скопления;
- шаровые звездные скопления;
- звезды типа Вольф–Райе;
- рентгеновские звезды;
- кандидаты в чёрные дыры;
- двойные звезды;
- звезды, имеющие планеты;

Для объектов указывается необходимое число наблюдений и распределение их во времени;

- ограничения по возможностям угловой ориентации КА на орбите, связанные с возможными засветками интерферометра и оптических приборов системы ориентации Солнцем, Луной, Землей. Для этого нужны точные данные об орбите КА;
- ограничения, связанные с температурным и энергетическим балансами, объемом памяти на борту и скорости передачи информации на Землю.

Основными длительными технологическими операциями, проводимыми с КА в полете, являются:

- закладка на борт полетного задания (зависит от количества исследуемых объектов между сеансами связи);
- сброс на Землю записанной в бортовую память научной и служебной информации;

- проведение траекторных измерений;
- разгрузка электромаховичных исполнительных органов, используемых для поддержания режима прецизионной угловой стабилизации во время проведения научных исследований.

Используя полученную перспективную программу наблюдений, а так же такие характеристики объектов наблюдений как:

- заданную продолжительность наблюдения;
- прогнозируемый объем получаемой информации, который позволяет оценить время, необходимое на сброс этой информации на Землю; —

можно оптимизировать расстановку сеансов связи при максимальном использовании бортовой памяти.

Программа полета КА включает в себя в основном следующую информацию:

- интервалы времени проведения сеансов связи с КА;
- программу наблюдений между сеансами связи (координаты объектов, время наблюдения, прогнозируемый объем информации, режимы работы бортовых систем);
- параметры орбиты;
- углы связи «Земля–КА»;
- значения углов, входящих в перечень ограничений (оптических средств КА относительно Солнца, Земли и Луны, интерферометра относительно Солнца, Земли, Луны и т. д.).

Разработка целесообразной программы научного эксперимента, проводимая на стадии перспективного планирования

программы полета КА, позволяет на интервале 2–3 месяца оптимизировать последовательность исследования научных объектов с целью минимизации суммарного угла переориентации КА в тех пределах, в которых это допускается оптимизацией программы наблюдений по критерию эффективности выполнения научной программы эксперимента.

Проводимая на стадии перспективного планирования минимизация времени переориентаций и других технологических операций, проводимых с КА, позволяют увеличить время научных наблюдений и сберечь ресурс бортовых систем.

Главным ресурсом космического эксперимента, с точки зрения эффективности научных исследований, является общее время наблюдений. От этого ресурса зависит как точность, которая может быть достигнута, так и количество объектов, включаемых в программу наблюдений.

Оптимизации подлежат:

- выбор из списка предложенных для наблюдений только таких объектов, которые позволили бы определить искомые параметры той или иной модели с максимальной точностью;
- составление программы наблюдений таким образом, чтобы затраты времени, не связанные непосредственно с наблюдениями, были минимальными;
- проведение наблюдений таким образом, чтобы все искомые параметры могли быть найдены из минимального комплекта наблюдений.

6.1.1. Приоритеты в проведении наблюдений различных классов объектов

Большинству исследователей свойственно считать самым важным то направление, которым они занимаются. При ограниченном ресурсе числа наблюдений сложно расставить приоритеты, удовлетворяющие всех. Математически проблема хорошо разработана, она называется «задачей о распределении ресурсов» и решается методами линейного программирования. Для каждого возможного наблюдения должна быть определена цена результата и сумма затрат. Алгоритм найдёт

список наблюдений, для которого общая цена результата при допустимой сумме затрат будет максимальной. Однако, определение цены результата по необходимости будет волевым, как решит руководитель или спонсоры проекта. Невозможно, например, объективно оценить, что ценнее — определить параллаксы 5 звезд типа RR Лиры или 12 голубых сверхгигантов. А может лучше определить параллаксы только двух красных сверхгигантов, но с вдвое большей точностью.

Очевидно, тип орбиты космического аппарата существенным образом влияет на программу наблюдений. Низкая околоземная орбита налагает значительно больше ограничений на выбор последовательности просмотра объектов, чем, например, геостационарная орбита. Ниже рассмотрены оба варианта орбиты (геостационарная и околоземная) с точки зрения оптимизации последовательности измерений запланированных объектов.

Общая схема наблюдений предполагает разделение наблюдаемых объектов на два типа: объекты опорной Сетки и определяемые объекты. Под объектами Сетки понимаются объекты, которые должны наблюдаться в «ведущем» канале космического интерферометра. Эти объекты не обязательно рассматривать как реализацию фундаментальной системы небесных координат, поскольку Сетка должна обеспечить только выполнение космического эксперимента.

Наиболее трудно выполнимым условием оптимизации программы наблюдений является получение объема измерений, достаточного для вычисления всех искомым параметров до завершения эксперимента. Точность такого промежуточного результата будет ниже, чем точность на основе полного комплекта наблюдений.

Следует напомнить, что конструкция КА не позволяет наблюдать звезды в половине небесной сферы, в центре которой находится Солнце. Эта недоступная полусфера перемещается вместе с Землей, так что каждый объект половину года доступен для наблюдений, а другую половину — нет. Для определения параллакса любого объекта нельзя получить измере-

ния на половине эллипса параллактического смещения. Если бы правило наблюдать объекты, угловое расстояние которых от Солнца больше 90° , соблюдалось строго, объекты вблизи полюсов эклиптики вообще были бы недоступны и их следовало бы полностью исключить из программы наблюдений. Конструкторы КА предусмотрели эту проблему и предельный угол между Солнцем и телескопами в рабочем режиме может быть на несколько градусов меньше 90° . Только практическая работа покажет, насколько понизится качество измерений при таких углах за счёт боковой засветки и нагрева Солнцем.

Для расчёта продолжительности серии наблюдений необходимо задать вид орбиты космического аппарата и ограничения, связанные с близостью направлений на наблюдаемые объекты к Солнцу, Земле и Луне.

Была проведена грубая оценка времени, необходимого для проведения 40 измерений каждого объекта списка. Порядок наблюдений определялся следующим алгоритмом.

Для простоты предполагалась кеплеровская орбита КА с большой полуосью 30000 км и эксцентриситетом 0.5. Угловое расстояние объекта от Солнца больше 60° , от края лимба Земли 30° , от центра Луны 15° .

Начинаем с наведения аппарата на самую яркую звезду из программы. Произвольно подбираем к ней пару, образующую угол, отвечающий допуску на полосу, доступную прибору. Измеряем образовавшийся угол. Отмечаем, что звезда «№2» зарегистрирована 1 раз.

Для выбора следующего объекта находим звезду из списка, угловое расстояние которой от только что измеренной минимально, поворачиваем измерительное плечо прибора, оставляя ведущее на первой звезде, измеряем второй угол и снова отмечаем, что звезда «№3» зарегистрирована 1 раз.

Если звезда «№3» слабее принятого порога блеска (в нашем случае 8.0^m), то ищем следующую, ближайшую к ней (но не звезду «№2»). Если звезда яркая, меняем назначение плеч прибора, гидируя аппарат по звезде «№3», и ищем объ-

ект, ближайший к звезде «№1». Продолжая такую стратегию, мы получим цепочку наблюдений. Для того чтобы в цепочку вошли все звезды, надо соблюдать несколько правил.

Из звезд-кандидатов выбираем ту, число наблюдений которой меньше других. Можно вообще не рассматривать звезды, которые наблюдались 1 раз, если есть хотя бы одна, не наблюдавшаяся ни разу. При не слишком широкой полосе допуска, алгоритм может быстро завести в тупик: есть звезды, которые надо наблюдать, но ни одна из них не попадает в полосу, заданную той звездой, которая является гидирующей. Поэтому, как принято в задачах оптимизации с ограничениями, назначаем штрафную функцию для параметра, по которому ведётся поиск нового кандидата (углового расстояния от текущей звезды). Рассмотрим несколько вариантов.

Малый штраф — $20^\circ \cdot (N_z - N_k)$, где N_k — номер круга, а N_z — число уже выполненных наблюдений кандидата. Под номером круга понимается наименьшее число уже выполненных наблюдений звезд списка. Пока есть хоть одна звезда, не наблюдавшаяся ни разу, номер круга равен нулю. Когда последняя звезда зарегистрирована первый раз, считаем, что круг 0 завершен и начинается круг 1.

Для коэффициента малого штрафа пробовались и другие коэффициенты: 30, 50, и 60° .

Большой штраф — $200^\circ \cdot (N_z - N_k)$ (можно взять любое число больше 180°). Штраф прибавляется к угловому расстоянию. Это расстояние не может быть больше 180° , поэтому в нулевом круге уже наблюдавшаяся звезда может быть выбрана, если в полосе нет ни одной звезды, для которой $N_z = 0$, затем следующая, пока не встретится яркая, и гидирующее плечо поменяется, и мы будем снова искать звезду с $N_z = 0$, но уже в другом поясе. При малом штрафе, звезда с $N_z = 1$ всё-таки будет выбрана, если ближайший кандидат с $N_z = 0$ находится на расстоянии больше 20° плюс расстояние до звезды с $N_z = 1$. Такое правило позволяет экономить время на вращение КА, несколько теряя в равномерности во времени наблюдений одной и той же звезды.

Модельные расчёты показали, что при рабочей полосе КА 30° и малом штрафе 60° примерно половина звезд списка входит в расписание 39 раз, когда алгоритм заходит в тупик и не может найти очередной звезды. На практике этим недостатком можно пренебречь или составить дополнение к расписанию по другому алгоритму для выполнения оставшихся наблюдений.

Оценка времени на выполнение всей миссии выполнялась так. Принято, что КА поворачивается с постоянной скоростью 1° в минуту, а время наблюдений звезды восьмой величины составляет 20 мсек. Звезды более слабые требуют для своей регистрации больше времени по экспоненциальному закону. Мы не располагали данными о дополнительных расходах времени на переключение и переход аппаратуры в рабочий режим и пока не рассматривали роль помех в работе прибора со стороны ярких небесных объектов. При таких допущениях основной расход времени составляют затраты на вращение аппарата, а доля самих наблюдений не больше 2 процентов. При полосе 20° и малом штрафе на всю миссию нужно 446 суток и остаётся выполнить ещё около 11000 наблюдений, для нескольких звезд даже 3 раза, при большом штрафе соответственно 615 суток и 9000 наблюдений.

Для оценки равномерности наблюдений каждой звезды вычислялись: интервал между первым и последним наблюдением dT и максимальный интервал между последовательными наблюдениями dt . Результаты моделирования приведены в табл. 6.1, время выражено в сутках. Таким образом, наблюдения всех звезд оказываются распределены во времени достаточно равномерно и широко, что позволит хорошо исследовать проблему их собственных движений.

6.1.2. Наблюдения с околоземной орбиты

Наблюдения с околоземной орбиты накладывают ряд ограничений на выбор опорных звезд. Орбита должна быть «солнечно-синхронной», т. е. её плоскость должна оставаться приблизительно перпендикулярной к направлению на Солнце.

Таблица 6.1. Полное время наблюдений при различных начальных параметрах.

	Время миссии	min dT	max dT	min dt	max dt
Полоса 20°					
Малый штраф	446	408	445	16	41
Большой штраф	615	576	615	21	41
Полоса 30°					
Малый штраф	437	406	437	16	36
Большой штраф	539	504	538	18	34

Один из измерительных каналов КА должен быть направлен приблизительно в противосолнечную точку, а второй — приблизительно вдоль радиуса Земли. Таким образом, опорные звезды выбираются вблизи пояса эклиптики. На такой орбите построить программу наблюдений, позволяющую пронаблюдать все определяемые звезды вполне возможно. За сутки КА выполняет несколько оборотов вокруг Земли, регистрируя объекты в полосе $20\text{--}30^\circ$, перпендикулярной плоскости эклиптики, причём угол между направлениями на Землю и на определяемый объект всегда не меньше 150° . По мере движения по орбите Земли, рабочая полоса будет поворачиваться и за год все объекты будут включены в программу наблюдений. Достоинством такого расписания является редкое изменение ведущей звезды и небольшой поворот ведущего плеча при переходе на следующую. Из недостатков можно отметить, что угол между Солнцем и определяемой (обычно более слабой) звездой близок к 90° , что даёт лишние засветку и нагрев; что моменты наблюдений каждого объекта собраны в две группы длительностью не больше 30–40 дней, разделённые полугодовым промежутком, что затрудняет отделение собственных движений от параллаксов. Существенной проблемой может быть и то, что из-за быстрого движения спутника вокруг Земли нельзя накапливать сигнал от слабого объекта дольше нескольких минут.

Приоритетом при выборе программных объектов для измерений являются опорные звезды и опорные квазары системы ICRS. Поскольку до сих пор не существует никакого опыта проведения астрометрических измерений с микросекундной точностью, до начала миссии «Целеста» невозможно предусмотреть реальный характер изменений видимых положений ни опорных звезд, ни оптических квазаров. Только сами измерения в космосе могут показать, каким должно быть число измерений этих двух классов светил, чтобы можно было обеспечить экстраполяцию их положений на любой момент времени с микросекундной угловой точностью. Априорно предполагается, что в среднем опорные звезды должны измеряться по одному-два раза в неделю (из числа расположенных вне зон запрета); начальное число кандидатов в опорные звезды превышает в 8 раз минимально необходимое, что позволит в процессе обработки результатов измерений исключить часть из них по признаку «сложности» видимого движения. То же самое относится и к квазарам, поскольку до сих пор нет уверенности в том, что в оптическом диапазоне радиоквазары ведут себя как точечные неподвижные объекты. Вместе с тем, разработанная программа обработки текущего потока измерений позволяет построить модель движения источника любой сложности, что гарантирует ее результативность даже при проявлении неожиданных свойств источников; просто их исследование приведет к необходимости дополнительных измерений дуг с этими объектами, вследствие чего им и приписан наивысший приоритет.

Измерение дуг между яркими источниками требует очень коротких времен, за которые мыслимые девиации не вызовут команд на прерывание измерений даже на перигейных участках орбиты. Поэтому первым приоритетом на проведение измерений на рабочих участках орбиты будет наблюдение слабых объектов из основного списка Входного каталога. По мере роста ограничений на проведение измерений со стороны систем ориентации КА и метрологического обеспечения, планирование предусматривает переход к более ярким объектам.

Для сокращения числа перенаведений инструмента предусмотрено группирование программных объектов в тесные группы, каждая из которых содержит в себе хотя бы одну опорную звезду. Благодаря такому планированию время наведения дугомера-интерферометра на объекты сокращается.

Точное наведение визирных линий дугомера-интерферометра на каждый из объектов осуществляется непосредственно системами наведения отдельных телескопов, то есть практически без изменения (или при минимальных изменениях) ориентации КА при наблюдении объектов в пределах группы.

Проведение измерений предусматривает накопление текущего сигнала вплоть до выдачи команды на окончание измерений. Однако, до проведения реальных измерений на реальном приборе трудно предположить, каким будет время единичной экспозиции, поэтому детальное планирование программы наблюдений на каждом витке должно быть основано на анализе потока измерений предыдущего витка с учетом деградации светоприемника и оптических элементов интерферометра и текущего уровня шума (включая предвычисляемый уровень шумов от засветки посторонними источниками).

Прерывание измерений до выдачи сигнала об их окончании является либо командой на восстановление точной ориентации дугомера-интерферометра и снижение скорости остаточного вращения прибора в случае ее превышения над допустимым уровнем, либо командой на ожидание стабилизации метрологических параметров в случае их недопустимо быстрого изменения вследствие тепловых или механических воздействий на прибор. После восстановления ориентации дугомера и снижения скоростей девиаций ниже допустимой величины наблюдения могут быть продолжены.

Особенностью дугомера-интерферометра ОЗИРИС является то, что прерывание измерений не приводит к потере информации, полученной до прерывания. Причина этого заключается в том, что картина интерференции от слабого источника строится по массиву накопленных координат фотонных событий, каждая из которых путем учета полученного по метро-

логическим измерениям мгновенного состояния дугомера превышает фиксированный для этого наблюдения набор определяющих его параметров. Отсюда вытекает не только возможность измерения с максимальной точностью координат самых слабых объектов, но и возможность накопления сигнала от них на разных витках орбиты инструмента в оптимальные для наблюдений отрезки времени.

Режим прерывания измерений может быть использован при планировании наблюдений несколькими путями:

- включением в программу наблюдений на следующем витке тех объектов, измерения которых были прерваны по командам ограничений;
- принудительным прерыванием измерений, меняющих расписание запланированных измерений, или при необходимости проведения срочных незапланированных измерений;
- планированием прерывания измерений при наблюдении очень слабых источников в условиях меняющихся ограничений (в том числе и для проведения измерений более высокого приоритета).

В режиме прерывания измерений можно ожидать увеличение ресурса измерений КА ОЗИРИС за счет более полного использования наблюдательного времени на рабочих участках орбиты астрометрического спутника.

Высокая точность планируемых измерений приводит к неизбежному отказу от традиционных представлений реализации инерциальной системы небесных координат как каталога звездных положений с фиксированными значениями координат на определенную эпоху и параметров собственного движения звезд. Совершенно очевидно, что при годичном движении яркой звезды порядка долей секунды в год ее координаты будут изменяться ежечасно на величину, сопоставимую с точностью проводимых измерений. Иными словами,

при измерениях небесных координат с микросекундной точностью пропадает смысл астрометрического понятия каталога звездных положений и его эпохи.

Результаты астрометрической миссии «Целеста» будут представлять список положений опорных звезд в системе внегалактических источников (квazarов) и моментов времени, когда измерения этих положений были сделаны. В этом случае при проведении координатных измерений относительно опорных звезд можно будет путем прямой интерполяции рядов положений опорных звезд получить их мгновенное положение в системе ICRS в момент таких измерений и редуцировать сами измерения к системе ICRS без потери точности наблюдений.

Координаты объектов Входящего Каталога, полученные в процессе выполнения миссии, также будут представлены в виде рядов измерений их положений в системе ICRS, что позволит при последующей обработке решить все запланированные астрометрические задачи, — получение прямых параллаксов, исследование динамических свойств Галактики, обнаружение планетных систем у звезд и т. д.

Система инерциальных координат должна быть реализована на очень небольшом числе опорных звезд с тем, чтобы можно было на их основе измерить координаты любого астрономического объекта в поле зрения любого телескопа. Принцип измерений дуг с интерферометром позволяет ограничиться несколькими десятками опорных звезд, а принцип интерферометрии на зрачке позволяет обеспечить равноточные измерения любых светил независимо от их яркости и уравнения цвета.

Сетка представляет собой, помимо ярких опорных звезд, совокупность немного более тысячи объектов, с близкими спектральными классами и звездными величинами в пределах от $3,5^m$ до 18^m . Можно ожидать, что первое требование к опорной системе, — точность, — будет обеспечено применяемым методом наблюдений (космическим интерферометром), однородность и стабильность точности — высокой точностью

определения параллаксов и собственных движений. Последнее требование, — доступность, — не может быть удовлетворено в рамках одного проекта с использованием космического интерферометра. Таким образом, создание доступной опорной системы возлагается на другие космические эксперименты, а именно, на применение совместно с астрономическими узкопольными телескопами интерферометрических методов их наведения.

С другой стороны, Сетка, в совокупности с внегалактическими радиоисточниками, обеспечивает рабочую инерциальную систему координат для решения задач, поставленных в рамках данного конкретного астрометрического эксперимента. Объекты Сетки позволят установить соответствие между системой координат данного эксперимента и системами координат других астрометрических космических экспериментов.

6.2. Построение алгоритма регрессионного анализа потока наблюдательных данных для формирования команды прерывания измерений

При проектируемых высокоточных измерениях длин в космическом астрометрическом интерферометре ОЗИРИС особую важность приобретает используемый математический аппарат обработки данных и сопутствующее программно-компьютерное обеспечение. Исходный поток наблюдательных данных в проекте ОЗИРИС будет состоять из координат фотонных событий в поле интерференции. Как измерения координат событий на двумерной поверхности светоприемника, наблюдательные данные по характеру и по проблемам обеспечения точности очень близки к фотографической астрометрии, что позволяет при теоретическом рассмотрении проблемы обращаться к ее опыту. Поскольку основные результаты (координаты объектов, длины дуг) будут получаться путем многократных измерений, их предварительной обработки и редукиций до достижения требуемой точности, то основными

математико-статистическими задачами будут задачи метода наименьших квадратов (МНК). Решение последних позволяет получать МНК-оценки различных параметров постулируемых моделей обработки данных.

Традиционная методология решения астрономических и геодезических задач оценивания характеризуется двумя моментами:

- 1) структура модели принимается жестко заданной;
- 2) оценивание параметров модели выполняется МНК.

С точки зрения современной прикладной статистики, используемая в астрономии и геодезии методология обработки данных не в полной мере соответствует наблюдательному материалу, приводя при реализации к моделям, оценки параметров которых не удовлетворяют требованиям состоятельности, несмещенности, эффективности. Тем более важно использовать современный математический аппарат для достижения планируемой точности астрометрических измерений в КЭ ОЗИРИС, при которой заранее нельзя даже постулировать полноту принятой модели обработки данных измерений.

В предлагаемом системном подходе регрессионного моделирования (РМ) [15] методы оценивания и поиска оптимальных структур могут меняться для обеспечения требуемых свойств оценок в соответствии со свойствами выборки данных.

Применение адаптивного регрессионного моделирования, базирующегося на широком использовании автоматизированной системы и специального программного обеспечения, позволяет устранить ограничения стандартной методологии.

6.2.1. Математическая модель обработки данных, предназначенная для прогноза

Под математической моделью обработки данных понимается четко определенная модель наблюдаемого (измеряемого) явления (объекта, процесса), сформулированная в математических терминах. Например, связь тангенциальных и изме-

ренных координат звезды на фотоприемнике можно описать моделью вида

$$M\mathbf{Y} = \eta(\mathbf{X}, \beta), \quad (6.1)$$

где \mathbf{Y} — зависимая переменная (одна из тангенциальных координат); $\mathbf{X} = (x_0, x_1, \dots, x_{p-1})$ — матрица независимых переменных (измеренных координат, их произведений или других комбинаций), которые могут изменяться в некоторой области пространства R^p ; $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1})^T$ — вектор неизвестных параметров (постоянных поля приемника), определяемых по результатам экспериментов; M — оператор математического ожидания.

По назначению модели классифицируются по типам:

- прогностические, предназначенные для целей прогноза описываемой характеристики;
- описательные (параметрические), оцениваемые параметры которых являются конечной целью обработки данных;
- описательно-прогностические модели двойного назначения.

На настоящий момент представляется, что одной из наиболее востребованных задач МНК в проектируемом космическом эксперименте является задача разработки моделей прогноза. В частности, модели, позволяющей вычислять (после оценивания параметров в ее правой части) конечные тангенциальные или сферические координаты наблюдаемых объектов в зависимости от длин измеренных дуг между объектами через координаты интерференционных полос в системе прибора и ряда факторов, порождающих систематические эффекты.

При достаточно общей постановке прогностическая (редукционная) модель может быть записана в виде, линейном относительно оцениваемых параметров β ,

$$\xi = \beta_0 + \sum_{i_1} \dots \sum_{i_k} \beta_{i_1 \dots i_k} X_1^{i_1} X_2^{i_2} X_3^{i_3} \dots X_k^{i_k} + \varepsilon, \quad (6.2)$$

где ξ — одна из тангенциальных координат; x_1, x_2 — измеренные координаты в системе прибора; x_3, \dots, x_k — различные эффекты, измеренные для эталонных (опорных) объектов. В правой части (6.2) записывается алгебраический полином от первой до p -ой степени по измеряемым — независимым в идеальном случае — переменным x_1, x_2, \dots, x_k . После оценивания параметров β с помощью МНК формула (6.2) может быть использована для перевода измеренных искомым параметров в тангенциальные и далее в сферические координаты.

Анализ стандартной методики, используемой в астрометрии для параметрической идентификации модели (6.2), показал, что для существенного повышения точности представления необходимо разрешение ряда проблем, возникающих при применении МНК [18].

С позиций математической статистики и теории восстановления функции, стандартная методология может быть подвергнута критике, как методология, не способствующая получению всей возможной статистической информации о модели и ее членах и не предусматривающая получения адекватных структур и параметров по результатам проверки используемых гипотез. Ниже эти утверждения детализируются.

1. Выбор мер точности для оценки качества модели, ее пригодности для целей прогноза ограничен. Из существующего в математической статистике набора внутренних мер используется только одна мера — остаточная дисперсия или ее разновидности. Используемая в ряде работ смешанная мера точности в виде ошибки прогноза предполагает соблюдение предположения об отсутствии систематической ошибки в модели, что не всегда выполняется. В то же время внешним мерам не уделяется должного внимания, способы их применения несо-

вершенны, а множество используемых подходов ограничено.

2. Редукционная модель после постулирования считается жестко заданной независимо от происхождения: получена ли она в результате проективных построений или является аппроксимирующей. В последнем случае члены модели в процессе решения не анализируются на значимость, т. е. процедура структурной идентификации не выполняется. В теоретических работах на последнее обстоятельство обращается внимание, однако дискуSSIONно, на наш взгляд, проведение структурной идентификации в ортогональном базисе, а не в исходном косоугольном: на статистическую значимость должны анализироваться члены исходной редукционной модели, а не члены искусственного ортогонального разложения Грама–Шмидта.
3. В работах по фундаментальной астрометрии не проявляется должный интерес к моделированию процесса обработки и редукции измерений, в частности, тому обстоятельству, что оценки параметров статистической модели (6.2) являются наилучшими, т. е. состоятельными, несмещенными, эффективными в классе линейных несмещенных оценок только в условиях соблюдения ряда предположений. Представляет интерес уточнить в общих чертах, какие предположения статистического подхода к решению уравнения (6.2) могут быть нарушены на практике.

О достаточности объема наблюдений. Ряд теоретических работ [18] содержит эмпирические исследования по определению зависимости между объемом выборки и стандартной ошибкой модели. Для достаточно точного решения этой проблемы необходима теоретическая проработка с использованием набора мер качества.

При организации наблюдений обеспечивается случайный отбор. Выбор конфигурации в расположении опорных звезд при определении координат одиночных объектов на фотоснимках достаточно подробно исследован А.А.Киселевым [26], есть определенные рекомендации по этому поводу у фотogramметристов. При массовых определениях для обеспечения равномерной точности по всему полю фотографии предлагается применять схемы планирования эксперимента, хотя условия активного эксперимента малоподходящи и трудны для реализуемы в астрофотографических массовых работах.

Об отсутствии грубых промахов. Обнаружив остаточное отклонение, превышающее обычную ошибку, наблюдатель объясняет его аномальностью в проведении какого-нибудь промежуточного этапа редукции или наблюдения и отклоняет это наблюдение, иногда просто отбрасывая без объяснений. Рядом авторов показано, что устойчивость оценок МНК заметно зависит от степени «засорения» выборки аномальными или близкими к ним наблюдениями.

Линейность модели по вектору β . Фактически это означает утверждение адекватности модели вида (6.2) наблюдениям. Анализируя остаточные отклонения, можно сделать не только вывод о нарушении предположения, но и получить ответ на вопрос о том, как следует изменить модель, чтобы она стала более адекватной. Такой подход позволит более обоснованно принять или отклонить редукционную модель, чем догадки и предположения исследователя. Точнее, статистические выводы о модели должны подкрепляться догадкой и интуицией экспериментатора и наоборот.

На вектор β не наложено ограничений. Обычно геометрическая модель не содержит лишних членов. При анализе чаще всего выясняется, что модель не все объясняет, т. е. содержит систематические ошибки. Одним из способов решения этой проблемы (не используемым в фотографической астрометрии) является способ введения ограничений. Например, при использовании геометрической модели можно отказаться от предположения об ортогональности системы и ввести в

модель условие ортогональности перехода, как это было сделано в [15] при трансформации селенодезических координат.

Переменные x_j являются линейно независимыми. Из всех предположений это условие наиболее серьезно учитывается в последнее время. На его нарушение в полиномиальных моделях большой размерности уже обращается внимание; иногда предлагается в практику обработки астрометрических наблюдений ввести вычислительную схему МНК, основанную на методе ортогонализации. К сожалению, такое разложение, выполненное не на стадии формирования исходной модели и играющее роль вспомогательной устойчивой вычислительной схемы, не избавляет от зависимости переменных в исходной модели. Арсенал имеющихся в вычислительной математике и математической статистике приемов достаточно обширен.

Переменные x_j определены с пренебрежимо малыми ошибками. В редуцированных моделях под X_1, X_2 понимаются измеренные координаты x, y , а далее, возможно, и их функции (x^2, xy, y^2, x^3 и т. д.). Случай учета ошибок измеренных координат для жестко фиксированной модели в координатной задаче впервые рассмотрен в работе [53] на основе схемы конфлюэнтного анализа (см. [1]). Такой подход применим в методе перекрывающихся пластинок.

Ошибки ε_i распределены по нормальному закону. Тип распределения не исследуется в фотографической астрометрии. Обычно ошибка ε_i либо предполагается нормально распределенной, либо просто утверждается, что тип распределения не оказывает влияния на оптимальные свойства оценок в классе линейных оценок МНК. К тому же объем выборки (количество опорных звезд) при обработке фотопластинки чаще всего мал, что затрудняет использование статистических критериев для проверки гипотез о типе распределения. Нормальность ошибок, в общем-то, не обязательна для линейных моделей. Однако в предположении нормальности используются различные статистические критерии, в том числе и правило «трех сигм»; кроме того, в практике моделирования все большее распространение получают нелинейные модели. Отметим

еще одну причину: оценки МНК в большой степени зависят от степени «засорения» выборки ошибочными и аномальными наблюдениями, типа их распределения.

Ошибки ε_i имеют постоянную дисперсию. Ввиду разнообразных оптических aberrаций и других причин ошибки не подчиняются этому правилу. В большинстве астрометрических работ она исследуется по всему полю фотографирования.

При двух условных уравнениях координат (по x и по y) правомочно применение МНК к каждому из уравнений в отдельности. Строго говоря, с позиций так называемого структурного МНК, нельзя обрабатывать по x и по y отдельно каждую переопределенную систему уравнений, — они должны обрабатываться совместно. В противном случае нужно доказать, что возникающие при этом ошибки будут малы. Примером метода, предусматривающего совместное использование двух условных уравнений, является метод восьми постоянных в фотографической астрометрии.

Итак, в рассматриваемой координатной задаче значительная часть предположений для метода решения статистического уравнения (6.2) может нарушаться. Вследствие этого представляется необходимой проверка их соблюдения и при существенном нарушении — адаптация вычислительной схемы обработки.

6.2.2. Описательная (параметрическая) модель

Помимо представленной выше задачи представляется актуальным рассмотреть возможность высокоточного оценивания параметров в описательных моделях обработки данных на основе авторегрессионных методов (АРМ-подхода).

Так, например, в техническом проекте планируется задача измерения длин дуг между источниками излучения на небесной сфере.

Пусть дуга наблюдается многократно. Можно полагать, что разности $(l_o - l_c) = O - C$, полученные при сравнении вычисленной длины дуги l_c в соответствии с существующей тео-

рий и измеренной l_o на основе интерферометрических измерений, обусловлены неточностью принятых постоянных теории и ряда гипотез, положенных в ее основу (например, гипотез об отсутствии двойных звезд и скоростях их собственных движений).

Применяя метод дифференциальных поправок, основанный на разложении $(O - C) = \Delta l$ в ряд Тейлора до производных первого порядка по поправкам Δ_j к постоянным теории и другим уточняемым величинам, запишем для каждого наблюдения уравнения вида

$$\Delta l = \sum_{j=0}^{p-1} \Delta_j X_j, \quad (6.3)$$

где $X_j = \partial l / \partial \Delta_j$.

С учетом сказанного представляется, что по мере накопления наблюдательного материала и последующей обработки основные трудности в решении рассматриваемой задачи будут обусловлены методологией обработки наблюдений. Обычно используемая методология включает в себя этапы:

- 1) формирование уравнения дифференциальных поправок, получаемого в результате разложения разностей наблюдаемых и вычисленных расстояний в ряд Тейлора до производных первого порядка по поправкам к постоянным теории;
- 2) решение избыточной системы уравнений обычным МНК или с помощью схем МНК, устойчивых в условиях плохой обусловленности;
- 3) формирование комбинаций и групп поправок, не обремененных корреляционными связями.

При обработке рядов с большим количеством наблюдений исследователи стремятся ввести как можно больше неизвестных в уравнения дифференциальных поправок (порядка 100 и более). Однако было обнаружено, что взаимные корреляционные связи препятствуют совместному определению всех неизвестных. В связи с этим рядом авторов были высказаны рекомендации общего характера, предусматривающие:

- а) комбинирование наблюдений, выполненных в разных обсерваториях;
- б) определение некоторых комбинаций неизвестных;
- в) привлечение новых методов уравнивания;
- г) использование в совместной обработке наблюдений, полученных по разным методикам.

Бесспорно, что решение проблемы коррелированности (мультиколлинеарности) путем привлечения комбинированных наблюдений является хорошим способом. Однако значительных успехов для всей задачи здесь трудно ожидать, так как таким способом проблема будет решена только для некоторых поправок. К тому же возникнут трудности по соблюдению условия однородности наблюдений. Не следует возлагать больших надежд и на привлечение новых методов оценивания. С помощью таких методов можно в пределе их возможностей получить решение в случаях, близких к вырожденным. Тем не менее, неизвестные будут по-прежнему коррелированными и их наилучшие оценки останутся не вполне известными. По-видимому, единственно эффективным средством противодействия мультиколлинеарности останется способ, при котором в уравнении должны находиться только некоррелированные друг с другом члены. Для этого случая необходим способ подбора эффективной комбинации неизвестных, не имеющийся пока в распоряжении исследователей. В дальнейшем задачу подбора комбинации — набора, удовлетворяющего нас по заданному критерию, будем называть задачей структурной идентификации. Большую помощь в идентификации подходящих наборов могло бы оказать использование строгих статистических мер (критериев) качества моделей, под которыми понимаются уравнения поправок.

К сожалению, проблемой корреляции неизвестных круг проблем, возникающих при обработке наблюдений, не исчерпывается. К таковым относится проблема присутствия в модели неинформативных и малоинформативных (незначимых) членов разложения. Их присутствие понижает адекватность модели и, как было обнаружено [15], в случае коррелирован-

ности незначимых членов со значимыми происходит искажение значений последних. Так что последствия корреляции определяемых параметров на самом деле значительно серьезней, чем представляется на первый взгляд, и результаты по выявлению тонких эффектов нужно воспринимать с осторожностью.

Наличие взаимных корреляционных связей между неизвестными означает нарушение одного из предположений МНК — предположения о независимости переменных в модели. Однако это не единственное предположение, при котором правомочно применение МНК. При обработке наблюдений ряд условий, выполнение которых гарантирует получение состоятельных, несмещенных и эффективных оценок МНК, должен тщательно исследоваться.

6.2.3. К вопросу выбора методологии обработки данных

Рассмотренные две задачи математического моделирования охватывают достаточно широкий круг проблем, возникающих при обработке данных интерферометрических измерений.

Стандартная методология не использует современные возможности прикладной статистики, приводя с одной стороны, к формальному завышению точности результатов и рассмотрению статистически незначимых эффектов, — с другой стороны (в условиях нарушения ряда предположений МНК) к неоптимальным оценкам параметров и ухудшению прогностических свойств моделей.

С точки зрения современной прикладной статистики используемая в астрономии и геодезии методология обработки данных не в полной мере соответствует наблюдательному материалу, приводя при реализации к моделям, оценки параметров которых не удовлетворяют требованиям состоятельности, несмещенности, эффективности.

В системном подходе РМ методы оценивания и поиска оптимальных структур могут меняться для обеспечения требуемых свойств оценок в соответствии со свойствами выборки

данных. Дополнительными этапами регрессионного моделирования относительно стандартной методологии являются:

1) оценка адекватности модели наблюдениям и поиск ее оптимальной структуры.

2) проверка соблюдения предположений МНК,

3) адаптация вычислительной схемы к нарушению условий МНК применением набора приемов (замена исходной модели, методов оценивания и поиска оптимального набора членов),

4) использование набора мер (критериев) качества моделей, включая и многокритериальную концепцию, а также оптимальных сценариев обработки данных.

Применение адаптивного регрессионного моделирования, базирующегося на широком использовании автоматизированной системы и специального программного обеспечения, позволяет устранить ограничения стандартной методологии.

6.2.4. Регрессионный анализ (РА)

Модель РА

Модель обработки данных (6.1) может быть представлена в виде [15]:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\vec{\beta} + \vec{\varepsilon}, \quad (6.4)$$

где \mathbf{Y} – вектор наблюдений размера $(n \times 1)$, содержащий n наблюдаемых значений y_1, y_2, \dots, y_n зависимой переменной или отклика \mathbf{Y} (\mathbf{Y} – случайная величина);

\mathbf{X} – регрессионная матрица размера $(n \times p)$, содержащая $x_{10} = x_{20} = \dots = x_{n0} = 1$ и элементы x_{ij} как i -е наблюдения ($i = \overline{1, n}$) над регрессорами x_j ($j = \overline{1, p-1}$) (x_{ij} – неслучайная величина), p – количество регрессоров; $\vec{\beta}$ – вектор размера $(p \times 1)$ истинных неизвестных параметров β_j ($j = \overline{1, p-1}$), подлежащих оцениванию (β_j – неслучайная величина); $\vec{\varepsilon}$ – вектор флуктуаций (ошибок) размера $(n \times 1)$, содержащий неизвестные погрешности наблюдений ε_i ($i = \overline{1, n}$) (ε_i – случайная величина).

К форме (6.4) приводит обычное математическое представление прямых и косвенных наблюдений в астрономии и небесной механике.

В РА считается, что форма модели (6.4), постулируемая пользователем, является одной из гипотез. Ее справедливость (адекватность наблюдениям) проверяется на одном из этапов.

Оценивание параметров модели (точечное или интервальное) представляет собой основной этап регрессионного анализа. Под точечной оценкой параметра β_j понимается числовая характеристика, определяемая одним числом на основании ограниченного объема данных выборки. Интервальная оценка определяется по выборке двумя числами — концами интервала, внутри которого с заданной доверительной вероятностью γ или уровнем значимости α находится оцениваемый параметр.

Задача поиска оптимального подмножества регрессоров ставится следующим образом. Запишем вместо (6.4) равносильное соотношение

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_{p-1} x_{i,p-1} + \varepsilon_i. \quad (6.5)$$

В регрессионном анализе на основании (6.5) формируется множество моделей, содержащих x_0 ($x_0 = 1$) и некоторое количество регрессоров из множества $\{x_1, x_2, \dots, x_{p-1}\}$. Так как каждая переменная x_j ($j = \overline{1, p-1}$) может либо входить в уравнение, либо нет, то всего получается 2^{p-1} моделей. Из этого множества моделей необходимо выбрать по заданному критерию качества одну или несколько конкурирующих моделей, описывающих наблюдения. В проекте ОЗИРИС предполагается создание двух моделей:

- 1) модель формирования поля интерференции с моделью комплекса астрометрических редукций;
- 2) модель расположения наблюдаемых светил на небесной сфере.

Предположения РА–МНК

Для корректного применения РА необходимо соблюдение ряда предположений. Часть предположений, приведенных ниже, порождена статистической теорией оценивания, в которой устанавливаются условия на выборку данных и метод оценивания (МНК), другая часть – теорией статистических критериев. Кроме того, с учетом размерности задачи мы вводим предположение 5а на метод идентификации структур.

1. В отношении выборки значений $\{y_i, x_{ij}\}$ предполагают, что она достаточно представительна, т. е.:
 - (а) объем наблюдений достаточен;
 - (б) при организации наблюдений обеспечивается случайный отбор;
 - (с) ряд наблюдений однороден;
 - (д) отсутствуют грубые промахи внутри ряда.
2. По оцениваемому векторному параметру β формулируются предположения:
 - (а) модель (6.4) линейна по вектору β ;
 - (б) на вектор β не наложено ограничений;
 - (с) вектор β содержит аддитивную постоянную β_0 ;
 - (д) элементы вектора вычислены с пренебрежимо малой компьютерной погрешностью;
3. Отметим предположения о матрице \mathbf{X} :
 - (а) регрессоры x_0, x_1, \dots, x_{p-1} (столбцы матрицы \mathbf{X}) являются линейно-независимыми векторами матрицы \mathbf{X} или справедливо в отношении ранга матрицы $\text{rank}\mathbf{X} = p$;
 - (б) элементы матрицы \mathbf{X} не являются случайными величинами;

4. Основные предположения об элементах ε_i вектора ошибок ε :
 - (а) являются аддитивными случайными ошибками;
 - (б) распределены по нормальному закону;
 - (с) не содержат систематического смещения;
 - (д) имеют постоянную дисперсию;
 - (е) не коррелированы и в предположении (4б) статистически независимы.

5. В заключение отметим дополнительные предположения о векторе y :
 - (а) метод поиска оптимальной модели или идентификации оптимального набора регрессоров $\{x_j : j = \overline{1, p}, p < p\}$ для вектора y является точным;
 - (б) для многооткликовой задачи, содержащей два или более выходных параметров $y_k (k \geq 2)$, правомочно применение МНК к каждой из регрессий в отдельности.

Линейный нормальный РА обеспечивает наилучшие (состоятельные, несмещенные, эффективные) оценки только в условиях соблюдения всех условий РА. На практике предположения <1а>–<5б> нарушаются, поэтому оценки РА не оптимальны. Степень неоптимальности подробно рассмотрена в работе [15].

Различают три основных этапа РА:

- 1) постулирование модели,
- 2) оценивание ее параметров МНК,
- 3) анализ и поиск оптимальной структуры модели.

6.2.5. Адаптивное регрессионное моделирование Последствия нарушения предположений РА–МНК

Нарушение условий применения РА–МНК приводит к смещенным, несостоятельным и неэффективным МНК-оценкам

как параметров модели обработки β_j ($j = \overline{0, p-1}$), так и значений величины \hat{Y} при использовании модели в режиме прогноза.

Выявление нарушений

Для выявления нарушений условий применения РА–МНК могут быть использованы как соответствующие статистики, так и различного рода графические процедуры.

Методология АРМ-подхода

Как уже отмечалось, традиционная методология решения рассмотренных двух типов задач обработки данных характеризуется двумя моментами:

- 1) структура модели обработки принимается жестко заданной;
- 2) оценивание параметров модели выполняется методом наименьших квадратов.

Стандартный подход для данного технического проекта не соответствует требованиям по точности. Тем более, что простота его применения не компенсирует прогнозируемых потерь по свойствам наилучших линейных оценок от нескольких десятков процентов до одного порядка. В целом можно сказать, что использование вычислительной схемы МНК (без статистического анализа степени нарушений условий его применения и соответствующей адаптации) приводит, с одной стороны к формальному завышению точности результатов и рассмотрению статистически незначимых факторов, с другой (в условиях нарушения ряда предположений МНК) — к ненаилучшим оценкам параметров и ухудшению прогностических свойств модели.

Безусловно, применение регрессионного анализа является заметным шагом вперед по сравнению с использованием МНК:

1) проводится анализ модели по ряду критериев (R -, F -критериям);

2) анализируется статистическая значимость не только модели в целом, но и каждого отдельного слагаемого модели.

Последнее позволяет, используя те или иные методы структурной идентификации, выйти на оптимальную в некоторой степени структуру модели.

К сожалению, и РА не решает полностью поставленную задачу — нахождение наилучших линейных оценок $\hat{\beta}_j$ и \hat{Y} .

В развиваемом системном АРМ — подходе дополнительными этапами относительно стандартной методологии МНК являются:

1) оценка адекватности модели наблюдениям и поиск ее оптимальной структуры;

2) проверка соблюдения предположений МНК;

3) последовательная адаптация схемы обработки к нарушению условий МНК применением набора вычислительных процедур (перебор постулируемых моделей, методов параметрического оценивания и структурной идентификации и др.;

4) использование набора мер (критериев качества моделей, включая и многокритериальную концепцию).

Алгоритм построения оптимальной модели прогноза и прерывания измерений

Пусть модель прогноза постулируется в виде модели (6.4):

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\beta + \varepsilon$$

в ранее принятых обозначениях. Сохраняя принятую структуру и применяя обычный МНК, получим соответственно оценки параметров и ковариационную матрицу

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}, \quad (6.6)$$

$$D(\mathbf{b}) = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \sigma^2. \quad (6.7)$$

Один из перспективных сценариев обработки можно описать вкратце следующим образом.

1. На основе исходного описания (6.4) осуществляется однокритериальный поиск по глобальному критерию оптимальной математической структуры. Такой перебор может быть либо полным, если позволяют вычислительные возможности, либо неполным. В последнем случае метод неполного перебора с ограничением может быть одним из методов псевдодобулевой оптимизации.

Если уравнение регрессии представить в виде

$$\mathbf{y}_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{p-1} \beta_j x_{ij} z_j + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6.8)$$

где z_j — компоненты булевого вектора \mathbf{Z} , то задачу поиска оптимальной модели можно рассматривать как задачу дискретной оптимизации функционала с булевыми переменными $\min(\max) S'$, где $S' = S'(\mathbf{Z}, S)$ и $S = \sum_{i=1}^n (\mathbf{y}_i - \sum_{j=0}^{p-1} \beta_j x_{ij})^2$ — квадратичная форма, минимизируемая в МНК. Вводя ограничение K на максимальное количество слагаемых в структуре, получим число исследуемых структур N , равное $\sum_{i=1}^K C_{p-1}^i$, где C_{p-1}^i — число сочетаний. В частном случае количество элементов p_1 в структуре может быть фиксированным, тогда $N = C_{p-1}^{p_1}$.

В качестве глобального (основного) критерия качества модели могут быть либо случайные и систематические ошибки, определяемые по контрольным объектам, не использованным при построении модели обработки, либо значения общего F -критерия [17].

2. Второй и последующий этапы структурно-параметрической идентификации оптимальной модели основаны на проверке всех условий применения РА–МНК и последовательной адаптации по степени существенности нарушений. На практике «цепочки» алгоритмов адаптации могут быть раз-

ными, что порождает особые требования к «интеллектуальности» автоматизированной системы обработки данных. Например, при построении модели движения некоторой звезды могут рассматриваться как причины нарушений «пятнистость» звезды, наличие у нее одного или нескольких невидимых спутников, нестабильность видимого положения внегалактических источников и т. д.

Второй конкурирующий сценарий обработки данных при реализации не предполагает использование глобального критерия; последний, основанный на контрольных точках, используется только на конечной стадии. Основой этого подхода является проверка соблюдения предположений для исходной модели и ее последовательное улучшение путем адаптации к наиболее серьезным нарушениям по мере убывания степени искажения свойств наилучших оценок.

Алгоритм прерывания измерений объекта по мере достижения проектируемой точности может быть сформулирован следующим образом.

Пусть в результате измерений совокупности опорных объектов накоплены таблицы экспериментальных данных (ТЭД). При этом количество наблюдений в 5–15 раз превышает количество оцениваемых параметров модели (6.1).

После получения оптимальной модели обработки оценки точности среднего значения прогноза для искомой точки с измеренными координатами x_{k+1} , y_{k+1} можно найти по одной из формул вида

$$\hat{\sigma}_{\hat{y}_k} = \sqrt{D(\hat{Y}_k)} = (\mathbf{X}_k^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}_k S^2)^{1/2}, \quad (6.9)$$

где \mathbf{X}_k^T — $(1 \times p)$ -вектор наблюдений для искомой точки, так что $\hat{y}_k = \mathbf{X}_k^T \mathbf{b}$ есть предсказываемое значение отклика в точке x_k ; $S = \hat{\sigma}$ — известная оценка стандартной ошибки.

Сравнивая $\hat{\sigma}_{\hat{y}_k} = \sqrt{D(\hat{Y}_k)}$ с требуемой точностью ε_0 , можно либо сформировать команду на прерывание измерений, либо продолжить измерения и повторно применить аппарат

АРМ-подхода к обновленному массиву измерений до достижения проектируемой точности.

Алгоритм оценивания параметров методом ступенчатой ортогонализации базиса

В настоящее время для моделей описательного типа разработан алгоритм ступенчатой ортогонализации базиса [18]. В этом методе множество переменных правой части (6.3) последовательно разделяется на подмножества переменных с незначительными парными коэффициентами корреляции r_{ij} , т. е. представляется в виде отдельных структур в почти ортогональном базисе. Основные этапы алгоритма следующие:

1. Вычисляется оценка $\hat{\beta} = \hat{\Delta}$ исходной модели дифференциальных поправок (6.3) с использованием одной из вычислительных схем МНК и ее ковариационная матрица соответственно по формулам (6.6) и (6.7) и ряд статистик, позволяющих оценить статистическую значимость каждого слагаемого и модели в целом (значения t -критерия, F -критерия и r_{ij}).
2. Путем сравнения значений r_{ij} формируется первое подмножество поправок Δ_1 , обладающих незначимыми значениями r_{ij} .
3. Оцениваются параметры ортогональной структуры $Y = X_1\Delta_1$ и вычисляется первый вектор остатков $e_1 = Y_1 - \hat{Y}_1$, который рассматривается как очередной вектор отклика для формирования следующего подмножества поправок из множества оставшихся.
4. Этапы 2 и 3 повторяются до завершения процесса формирования подмножеств $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_k$.

Предлагаемый метод включает в себя три основные стратегии формирования групп оцениваемых параметров:

1. на каждой стадии метода (этапы 1–4) формируется подмножество переменных с незначимыми парными коэффициентами корреляции r_{ij} ;
2. на каждой стадии метода (этапы 1–4) формируется подмножество значимых по t -статистике переменных;
3. на каждой стадии метода (этапы 1–4) формируется подмножество значимых по t -статистике и одновременно ортогональных (с незначимыми парными коэффициентами корреляции r_{ij}) переменных.

Таким образом, в рамках предлагаемого метода реализуется по выбору исследователя одна из трех различных стратегий оценивания. Первая стратегия позволяет оценить коэффициенты модели в практически ортогональном базисе, так как при $r_{ij} < r_{lim}$ (r_{lim} — критическое значение коэффициента парной корреляции, принимаемое исследователем) регрессоры считаются ортогональными. Такой подход позволяет отдельно оценить коррелирующие коэффициенты регрессии за счет оценивания их на разных стадиях метода. В качестве недостатка метода можно отметить, что в число оцениваемых параметров попадают и незначимые по t -статистике.

Вторая стратегия включает в итоговую модель только те регрессоры, которые оказались значимыми по t -критерию на каждой стадии работы метода. Она наиболее близка к методу пошаговой регрессии, но за счет того, что расчет идет по отдельным подмножествам, позволяет оценить во много раз больше параметров исходной модели, так как регрессор, незначимый на одной стадии, может оказаться значимым на последующих. Это очень важно для задач параметрического оценивания, где необходимо получить как можно более полную модель. Данная стратегия не анализирует коррелируемость оцениваемых параметров.

Третья стратегия представляет собой совокупность первой и второй. Отбор во множество оцениваемых параметров идет сразу по двум признакам: значимости и ортогональности.

Практические исследования предлагаемого метода оценивания показали высокую эффективность алгоритма, большую устойчивость модели обработки по структуре и оцениваемым параметрам в сравнении с результатами, получаемыми известными методами множественной и пошаговой регрессии, а также другими конкурирующими алгоритмами.

На основе разработанного метода РА проведены исследования астрометрического содержания, для выполнения которых было подготовлено программное обеспечение [16]. Аналогичное ПО должно быть разработано для проекта ОЗИРИС на стадии экспериментального моделирования (макетного) дугомера-интерферометра.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ В КОСМОСЕ

7.1. Аппаратурный состав дугомера-интерферометра

Космический эксперимент, разрабатываемый в рамках НИР «Астрометрия», должен осуществляться на специализированном космическом аппарате, выводимом на орбиту, параметры которой представлены в 7.2.

Основой научной аппаратуры космического аппарата (НА КА) «Целеста» является двухбазовый дугомер-интерферометр ОЗИРИС, предложенный в качестве астрометрического инструмента нового поколения.

Астрометрический спутник должен обеспечить получение точных положений, собственных движений и параллаксов звезд, равномерно распределенных по всему небу. Поэтому продолжительность миссии должна составлять не менее 2,5 лет, а увеличение срока работы спутника приведет к получению дополнительной информации без девальвации ее ценности.

Основой для данной разработки стали проводимые НИЦ им. Г. Н. Бабакина исследовательские, проектные и экспериментальные работы по созданию малого многофункциональ-

ного космического аппарата, а также работы по разработке новых вариантов разгонных блоков для конверсионных ракет.

Предполагается, что конструктивные решения для проведения КЭ «Целеста» на основе специализированного астрометрического спутника могут быть использованы при подготовке аналогичных астрометрических КЭ на основе НА ОЗИ-РИС, в том числе на борту РС МКС и на многоцелевой космической станции (МЦКС) — посещаемой научной платформе.

Как оптический астрономический прибор, комплекс НА должен включать в себя следующие узлы:

- 4 внеосевых телескопа диаметром 200 мм и фокусным расстоянием главного зеркала 760 мм с выводом светового пучка на неподвижный узел светоприемника;

- 4 системы ориентации телескопов, включающие в себя звездные датчики и прецизионные приводы;

- 4 управляемые оптические линии задержки (по 2 в каждом интерферометре);

- 4 светоприемных устройства в измерительных каналах (по 2 в каждом интерферометре).

Дополнительно прибор должен иметь специфический конструктив — корпус интерферометра и узлы:

- 2 смесителя-спектрографа световых пучков с узлами ввода метрологического лазерного пучка от общего двухволнового лазера или двух одноволновых твердотельных лазеров предельно высокой стабильности;

- метрологическую лазерную систему с 5 каналами измерения абсолютной длины или относительного изменения оптических ходов на трассе звездного пучка;

- комплекс бортовой электронно-вычислительной аппаратуры.

Достижение микросекундного уровня точности измерений основывается не только на внутренней точности дугомера-интерферометра, но и на точности измерения параметров его текущего состояния, необходимых для правильной редукции результатов измерений. Для измерения параметров движения КА необходимо дополнительно включить в состав НА:

- микроакселерометр (гравиградиентометр);
- устройство определения положения по системе космической навигации (GPS);
- калиброванный по времени ответа автоответчик радиопульсов и/или его лазерный аналог;
- систему хранения времени (атомный стандарт частоты).

Вспомогательная аппаратура

- Солнечный датчик (2);
- блок датчиков угловой скорости (ДУС);
- двигатели-маховики;
- гидразинная система двигателей;
- электродинамическая система коррекции положения и ориентации;
 - телеметрические датчики;
 - нагреватели;
 - концевик отделения от РН;
 - радиокomплекс (приемник, передатчик);
 - блок управления;
 - аккумуляторная батарея;
 - солнечные панели и система управления солнечными панелями;
 - блок управления интерферометра;
 - блок накопления информации (память).

7.2. Конструктив дугомера-интерферометра ОЗИРИС

Как оптический астрономический прибор дугомер-интерферометр ОЗИРИС является ориентируемым инструментом, причем ориентация плоскости измерений и направление на середину измеряемой дуги задается разворотом всего инструмента как целого, а точное наведение на программные источники — непосредственно концевыми телескопами. В связи с этим, конструктив ОЗИРИСа предусматривает размещение в ориентируемом корпусе поворотных концевых телескопов, допускающих их поворот вокруг параллельных друг дру-

гу и ортогональных плоскости измерений (базе интерферометров). Диапазон изменений ориентации телескопов задается техническими ограничениями: минимальный угол между осями главных зеркал телескопов на одном конце базы определяется диаметрами их оправ и высотой оси поворота и составляет $\sim 30^\circ$. Максимальный угол между телескопами определен как 105° , но эта величина не является критичной и может быть уточнена в процессе конструктивной детализации.

Необходимость в светозащите прибора, предназначенного для измерения сигнала от предельно слабых объектов, требует его размещения в светогерметичном корпусе со световыми люками, открываемыми в сторону наблюдаемых объектов.

Корпус прибора обеспечивает его жесткость, поэтому внутренние стенки корпуса будут использованы как оптическая скамья для размещения фиксируемых и подвижных оптических элементов. Там же размещаются компоненты систем внутренней метрологии.

На пересечении механических осей поворотов и оптических осей главных зеркал располагаются оптические блоки реализации входных точек. Блоки устанавливаются неподвижно относительно корпуса, в связи с чем узлы подвески и управления движением телескопов вынесены за пределы входных апертур на боковые стенки.

7.2.1. Описание конструкции двухбазового интерферометра

Разработка конструкции проводилась на основе принципов, имеющих целью обеспечение заданных технических требований:

- соблюдение габаритно-массовых ограничений;
- исключение резонансных частот в требуемом диапазоне;
- использование отработанных и проверенных технологий и материалов;
- контроль геометрических параметров баз интерферометра при помощи лазерной системы наведения;

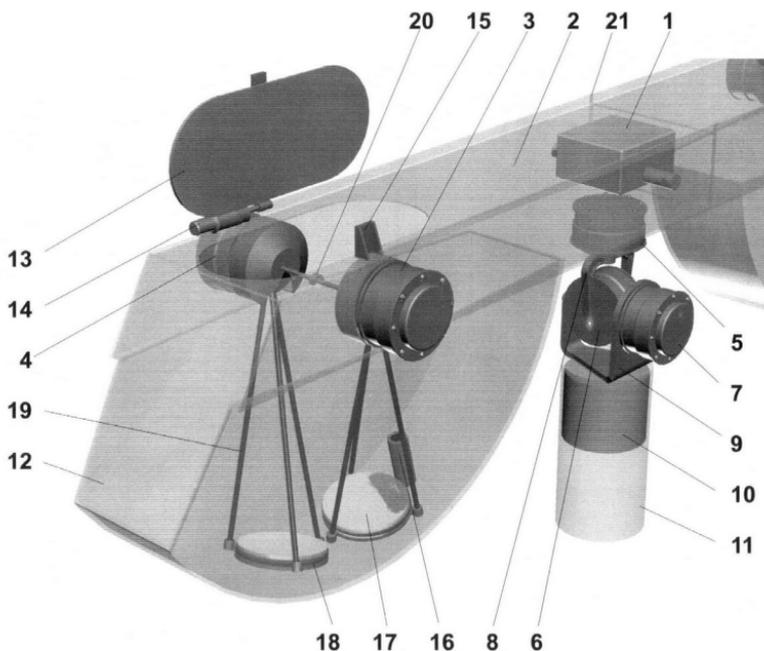


Рис. 7.1. Схема размещения главных узлов дугомера-интерферометра ОЗИРИС в общем корпусе (показано одно плечо). Цифрами обозначены: 1 – блок светоприемников; 2 – корпус (оптическая скамья); 3, 4 – приводы телескопов; 5, 6, 7 – приводы трехосной подвески дугомера; 8, 9 – вилки трехосной подвески; 10, 11 – узлы демпфирующей магнитной подвески; 12 – защитный кожух зоны качания телескопов; 13 – крышка светового люка; 14 – привод крышки люка; 15 – замок крышки люка; 16 – датчик пересветки области наблюдения; 17 – главное зеркало телескопа; 18 – оправа главного зеркала; 19 – штанги подвески главного зеркала; 20 – оптический блок реализации входной точки; 21 – линия стыковки половинок складного корпуса.

- развязка интерферометра от вибрационных воздействий при помощи демпфирующего устройства;
- управление наведением интерферометра в заданную точку за счет высокоточных приводов.

Внешний вид предлагаемой конструкции приведен на рис. 7.1 (левый кожух снят). Оптическая скамья является основным несущим узлом, определяющим точность и массу прибора и базовой деталью для размещения элементов оптической схемы. Предполагаемый материал для ее изготовления — АМГ6, обладающий температурной и временной стабильностью. Технология производства легких и жестких вафельных и ребристых конструкций из АМГ6 хорошо отработана и широко применяется, имеется действующее производство.

На концах оптической скамьи расположены приводы телескопов. Каждый телескоп (рис. 7.2) состоит из главного зеркала 1, трех магнитострикционных приводов прецизионного наведения 2, узла крепления 3, фермы 4 и кронштейна фокального узла 5 с вторичным и поворотным зеркалами и их собственными узлами подвеса. Каждая пара телескопов закрыта кожухом. Крышки телескопов приводятся в движение собственными приводами (рис. 7.3).

Оптическая скамья крепится к центральному узлу (рис. 7.1), который представляет собой трехступенной механизм, обеспечивающий повороты интерферометра. Соединение осуществляется через цапфы корпуса двухзвенного шарнира. Внутри данного корпуса находится привод поворотов относительно оси Z. Скоба связана с корпусом также цапфами, на одной из которых установлен привод поворотов относительно оси Y. Скоба и, следовательно, весь шарнир посредством вала подвижно соединены с основанием и за счет еще одного привода могут поворачиваться (вместе со всем интерферометром) относительно оси X.

7.3. Предварительный облик КА «Целеста»

КА состоит из двух модулей:

- спутниковая платформа (модуль со служебными системами КА);
- оптический интерферометр.

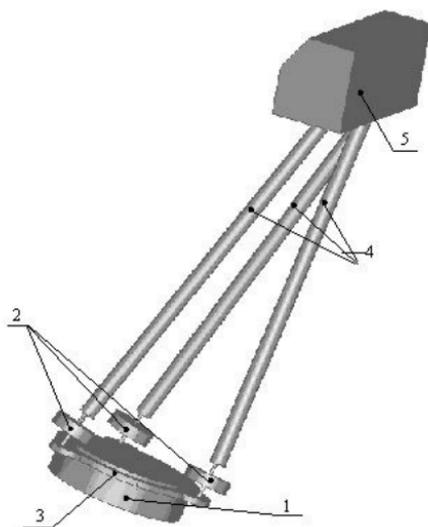


Рис. 7.2. Конструкция телескопа дугомера-интерферометра ОЗИРИС: 1 – внеосевое асферическое главное зеркало; 2 – магнито-стрикционные приводы юстировок главного зеркала; 3 – оправа главного зеркала с узлами крепления; 4 – штанги; 5 – узел вторичного зеркала и системы грубого наведения, который крепится непосредственно к прецизионному приводу телескопа.

Размещение дополнительной научной аппаратуры будет уточнено на последующих этапах разработки после завершения формирования научной программы полета. Предварительная компоновочная схема КА «Целеста» представлена на рис. 7.4.

Спутниковая платформа представляет собой негерметичный контейнер кубической формы, в котором размещены основные служебные системы КА. Снаружи контейнера установлены гидразинные двигатели ориентации и стабилизации, малонаправленные антенны (МНА) и остронаправленная антенна (ОНА). Нижней гранью куба, обращенной в полете на Солнце, спутниковая платформа устанавливается на адаптер

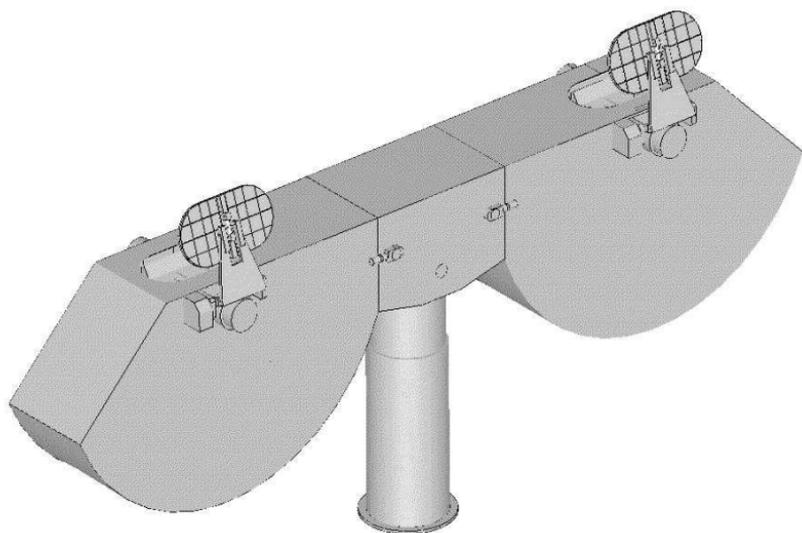


Рис. 7.3. Внешний вид НА ОЗИРИС в рабочем положении (крышки световых люков открыты).

РН, а на боковых гранях размещаются панели солнечных батарей и радиаторы-охладители. В процессе выведения КА на рабочую орбиту солнечные панели сложены к граням куба. На противосолнечной стороне куба установлен переходник для крепления конструкции интерферометра. Входные отверстия интерферометра направлены в сторону противоположную от Солнца, а с солнечной стороны конструкция интерферометра обшита экранно-вакуумной теплоизоляцией и закрыта защитным экраном для уменьшения влияния солнечного излучения на термодеструкцию интерферометра.

В описанном варианте КА дугомер-интерферометр ОЗИРИС используется в комплектации с системой трехосной ориентации. Однако, при малой массе НА ОЗИРИС ее размещение в качестве основной нагрузки на малом КА позволяет отказаться от системы независимой ориентации прибора.

На рис. 7.5 приведен предварительный облик КА «Целе-

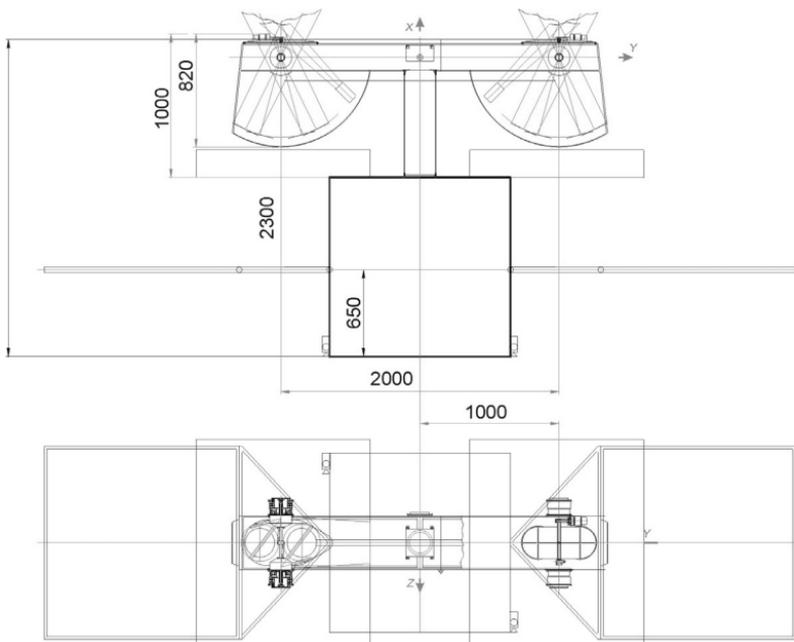


Рис. 7.4. Предварительная компоновочная схема КА «Целеста»

ста» с жестко закрепленным на его корпусе дугомером-интерферометром. Ориентация в пространстве прибора (его плоскости измерений) в этом варианте осуществляется путем разворота всего спутника. Ориентация КА может быть обеспечена применением маховиков малой массы, что гарантирует не только ориентацию прибора в произвольном направлении, но и необходимую скорость ее изменения.

Еще большей экономии массы можно добиться при использовании жесткой сборочной плиты платформы малого КА в качестве оптической скамьи для элементов интерферометра. Этот вариант представляется весьма перспективным для проработки Легкого Интерферометра-Дугомера для Астрометрии (ЛИДА), который может быть использован для прикладных применений.

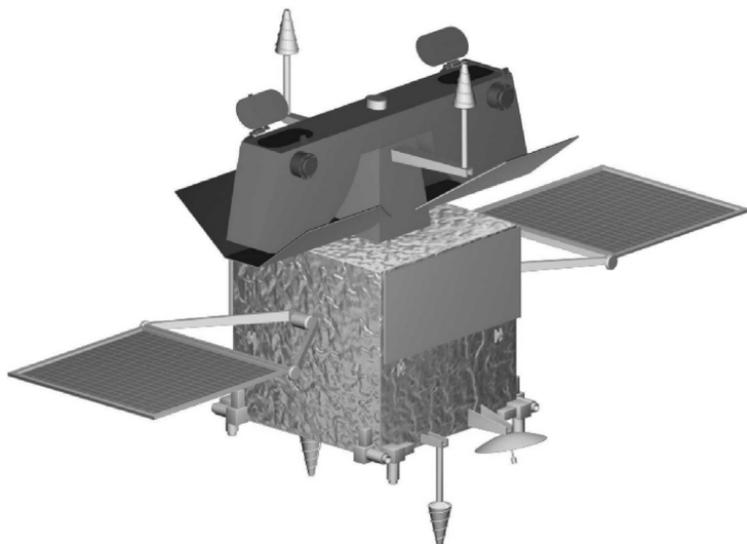


Рис. 7.5. Предварительный облик малогабаритного КА «Целеста». Малая масса КА позволяет исключить из его конструкции ориентируемую подвеску НА ОЗИРИС, и ориентация инструмента обеспечивается разворотом всего КА. Для уменьшения тепловых потоков со стороны Солнца интерферометр размещен на неосвещенной стороне корпуса и дополнительно защищен светоотражающим экраном.

7.4. Расчет теплового режима оптического интерферометра

Оптический интерферометр, размещенный на платформе космического аппарата, подвергается солнечному нагреву, что неизбежно приводит к температурной нестабильности прибора. Для уменьшения тепловых воздействий космический аппарат выводится на рабочую орбиту и ориентирован по отношению к Солнцу таким образом, что интерферометр постоянно находится в теневой зоне космического аппарата и не освещается Солнцем. Кроме того, предполагается применение системы пассивной термостабилизации инструмента.

Система обеспечения теплового режима интерферометра предназначена для поддержания температуры прибора и его отдельных элементов в пределах допустимых диапазонов температур при всех режимах функционирования прибора в составе космического аппарата.

При проведении расчетов теплового режима прибора был рассмотрен вариант схемы обеспечения теплового режима, основанной на использовании пассивных средств терморегулирования (специальные терморегулирующие металлизированные и лакокрасочные покрытия, применение элементов с калиброванными теплофизическими характеристиками, многослойная экрано-вакуумная теплоизоляция ЭВТИ).

Поверхности всех элементов конструкции интерферометра, кроме поверхностей зеркал, окрашены черной эмалью с термооптическими характеристиками $\alpha \geq 0.92$ и $\varepsilon \geq 0.85$. Снаружи поверхности оптической скамьи, кожухов и крышек, кроме полей зрения телескопов, закрыты многослойной теплоизоляцией типа ЭВТИ-2И-30 с облицовкой из ткани РАМ-2. Для уменьшения радиационного теплового влияния на интерферометр со стороны космического аппарата вокруг основания интерферометра установлен специальный защитный экран, поверхность которого закрыта ЭВТИ аналогичного состава. Крепление конструкции интерферометра к космическому аппарату осуществляется через специальный узел, обеспечивающий тепловую проводимость, равную 1.0 Вт/К.

Математическое моделирование тепловых режимов показало допустимость применения пассивной системы терморегуляции КА «Целеста»:

- температура включенного приемника составляет -41° , при выключенном приемнике его температура опускается до уровня -65° ;
- температура главных и вторичных зеркал находится в диапазоне от $-54^\circ \div -65^\circ$.

Температура корпуса оптической скамьи со стороны оси «+Y» отличается от температуры корпуса оптической скамьи со стороны оси «-Y». Максимальный перепад температур по

всей длине корпуса оптической скамьи составляет 2° . При этом в рассмотренной конструкции интерферометра предполагалось, что приемник и блок детекторов закреплены на корпусе оптической скамьи со стороны оси «+Y». Как показывают расчеты, при включении приемника в этом случае температура корпуса оптической скамьи со стороны оси «+Y» превышает температуру корпуса оптической скамьи со стороны оси «-Y» и, наоборот, при выключении приемника соотношение этих температур меняется на противоположное. Все это свидетельствует о том, что тепловое влияние приемника на корпус оптической скамьи достаточно существенно и это обстоятельство необходимо учитывать при конструкторской разработке узла крепления приемника к корпусу оптической скамьи.

Расчеты тепловых режимов варианта КА применением нагревателей для обогрева главных и вторичных зеркал показали следующее:

- температура включенного приемника составляет -41° ;
- температура главных и вторичных зеркал находится в диапазоне от -26.6° до -27° ;
- температура корпуса оптической скамьи со стороны оси «+Y» отличается от температуры корпуса оптической скамьи со стороны оси «-Y». Максимальный перепад температур по всей длине корпуса оптической скамьи составляет $0,61^\circ$.

Для обеспечения указанных температур основных элементов интерферометра необходимо установить следующие электронагреватели:

- на узлах подвеса главных зеркал — по одному нагревателю мощностью 2 Вт;
- на вторичных зеркалах телескопов — по одному нагревателю мощностью 3 Вт;

Для поддержания заданной температуры приборов и элементов конструкции КА в дополнение к нагревателям зеркал интерферометра необходимо установить электронагреватели мощностью 50 Вт.

7.5. Баллистико–навигационное обеспечение полета и параметры рабочей орбиты

При проведении прецизионных астрометрических измерений в космосе большое значение приобретает выбор орбиты космического аппарата. Этот выбор должен быть оптимальным с точки зрения целого ряда критериев. Требования к выбору орбиты можно условно разделить на две большие группы.

К первой группе относятся требования, обеспечивающие высокую точность астрометрических измерений, максимальную производительность работы астрометрического комплекса и возможность проводить измерения на всех участках небесной сферы.

Вторую группу образуют требования к орбите со стороны служебных систем космического аппарата. Это вопросы обеспечения оптимальных термических условий на его борту, условий устойчивой радиосвязи с различными наземными комплексами, возможность измерения с необходимой точностью скорости и положения космического аппарата, устойчивость орбиты по отношению к гравитационным возмущениям со стороны Луны и Солнца, влияние радиационной обстановки на электронику и служебные системы аппарата.

Движение космического астрометрического комплекса по высокоэллиптической орбите обладает рядом достоинств и недостатков. К первым из них следует прежде всего отнести достаточно большую часть периода обращения, в течение которого Земля не перекрывает участки небесной сферы, астрометрические измерения на которых имеют малые искажения гравитационным полем Солнца.

Кроме того, время нахождения аппарата в области радиационных поясов, для уменьшения влияния на электронику, можно минимизировать выбором высоты перигея.

Выведение КА на высокоэллиптическую орбиту может быть осуществлено либо с помощью ракеты-носителя «Союз»

и разгонного блока «Фрегат», либо конверсионной баллистической ракетой РС-20 (SS-18) с разгонным блоком «Варяг».

С увеличением высоты апогея возрастают гравитационные возмущения от Солнца и Луны, поэтому для обеспечения баллистического существования на высокоапогейной орбите в течение нескольких лет без проведения коррекции орбиты необходимо аргумент перигея начальной орбиты поместить во второй или четвертый квадранты относительно плоскости орбиты возмущающего тела (Солнца).

С точки зрения увеличения интервалов видимости из наземных пунктов управления, расположенных на территории России, аргумент перигея следует поместить в четвертый квадрант относительно плоскости эклиптики.

От долготы восходящего узла, с учетом возможности появления помех от Луны, Солнца и Земли в поле зрения научного прибора, зависит область небесной сферы, доступная для наблюдений.

К параметрам рабочей орбиты предъявляются следующие требования:

- время баллистического существования должно быть не менее 8 лет;
- время нахождения КА в тени Земли (на витке) должно быть не более 2,5 часов;
- орбита должна по возможности быть вне радиационных поясов Земли.

Последнее требование означает, что выбранные начальные параметры рабочей орбиты должны обеспечивать достаточно быструю эволюцию высоты перицентра.

Начальная высота перицентра рабочей орбиты КА, определяемая энергетическими возможностями ракеты-носителя, составляет 200 км. Это накладывает дополнительные ограничения на допустимую область начальных значений аргумента перигея ω и долготы восходящего узла Ω рабочей орбиты КА.

С учетом оптимизации перечисленных выше требований и ограничений, а также возможностей ракеты-носителя были

рассмотрены (для варианта ракеты-носителя РС-20) следующие начальные параметры рабочей орбиты КА:

• высота перицентра, км	250.0
• высота апоцентра, км	200000.0
• наклонение, град	46.2
• аргумент перигея, град	270.0
• долгота восходящего узла, град	260.0
• период обращения, час	97.5

Проведены расчеты эволюции параметров этой орбиты под воздействием нецентральной земного потенциала, а также возмущений от Солнца и Луны и изучены расчетные изменения высот перицентра и апоцентра орбиты в течение ~ 15 лет полета. Кроме того, оценены значения максимально возможной длительности тени на каждом витке в течение рассматриваемого времени полета. Оценки показывают, что максимально возможная длительность тени не превосходит 2.5 часа.

Схема вывода КА «Целеста» на рабочую орбиту показана на рис. 7.6.

По условиям проведения эксперимента требуется знать положение КА с высокой точностью (по уровню 3σ):

по радиусу — $30 \text{ см} \div 1 \text{ м}$;

по скорости — $1 \div 10 \text{ см/с}$.

Для определения достижимой точности знания положения КА были проведены расчеты по оценке точности определения положения КА при следующих исходных данных:

Точность проведения РКО в диапазоне "S" (по уровню 3σ):

– по дальности — $5 \div 10 \text{ м}$;

– по радиальной скорости — 2 мм/с ;

– РКО проводятся по однопунктовой схеме (Медвежьего озера).

Негравитационные возмущения:

– гидразиновые двигатели системы ориентации;

– периодическая разгрузка маховиков.

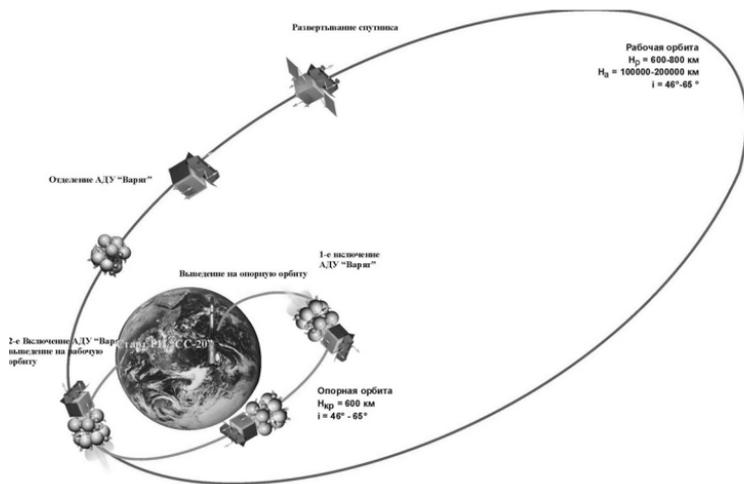


Рис. 7.6. Схема вывода КА «Целеста» на рабочую орбиту.

При оценке точности определения положения КА учитывался шум от неучтенной части ускорения, создаваемого солнечной радиацией. Номинальное значение ускорения, создаваемого солнечной радиацией, было принято равным 3–5 мм/сек².

Мерная база полагалась равной трем неделям — интервалу между разгрузками маховиков. Шум, создаваемый гидравлическими двигателями системы ориентации, не учитывался. Он может только ухудшить ситуацию.

Оценка проводилась для двух значений погрешностей измерения дальности — 10 и 5 м. Оценка точности определения орбитальных положений приведена в таблице 7.1.

7.6. Управление угловым движением КА

Система управления движением КА должна обеспечить переориентацию связанных осей КА в инерциальном пространстве и поддерживать заданную ориентацию в течение заданного времени с заданной точностью. По завершении иссле-

Таблица 7.1. Оценка точности определения орбитальных положений при использовании измерений пункта Медвежьи Озера

Неучтенная часть ускорения, создаваемого солнечной радиацией, %	Ошибка измерений скорости, [мм/сек]	Ошибка измерений дальности, [м]	Ошибка определения положения, [м]	Ошибка определения скорости, [мм/сек]
30	2	10	225	5
10	2	10	105	4
5	2	10	80	3
30	2	5	200	4
10	2	5	75	1
5	2	5	50	1

дований по одному источнику должна быть произведена переориентация на следующий источник и т. д.

При сроке существования КА до 5 лет ожидаемое количество переориентаций — до 40 тысяч. Необходимая длительность прецизионной ориентации на заданный источник составляет от 2 с для ярких звезд до 30...40 мин — для звезд 18 звездной величины.

Дугомер-интерферометр в составе КНА «Целеста» используется не только как источник научной информации, но и как датчик ориентации КА.

Интерферометр как датчик ориентации КА в инерциальном пространстве обеспечивает измерения в двух диапазонах отклонений:

- в поле радиусом 1° точность измерений — $2''$;
- в поле зрения $500''$ — $0.01''$;
- частота обновления информации — до 30...50 Гц.

Требования по точности стабилизации КА определяют точностью выставления линии визирования на зеркальный пятячок в системе точной ориентации телескопов, что ограничивает отклонение осей КА от требуемой ориентации по углу

не более $0.1''$, и режимом ввода метрологических поправок в координаты фотонных событий, ограничивающим темп девиаций по угловой скорости величиной $0.01''/с$.

Требования, предъявляемые к точности стабилизации КА, могут быть выполнены только при использовании инерционных исполнительных органов, в качестве которых можно использовать электромаховичные исполнительные органы (ЭМИО), – роторы-маховики. Они представляют собой электрические двигатели с массивными роторами. Управление ими строится таким образом, что двигатель-маховик на один импульс управляющего воздействия отвечает созданием определенного ускорения скорости вращения ротора. Тем самым создается определенный механический момент на валу электродвигателя. На КА воздействует реактивный момент и изменяет его угловую скорость.

ЭМИО в процессе стабилизации КА накапливают импульс внешнего возмущающего момента за счет гравитационных моментов, сил светового давления. При достижении максимальной угловой скорости вращения ЭМИО теряют способность управлять угловым движением. Для восстановления их работоспособности необходимо произвести так называемую «разгрузку» ЭМИО. С этой целью на КА необходимо приложить внешний момент, который приведет к снижению скорости вращения роторов ЭМИО, – например, путем включения газовых двигателей стабилизации или использования электромагнитных исполнительных органов.

Кроме того, КА должен производить большое количество переориентаций на исследуемые источники. ЭМИО позволяет производить переориентации без дополнительного расхода рабочего тела на их выполнение. Согласно расчету, необходимый уровень кинетического момента может развивать ЭМИО разработки ВНИИЭМ – ДМ-6. Уровень максимального момента, развиваемый этим двигателем, составляет 0.05 Нм .

Как указывалось ранее, для «разгрузки» ЭМИО необходимо приложить к корпусу КА внешний момент. Эволюция перигента приводит к периодической невозможности исполь-

зования взаимодействия магнитного поля Земли и управляемых электромагнитных исполнительных органов. В это время на орбите функционирования КА можно использовать газореактивные исполнительные двигатели стабилизации. Их можно также использовать для успокоения КА после отделения от ракеты-носителя, построения начальной ориентации и для восстановления ориентации КА при потере ориентации в нештатных случаях функционирования систем КА.

7.6.1. Последовательность операций по управлению ориентацией КА

Перед проведением серии измерений на борт КА по радиолинии должен быть передан массив командно-программной информации, — так называемое «Полетное задание» (ПЗ), в котором содержится последовательность координат исследуемых источников и длительность их наблюдения.

В заданный в ПЗ момент времени система управления угловым положением АКА, используя собственные измерительные средства, бескарданный гироинерциальный блок ориентации (БИБ) и астроизмерительную систему (АИС), производит переориентацию АКА для исследований по первому источнику наблюдения. Точность ориентации осей АКА в инерциальном пространстве при этом может составлять от 1.5 до 4 угл. мин. в зависимости от проведения перед этим сеансов юстировки (взаимной привязки систем координат) научной аппаратуры и системы ориентации КА. В этом положении производится успокоение КА и снижение угловых скоростей до уровня ~ 0.36 угл.сек/с. При таких угловых скоростях интерферометр должен начать выдавать в систему управления (СУ) информацию об отклонении от заданной ориентации с точностью 0.15 угл. сек. СУ, используя указанную информацию, переводит КА в окрестность заданного положения с погрешностью не более 1 угл. сек и снижает амплитуду угловых скоростей АКА до 0.03...0.05 угл.сек/с. На последующем участке движения за счет повышения точности информации интерферометра до 0.01 угл. сек СУ с какого-то момен-

та сможет поддерживать заданную ориентацию осей КА относительно заданного положения в инерциальном пространстве с точностью 0.1 угл. сек и снизить амплитуду угловых скоростей АКА до 0.01 угл. сек/с. При достижении указанных параметров СУ должна выдать в блок управления научными приборами команду-разрешение на начало научных наблюдений.

По завершении наблюдений по первому источнику СУ переориентирует КА в новое положение, после чего указанная последовательность действий повторяется.

7.7. Бортовые системы КА «Целеста»

7.7.1. Бортовой управляющий комплекс (БУК)

Система управления КА предназначена для выполнения следующих задач:

- управление работой бортовой аппаратуры по циклограммам, хранимым в памяти блока управления; в процессе полета циклограммы могут корректироваться и дополняться;
- управление ориентацией КА с использованием информации солнечных и звездных датчиков, датчиков угловой скорости;
- прием с Земли и дешифрацию командно-программной информации;
- сбор телеметрической информации, ее хранение, формирование телеметрических кадров и передачу телеметрической информации (ТМИ) на Землю;
- сбор информации с научных приборов КА и передача ее на Землю;
- диагностика и парирование нештатных ситуаций, согласно заложенным в память БУ алгоритмам.

В состав БУК входят следующие приборы:

- блок управления (БУ);
- бескарданный инерциальный блок (БИБ);
- приборы ориентации на солнце (ПОС);
- приборы ориентации на звезды в составе астроизмерительной системы (АИС — датчики ориентации каналов грубого и точного наведения телескопов);
- электро-маховичные исполнительные органы (ЭМИО);
- блок управления приводом ОНА (БУП).

Блок управления включает в себя следующие основные элементы:

- Три независимых процессора, каждый из которых может выполнять все функции КА и может работать параллельно с другими, если это необходимо.
- Троированную перепрограммируемую память программ (ППЗУ). Служит для хранения всех программ работы КА, кроме загрузчика. Использование перепрограммируемой памяти позволяет выявлять накапливаемые ошибки при хранении и устранять их, а также менять программы на борту КА во время проведения реального эксперимента. Собрана память на трех независимых микросхемах таким образом, чтобы выходы каждой были подключены на две шины управления системы.
- Резервируемую оперативную память (ОЗУ) с записью и чтением через кодер Хемминга. Программы, записанные в ППЗУ, проверяются и перезагружаются в оперативную память для постоянной работы. В случае возникновения какого-нибудь сбоя при работе или приема по радиоканалу новой программы производится новая перезагрузка программ из ППЗУ в ОЗУ без потерь состояния КА, которое запоминается в ППЗУ. Таким образом поддерживается высокая надежность системы блока управления КА.

- Тройной узел выбора процессора. Этот узел обеспечивает выбор какого-нибудь процессора для оперативной работы и периодически определяет его исправность. В случае, если диагностика дает отказ работающего процессора, узел автоматически выключает отказавший и включает другой находящийся в холодном резерве, который перехватывает все параметры, определяющие состояние КА и продолжает его нормальную жизнедеятельность.
- Управляющие адаптеры шин. Имеется два независимых адаптера, через которые может проводиться управление всеми исполнительными блоками КА.
- Два аналого-цифровых преобразователя, которые служат для обработки аналоговых сигналов систем КА.

Все процессоры связаны с остальными частями блока управления через две резервируемые шины, через параллельную 16-ти разрядную и последовательную (типа RS-422). Резервирование шин позволяет надежно работать блоку управления при любом одиночном отказе.

7.7.2. Вторичный источник питания (ВИП)

В связи с тем, что на борту имеются различные системы, которые требуют разных уровней напряжения, на КА применяется вторичный источник питания, располагаемый в одном корпусе с блоком управления. Схема выбрана таким образом, чтобы ВИП обеспечивал всех потребителей. Была выбрана схема с независимыми источниками питания с гальванической развязкой, которые контролируются бортовым процессором и которые можно резервировать без значительного увеличения массы КА. ВИП имеет следующие системы защиты:

- защита от короткого замыкания на случай отказа по линии нагрузки;

- защита от перегрузки по выходному току на случай частичного превышения в случае неправильной работы с потребителями;
- защита от превышения выходного напряжения на случай выбросов в цепях нагрузки;
- тепловая защита от перегрева источника питания.

В ВИПы включен контроль тока нагрузки, по которому осуществляется контроль работоспособности каждого внешнего потребителя. В случае превышения потребления каким-либо прибором более чем в 1,5–2 раза, прибор признается неисправным и бортовой процессор отключает неисправную нагрузку через коммутируемые цепи в блоке автоматики. На борту имеется контроль уровня напряжения каждого ВИПа. В случае отказа самого источника питания центральный процессор подключит резервный источник питания, отключив последний от батареи. ВИПы могут работать при больших изменениях входного напряжения от батареи и в случае, если батарея выходит из строя, продолжая нормально функционировать прямо от солнечной батареи. Выбранная схема источника питания обеспечивает практически бесперебойную работу системы, в худшем случае приводит к задержкам, не влияющим существенно на работу миссии.

7.7.3. Узел управления пиротехникой

Функционально устройство выполнено в виде двух независимых, резервируемых узлов, которые располагаются в процессорном блоке. Каждый пиротехнический узел выполнен на электронных ключах и реле. Каждая линия нагрузки имеет свою пиротехническую нить. На каждом узле имеется контроль исправности каждого ключа и исполнительных команд. Такая проверка обеспечивает строгий контроль включения каждой нити пиропатрона перед реальной работой. В случае неисправности какого-нибудь ключа или цепи система исключает его из работы, что защищает всю систему от ложного

срабатывания в случае отказа. Каждый узел обслуживает до 64 пирокоманд.

7.7.4. Узел контроля заряда и разряда батареи

На борту КА имеется многоэлементная батарея, которая требует контроля заряда и разряда каждого элемента. Циклическая работа батареи приводит к эффекту разбегания уровня заряда отдельного элемента. Чтобы избежать такого возможного эффекта и существует узел заряда/разряда. Он обеспечивает слежение уровня разряда каждого элемента.

7.7.5. Модуль распределения питания по потребителям

В процессе работы КА необходимо подключать и отключать питание от устройств системы. Это может происходить из-за необходимости держать соответствующее устройство в выключенном состоянии, что повышает надежность системы и экономит энергию. Отключение необходимо также по причине аварийного отказа каких-либо систем. Применение такой схемы повышает надежность всего КА и обеспечивает гибкую оперативную работу. Узел собран на реле и MOSFET ключах с плавным включением, которое уменьшает пусковые токи на нагрузке.

7.7.6. Узел контроля состояния и распределения энергии потребителям

Узел выполняет функции контроля за состоянием и распределением энергии для всех узлов систем КА. Информация о включении каждого потребителя и всех источников питания сохраняется в памяти процессора и по запросу с Земли может быть всегда передана на центральный пункт управления. На основании полученной информации бортовой процессор по заложенной в него тестовой программе может принять решение о работоспособности каждого потребителя и в случае его неработоспособности исключить из работы, заменив его резервным, а статус текущего состояния запоминается в ТМ кадре для передачи на землю.

7.8. Предложение по размещению КНА ОЗИРИС на космических аппаратах различного назначения

Дугомер-интерферометр ОЗИРИС имеет ряд специфических особенностей, которые выделяют его из ряда других космических инструментов. Высочайшая точность измерений с этим прибором достигается не за счет такой же высокой стабилизации тепловых режимов и механической устойчивости, а за счет быстрой внутренней метрологии, что снижает требования к изготовлению прибора и режимам его эксплуатации до уровня, освоенного космической техникой.

С другой стороны, требования к наведению линии визирования телескопов ОЗИРИСа и к скоростям остаточных девиаций существенно превышают уровень, обычно реализуемый в космических миссиях. Возможность удовлетворения этих требований заложена в конструкции самого прибора: датчики ориентации телескопов позволяют определить направление осей визирования с точностью до $0,01''$, а скорость дрейфа — до $0,0001''/с$. Это позволяет как использовать специальные устройства наведения собственно прибора, так и организовать высокоточную ориентацию всего КА. Благодаря этим решениям, КНА ОЗИРИС может быть использован в составе широкого класса космических миссий.

В первом варианте прорабатывалось создание астрометрического инструмента нового поколения для размещения его на МКС в качестве российско-американского совместного эксперимента. Но из-за трудностей с размещением на МКС разработанный в ИНАСАН проект «ЗОДИАК» не был поддержан, было принято решение разработать национальный инструмент того же назначения для работы на Российском Сегменте МКС. Этот проект КНА получил наименование ОЗИРИС.

Главным аргументом в пользу размещения астрометрического инструмента предельного уровня точности на обитаемом КК на низкой орбите было стремление сохранить воз-

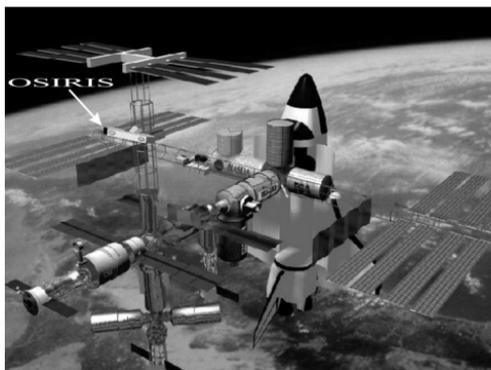


Рис. 7.7. Вариант предполагаемого размещения НА ОЗИРИС на мачте Научно-Энергетической Платформы МКС. Открытая для наблюдений область – «назад» по движению станции или «вбок».

возможность вмешательства в конструкцию прибора после его вывода на орбиту. Для высокой эффективности астрометрической миссии она должна продолжаться несколько лет (не меньше 5). В то же время ресурс непрерывной работы некоторых важных элементов прибора – светоприемника ВКЧД (см. § 4.8) и метрологического лазера – составляет всего 10 тысяч часов. Предусмотреть замену этих узлов намного легче, чем организовать их резервирование.

В связи с проработкой КНА ОЗИРИС для размещения на МКС прибор имел прецизионную систему самонаведения на программные объекты и магнитный демпфер для фильтрации механических вибраций. Конструкция МКС имеет большое число размещенных вне герметического отсека элементов, которые сильно ограничивают область наблюдений. Более или менее открытое направление для астрономических наблюдений должна была обеспечить научно-энергетическая платформа (НЭП), которая планировалась для работы в составе Российского Сегмента МКС, и которая должна была размещаться в «верхней» части станции. На рис. 7.7 показан вариант размещения НА ОЗИРИС на мачте НЭП.

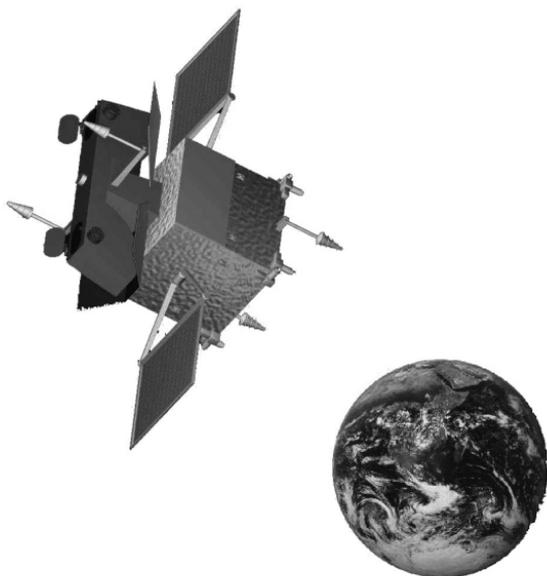


Рис. 7.8. Астрометрический КА «Целеста» во время наблюдений должен смотреть в область, противоположную направлениям на Солнце, Землю и Луну, чтобы избежать паразитной засветки и тепловых воздействий.

Совершенно аналогичная конструкция НА ОЗИРИС могла быть применена на борту перспективной Многоцелевой Высокоширотной Посещаемой Платформы, разрабатываемой в ЦНИИМАШ. Эта платформа, как менее подверженная механическим воздействиям по сравнению с постоянно обитаемым КК МКС, более предпочтительна для проведения астрономических исследований.

Астрометрический прибор на базе НА ОЗИРИС имеет наибольшие возможности для эффективной работы в качестве самостоятельного малого спутника. Этому способствует рациональный выбор орбиты, передача функций ориентации дугомера непосредственно механизмам КА, рациональное размещение НА в затененной части конструкции КА и т.д.



Рис. 7.9. Астрометрический спутник может быть использован для высокоточных измерений координат объектов на Земле, в воздухе и в околоземном пространстве. Для такого рода измерений наиболее удобна солнечно-синхронная орбита.

Спутник «Целеста» разрабатывается для проведения астрометрических исследований в полном объеме, то есть он будет вести измерения как ярких звезд, так и внегалактических источников, чтобы определить в оптическом диапазоне длин волн систему инерциальных небесных координат. Поэтому на КА «Целеста» реализуются все условия для проведения измерений с микросекундным уровнем точности (рис. 7.8).

Уже в процессе разработки астрометрической миссии выяснились большие перспективы для использования технических решений НА ОЗИРИС для прикладных задач. Например, практически без переделки НА ОЗИРИС может быть использован для высокоточного измерения координат наземных пунктов и околоземных КА, если они будут снабжены специальными источниками подсветки. Такой прибор может быть изготовлен для менее точных измерений, чем при астрометрической миссии, что позволит выполнить его в виде предельно легкой НА «ЛИДА». В облегченном варианте аппарат

может быть выведен на солнечно-синхронную орбиту легкой конверсионной ракетой, и обеспечить координатные измерения избранных объектов (рис. 7.9).

Весьма перспективным представляется сочетание дугомера-интерферометра с телескопом космического базирования, что даст возможность вести высокоточные измерения положений наблюдаемых в телескоп объектов непосредственно в системе инерциальных небесных координат. Как вариант этого применения, можно рассматривать систему высокоточного ориентирования телескопов лазерной космической связи (рис. 7.10).

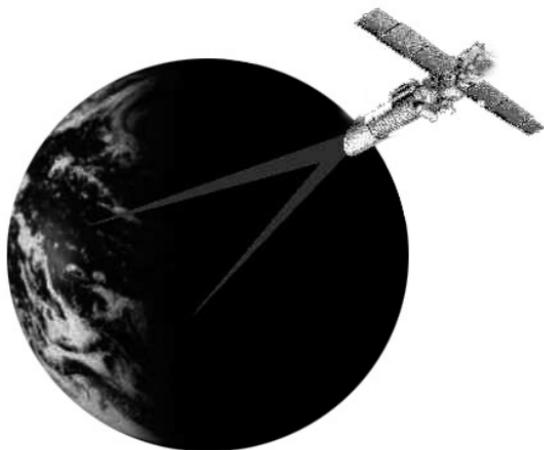


Рис. 7.10. Дугомер-интерферометр может быть использован для высокоточной ориентации телескопов космического базирования, в том числе телескопов лазерной космической связи. Поскольку опорные источники могут находиться на значительном удалении от точки наведения, система ориентации таких телескопов может наводить их на неразличимые со спутника связи пункты.

7.9. О возможности использования эффекта электромагнитодинамического взаимодействия КА с внешним магнитным полем для управления космическим аппаратом

С целью обеспечения резерва продолжительности функционирования астрометрического комплекса, проработан вопрос о возможности создания магнитных исполнительных органов (МИО) системы ориентации в виде протяженных токовых контуров, не связанных с использованием расходимых компонентов ДУ. Как известно, к настоящему времени уже рассматривались в теоретическом плане проблемы обеспечения устойчивости конфигураций замкнутых (кольцевых) тросовых систем, в том числе токопроводящих и при протекании по ним электрического тока, для поддержания их орбитальных параметров и ориентации при движении в магнитном поле Земли.

Применение протяженных токовых контуров в целях управления ориентацией представляется перспективным, так как современные технологии и конструкторские решения позволяют создавать легкие протяженные структуры, обладающие необходимой жесткостью для сохранения заданной конфигурации.

В миссии «Целеста» имеются две задачи, которые могут быть решены с использованием электромагнитных движителей: плавное управление девиацией ориентации во время наблюдений в апогейной части орбиты и разгрузка маховиков системы ориентации на нерабочей перигейной части орбиты в областях с высокой напряженностью магнитного поля Земли.

Согласно идеологии проектирования астрометрического КА «Целеста» точное наведение линии визирования астрометрического комплекса и парирование возмущающих моментов осуществляется системой двигателей-маховиков (ДМ).

В течение сеанса наблюдения ДМ накапливают кинетиче-

ский момент (КМ). Как известно, для сброса КМ могут быть применены различные технические средства [28, 10, 3, 48, 8], хорошо отработанные и широко применяемые на практике. К ним относятся, например, реактивные исполнительные органы (химические и электрореактивные двигатели, двигатели на сжатом газе и т.д.) и магнитные исполнительные органы (МИО), создающие на борту КА магнитный момент (ММ). В результате взаимодействия ММ с магнитным полем Земли (МПЗ) формируется механический управляющий момент (УМ), который и снимает с ДМ накопленный КМ.

Преимущество применения МИО для управления ориентацией КА заключается в том, что для реализации этого метода не требуется расхода массы рабочего тела, как в случае с реактивными двигателями. Для формирования ММ требуется только электроэнергия, которую на достаточном уровне обеспечивают солнечные батареи.

Примером применения МИО на современных научных КА является система ориентации разрабатываемого КА «Метеор–Фотон» [42]. Этот КА создается на базе космических комплексов «Метеор-3» и «Метеор-3М» и предназначен для наблюдения высокоэнергичных излучений солнечных вспышек.

По проекту космический аппарат «Метеор–Фотон» будет обладать следующими характеристиками:

Система ориентации КА «Метеор–Фотон» должна постоянно поддерживать продольную ось КА в направлении на Солнце и обеспечивать стабилизацию угловых скоростей для всех осей на уровне $0,005^\circ/\text{с}$.

Такую задачу наиболее успешно решает трехосная электромеханическая система ориентации типа 520М, используемая на КА «Метеор-3», показавшая высокую надежность и большой ресурс работы.

Оценки показывают, что на расстоянии 3-х метров от МИО системы сброса кинетического момента, выполненных в виде двух катушек с магнитными сердечниками длиной 0,8 м, магнитное поле составляет около 2,5 мкТл. Система сброса кине-

Таблица 7.2. Характеристики КА «Метеор-Фотон»

Срок активного существования КА	3 года
Масса КА в т. ч. масса полезной нагрузки	2500 кг
Масса полезной нагрузки	710 кг
Орбита КА	круговая с высотой 600 км
Наклонение орбиты	$-82,5^\circ$
Точность ориентации продольной оси космического аппарата на центр диска Солнца на освещенном участке орбиты	не хуже $12'$
Стабилизация ориентации осей космического аппарата	не менее $0,005^\circ/\text{с}$
Время восстановления стабилизации космического аппарата после выхода из тени	не более 5 мин
Точность определения положения:	
Продольной оси космического аппарата относительно направления на центр диска Солнца	не более $3-5'$
Остальных осей космического аппарата	$2-3^\circ$
Допустимое энергопотребление комплекса научной аппаратуры среднесуточное	400 Вт
Максимальное энергопотребление в течение 10 мин	800 Вт

тического момента включается на каждом витке 2–3 раза, общее время работы — не больше 6 мин.

Система ориентации и стабилизации (СОС) КА «Метеор-Фотон» должна постоянно поддерживать продольную ось КА в направлении на Солнце и стабилизацию угловых скоростей для всех осей на уровне заданных требований.

СОС базируется на трехосной электромеханической системе ориентации типа 520М, которая успешно эксплуатируется на КА серии «Метеор-3» и «Ресурс-0». Данная СОС является системой активного типа с тремя контурами управле-

ния и тремя каналами сброса кинетического момента. Она содержит датчики ориентации, систему сброса кинетического момента, активные исполнительные органы и блок управления. Для решения основной задачи по назначению в состав системы введены грубый и точный датчики Солнца.

Система сброса кинетического момента (ССКМ), в составе трехкомпонентного преобразователя геомагнитного поля (ППП-ЗМ, ППП-ЗМД), двух исполнительных органов (МИО-1, МИО-2) и электронно-логической части, решает задачу начального успокоения КА после отделения от РН и разгрузки исполнительных органов ДМ во всех последующих режимах.

Принцип действия ССКМ основан на использовании магнитного поля Земли. Внешний для КА момент создается формированием магнитного момента, взаимодействующего с геомагнитным полем.

Целесообразность применения магнитной системы сброса кинетического момента на КА «Метеор–Фотон» определяется его орбитой (характеризующейся значительной величиной индукции магнитного поля Земли), достаточно большим положительным опытом эксплуатации аналогичных систем на КА «Метеор–2, –3», «Ресурс–0» и длительным сроком эксплуатации КА.

В ССКМ предусмотрено формирование и передача сигналов, пропорциональных проекциям вектора индукции геомагнитного поля на связанные оси КА, в бортовой информационный комплекс.

В качестве исполнительных органов основных контуров управления КА приняты инерционные двигатели-маховики бесконтактного типа. Они надежны, имеют достаточно широкий диапазон управления и незначительное энергопотребление в установившемся режиме. В комплект одноосного двигателя маховика входит электронный блок управления (БУДМ) и собственно сам электромеханический блок (ДМ). Предлагаемая структура СОС содержит три ДМ, расположенных по осям КА.

Первоначальным режимом СОС после отделения от РН является режим предварительного успокоения КА. В ходе исполнения режима успокоения КА осуществляется сброс начального кинетического момента КА до минимального (приблизительно 15 Н·м·с), выбранного в качестве критерия перехода в последующий режим поиска Солнца. Переход в режим поиска Солнца выполняется автоматически.

Пространственное положение осей КА может быть определено по информации магнитометра о проекциях вектора индукции магнитного поля при наземной обработке целевой информации. Этот режим является основным длительным режимом эксплуатации СОС.

В установленном режиме СОС потребляет не более 100 Вт мощности. Масса СОС не более 120 кг с бортовой кабельной сетью. Структура и аппаратный состав системы позволяет без существенных усложнений повышать достижимую точность до уровня не хуже 1–1,5' по углам и по скоростям — не хуже 0,001–0,002°/с.

Как было отмечено выше, МИО потребляют электроэнергию, поэтому уместно привести характеристики системы электроснабжения КА «Метеор–Фотон».

Система электроснабжения (СЭС) предназначена для обеспечения электроэнергией всей аппаратуры КА, функционирующего на околоорбитальной приполярной орбите в течение трех лет. Средневитковое энергопотребление служебной аппаратуры составляет 374 Вт, в т. ч.:

- СОС — 100 Вт;
- СЭС — 35 Вт;
- СОТР — (65+8) Вт при отключенных нагревателях;
- БКУ — 166 Вт (100 Вт в дежурном режиме и 338 Вт в сеансе связи).

Средневитковое энергопотребление комплекса научной аппаратуры составляет около 400 Вт. Общая требуемая от СЭС средневитковая мощность составит 774 Вт.

Требуемая установленная мощность БФ составит 1600 Вт и, соответственно, площадь БФ по каркасу при удельной

мощности кремниевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) 160 Вт/м^2 составит около 14 м^2 . Масса БФ составит около 54 кг при толщине ФЭПов $0,2 \text{ мм}$.

Таким образом, СЭС КА «Метеор–Фотон» должна включать:

- БФ мощностью 1600 Вт и массой 54 кг ;
- две никель-кадмиевые АБ типа 17М022 суммарной массой 92 кг ;
- автомат питания — блок 55003 массой 35 кг с блоком 65005 массой 8 кг . Суммарная масса СЭС 193 кг .

При проектировании МИО для СОС астрометрического аппарата «Целеста» необходимо принять во внимание, что масса КА «Целеста» в пять раз меньше, чем у КА «Метеор–Фотон», а накапливаемый на ДМ момент — на два порядка меньше. Работая в более мягких условиях, ССКМ КА «Целеста» должна обеспечить многолетнюю работу астрометрического спутника при любом сроке сохранения его работоспособности. Поскольку современная электроника достигла уровня очень больших ресурсов работоспособности, необходимо предусмотреть заведомо большую работоспособность вспомогательных систем.

7.9.1. Основные теоретические положения разгрузки двигателей-маховиков с помощью магнитных исполнительных органов

В результате взаимодействия магнитного момента КА \mathbf{m} с МПЗ формируется механический момент

$$M = \mathbf{m} \cdot \mathbf{B}, \quad (7.1)$$

где \mathbf{m} — вектор магнитного момента КА, а \mathbf{B} — вектор индукции магнитного поля Земли.

Этот момент может быть использован для управления ориентацией КА: как для изменения направления связанных осей КА, так и для снятия кинетического момента, накопленного электромеханическими исполнительными органами, например, двигателями-маховиками.

Однако, из выражения (7.1) следует, что механический момент M не может быть создан вдоль вектора магнитной индукции поля Земли. Максимальное же значение модуля M достигается при ортогональности векторов \mathbf{m} и \mathbf{B} .

Следует отметить, что ввиду дипольного характера МПЗ и орбитального движения КА совпадение направлений векторов \mathbf{m} и \mathbf{B} происходит редко и непродолжительно, за исключением случаев пассивной магнитной ориентации и движения КА в плоскости магнитного экватора Земли.

Пусть H_w — это часть накопленного кинетического момента, которую необходимо сбросить магнитной системой разгрузки. Тогда, при пропорциональном управлении между M и H_w устанавливается соотношение

$$M = k \cdot H_w, \quad (7.2)$$

где k — константа.

Из рассмотрения обоих выражений для M получаем соотношение, связывающее векторы \mathbf{m} и \mathbf{H}_w :

$$\mathbf{m} = -k(\mathbf{B} \times \mathbf{H}_w)/B^2. \quad (7.3)$$

При этом выражение для механического момента M имеет вид

$$M = -k \frac{B^2 H_w - B(H_w B)}{B^2}. \quad (7.4)$$

Это выражение практически представляет собой закон управления кинетическим моментом за счет создания магнитного момента исполнительных органов.

Магнитный момент \mathbf{m} , создаваемый плоским контуром тока (при числе витков N и площади контура S), равен

$$\mathbf{m} = iNS\mathbf{n}, \quad (7.5)$$

где \mathbf{n} — орт нормали к плоскости контура тока.

Связывая последнее выражение с выражением (7.33), получаем закон управления током в контуре в зависимости от \mathbf{B} и \mathbf{H}_w :

$$iNSn = -k(\mathbf{B} \times \mathbf{H}_w)/B^2. \quad (7.6)$$

$$\begin{aligned} i_x &= -k(B_y H_{wz} - B_z H_{wy})/(B^2 N_x S_x), \\ i_y &= -k(B_z H_{wx} - B_x H_{wz})/(B^2 N_y S_y), \\ i_z &= -k(B_x H_{wy} - B_y H_{wx})/(B^2 N_z S_z), \end{aligned} \quad (7.7)$$

где $N_i \cdot S_i$ ($i = x, y, z$) — произведение числа витков на площадь контура катушек, расположенных вдоль соответствующих осей.

Последние три уравнения (7.7) дают значения токов в трех катушках с взаимно ортогональными осями, коллинеарными со связанными осями КА.

Исходя из анализа полученных соотношений выделяют три схемы магнитной разгрузки:

- схема с непрерывным функционированием, когда коррекция осуществляется непрерывно в соответствии с накоплением кинетического момента;
- схема с прерывным функционированием, когда разгрузка осуществляется прерывно по факту превышения величины H_w предельного значения;
- оптимальная схема с прерывным функционированием, когда разгрузка осуществляется прерывно по факту превышения величины H_w предельного значения, а величина $(\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_w)$ принимает минимальное значение на витке. В результате каждого сеанса разгрузки кинетический момент уменьшается на различную величину, но продолжительность коррекций одинакова.

Для миссии «Целеста» оптимальная схема с прерывным функционированием предусматривает полную разгрузку накопленного КМ на нижней части каждого витка. В том случае,

если энергетический ресурс позволяет, будет производиться коррекция орбиты КА тем же МИО.

Для увеличения эффективности функционирования МИО необходимо максимально увеличивать магнитный момент КА. Из выражения для ММ

$$\mathbf{m} = iN S \mathbf{n} \quad (7.8)$$

следует, что это требование может быть выполнено увеличением силы тока в контуре, увеличением числа витков и увеличением площади контура. До настоящего времени ввиду технических ограничений применялись первые два варианта. Однако развитие технологий производства композиционных материалов и применение новых конструкторских решений обуславливают возможность создания маломассовых протяженных космических сооружений, таких как, например, тросовые системы [4, 7].

Поэтому представляется своевременной постановка проблемы создания магнитных исполнительных органов КА, в которых максимизация магнитного момента обеспечивается за счет увеличения площади токового контура.

В работах [4, 7] рассмотрены проблемы обеспечения устойчивости конфигураций замкнутых (кольцевых) тросовых систем, в том числе токопроводящих и при протекании по ним электрического тока.

Оценим характерные размеры кругового контура с током, которым можно было бы заменить МИО реального КА [24], пассивная магнитная система стабилизации которого включает в себя два постоянных магнита с результирующим ММ 100 А м^2 . Для того, чтобы одновитковый токовый контур имел такой же ММ при токе 10 А его радиус $R = \sqrt{m/(\pi I)}$ должен быть равен $\sim 1,8 \text{ м}$. Ниже приведена таблица значений I и R при которых одновитковый токовый контур реализует магнитный момент 100 А м^2 :

Из таблицы 7.3 видно, что формирование требуемых значений силы тока для современных СЭС является тривиальной задачей.

Таблица 7.3.

I (А)	1	2	5	10	20	40
R (м)	5,6	4	2,5	1,8	1,3	0,9

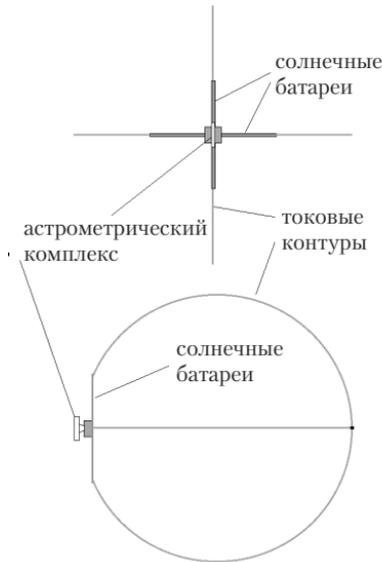


Рис. 7.11. Схема построения МИО на основе токовых контуров с двумя каналами управления

Кроме того, размеры контура соизмеримы и даже аналогичны габаритным размерам современных КА. Этот факт делает возможным изготовление солнечных батарей в форме контура в пределах конструкции КА. КА «Целеста» при энергопотреблении 400 Вт будет иметь массу ФЭП 14 кг, а габаритная площадь КА в плоскости ФЭП составит 4 м². На этом габарите будут собраны три жестких токовых контура, расположенных в ортогональных плоскостях, каждый из которых эквивалентен круглому контуру с $R = 2,5$ м. При рабочем напряжении бортовой сети КА 28 в протекающий через ФЭП

ток составит 15 А. Если все энергопотребление КА подключено последовательно с МИО, то падение напряжения на одновитковом МИО не превысит 0,1 В. То есть даже в режиме постоянной работы бортовые МИО не приведут к нарушениям электроснабжения научной аппаратуры.

Технические решения, основанные на передовых технологиях и позволяющие развертывать в космосе токовые контуры большого радиуса (~ 50 м и более), но неизменной конфигурации, предоставляют возможность существенно снижать энергопотребление при изменении ориентации.

На рис. 7.11 приведены два варианта схемы построения КА с МИО на основе протяженных токовых контуров с двумя и тремя каналами управления.

В этой книге рассказано об эксперименте, который позволит получить точные данные о том, где находятся и как движутся небесные тела. Казалось бы, над этим трудились уже многие поколения астрономов. Неужели вопрос ещё не решён?

Насколько вопрос решён, можно видеть на диаграмме А.1. На ней показано, астрометрические параметры скольких звёзд и с какой точностью сейчас известны. Буквенные аббревиатуры означают названия каталогов.

Наибольшее число звёзд содержат каталоги, созданные на основе наземных наблюдений. Точность их — несколько десятых долей секунды дуги. При их создании использована большая часть наблюдений, выполненных с конца XIX до конца XX века. Такие данные очень ценны — это огромный материал, позволяющий делать статистически значимые выводы. Но точные астрометрические параметры часто нужны и для исследования отдельных важных и интересных объектов. Это позволяет делать решающие выводы о принадлежности объекта, например, к определённому классу, или судить о его физических свойствах — массе, скорости, расположении в определённой области Галактики или далеко за её пределами. Но для этого нужны данные, точность которых намного превосходит точность наземных наблюдений.

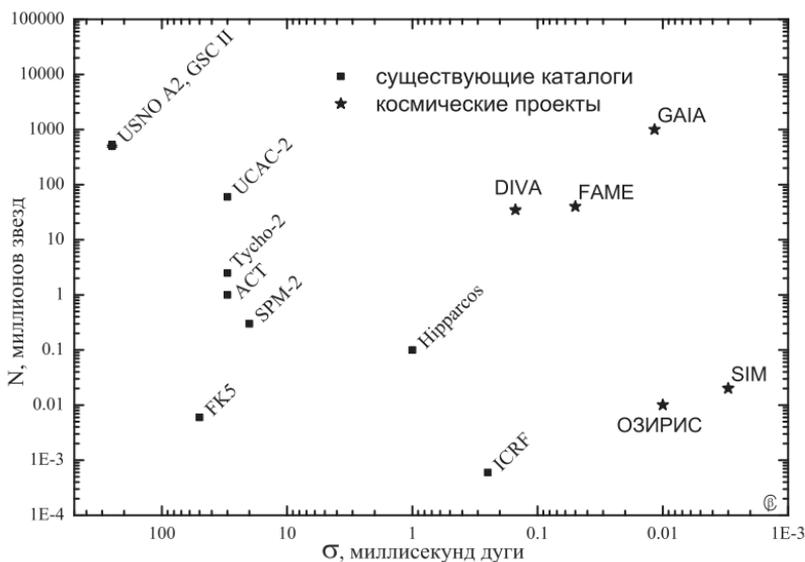


Рис. А.1. Число звезд в каталоге и средняя точность координат для разных каталогов.

Наиболее высокую точность имеют данные космического эксперимента *Hipparcos* — единственного исполненного в настоящее время (2005 г.). Выход астрометрии в космос сразу повысил точность наблюдений на два порядка. Даже появился термин «постгиппарховская эпоха». В эту эпоху, начавшуюся в 1997 г. (год публикации каталогов *Hipparcos* и *Tycho*), активизировалась разработка новых космических астрометрических проектов, претендующих на повышение точности ещё на два порядка. В эту же эпоху были созданы каталоги на основе объединения наземных и космических наблюдений. Это позволило заметно улучшить точность определения собственных движений звёзд. Однако эти «смешанные» по методам наблюдения данные не могут конкурировать по точности с «чисто космическими».

Космический проект, которому посвящена эта книга, конечно, не единственный. Каково же место ОЗИРИСа среди

будущих экспериментов? ОЗИРИС использует интерферометрический метод наблюдений, предполагающий измерение дуг между парами звёзд. Производительность такого метода невелика, зато ожидаемая точность данных больше ожидаемой точности, например, проекта GAIA, рассчитанного на измерение миллиарда звёзд. Это можно видеть на диаграмме рис. А.1. Другой космический проект, SIM, схожий по методу наблюдений с ОЗИРИСом, доставит данные и похожей точности, и в похожем количестве.

Стоит ли проводить два схожих эксперимента? Не только стоит, но и обязательно. До тех пор, пока научный результат не подтверждён другим экспериментом, другим методом, ему нет полного доверия. Например, пока нет подтверждения некоторым результатам Hipparcos'a, косвенно указывающим на наличие явления микролинзирования, а также некоторым другим.

Пожелаем успеха учёным, инженерам, рабочим в доведении работы до результата.

А.М.Черепашук, чл.-корр. РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Айвазян С. А.* Математическая энциклопедия. — М.: Наука, 1979. — Т. 2. — С. 1083.
- [2] *Акулич И. Л.* Математическое программирование в примерах и задачах. — М.: Высш. шк., 1986.
- [3] *Алтатов А. П., Драновский В. И., Салтыков Ю. Д., Хорошилов В. С.* Динамика космических аппаратов с магнитными системами управления. — М.: Машиностроение, 1978. — 200 с.
- [4] *Андреев А. В., Куркин В. И.* Электромеханическое управление замкнутой тросовой системой на околоземной орбите // Труды XXVI чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э.Циолковского (Калуга, 17-20 сентября 1991 г.) Секция «Механика космического полета» / Москва, ИИЕТ РАН. — Современные вопросы механики космического полета. — 1992. — С. 68–74.
- [5] *Багров А. В.* Астрометрическая поддержка работы космических телескопов с узким полем зрения // Тезисы докладов на Восьмом съезде Астрономического Общества и Международном симпозиуме АСТРОНОМИЯ—

2005: Состояние и перспективы развития // Труды ГАИШ. — Т. 78. — 2005. — С. 10.

- [6] *Багров А. В.* Лазерные системы оптической связи с космическими ретрансляторами // Материалы Второй международной конференции «Наука и Будущее: идеи, которые изменят мир». Москва 15–19 мая 2005 г. — М.: Фонд «Наука и Будущее», 2005. — С. 9–10.
- [7] *Белецкий В. В., Левин Е. М.* Динамика космических тропических систем. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1990. — 336 с.
- [8] *Белецкий В. В., Хентов А. А.* Вращательное движение намагниченного спутника. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. — 288 с.
- [9] *Блиох П. В., Минаков А. А.* Гравитационные линзы. — Киев: Наукова Думка, 1989.
- [10] *Боевкин В. И., Гуревич Ю. Г., Павлов Ю. Н., Толстусов Г. Н.* Ориентация искусственных спутников в гравитационных и магнитных полях. — М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 304 с., 1976.
- [11] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. — Москва, Наука, 1970.
- [12] *Боярчук А. А., Багров А. В., Микиша А. М., Рыклова Л. В., Смирнов М. А., Токовинин А. А., Эцин И. Ш.* Космическая оптическая интерферометрия для астрометрии // *Космич. исслед.* — 1999. — Т. 37, № 1. — С. 3–12.
- [13] *Боярчук А. А., Багров А. В., Рыклова Л. В., Смирнов М. А.* Перспективы исследований характеристик Солнечной системы астрометрическим дугомером-интерферометром // сб. трудов конференции “Околосолнечная астрономия XXI века”, Звенигород, 21-25 мая 2001 г. — М: ГЕОС, 2001. — С. 455–463.

- [14] *Валеев С. Г.* Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. — М.: Наука, 1991. — 1-е издание: 273 с.
- [15] *Валеев С. Г.* Регрессионное моделирование при обработке данных. — 2 изд. — Казань: ФЭН, 2001. — 296 с.
- [16] *Валеев С. Г., Кадырова Г. Р.* Автоматизированная система для решения задач метода наименьших квадратов // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.* — 1999. — № 6. — С. 124–130.
- [17] *Валеев С. Г., Кадырова Г. Р.* Оптимальные редукционные модели в фотографической астрометрии // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.* — 2002. — № 3. — С. 58–69.
- [18] *Валеев С. Г., Родионова Т. Е.* Анализ методов оценивания параметров при мультиколлинеарности переменных // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.* — 1989. — № 5. — С. 20–28.
- [19] *Вентцель Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. — М., Дрофа, 2004.
- [20] *Жаров В. Е.* Сферическая астрономия. — Astronet, <http://www.astronet.ru/db/msg/1190817>, 2002.
- [21] *Захаров А. Ф.* Гравитационные линзы и микролинзы. — М.: Янус, 1997.
- [22] *Захаров А. Ф., Сажин М. В.* Гравитационное микролинзирование // *УФН.* — 1998. — Т. 168, № 10. — С. 1041.
- [23] *Капралов В. П., др.* Измерение отношения длин волн излучения лазеров, стабилизированных по насыщенному поглощению в иоде и метане // *Оптика и спектроскопия.* — 1981. — Т. 50. — С. 67–72.
- [24] *Каргу Л. И.* Системы угловой стабилизации космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1980. — 172 с.

- [25] *Карташев А. И., Эцин И. Ш.* Методы измерения малых изменений разности фаз в интерференционных устройствах // *УФН.* — 1972. — Т. 106. — С. 687–721.
- [26] *Киселев А. А.* Теоретические основания фотографической астрометрии. — М.: Наука, 1989. — 260 с.
- [27] *Ковалевский Ж.* Современная астрометрия. — Фрязино: Век 2, 2004. — под. ред. В. Е. Жарова.
- [28] *Коваленко В. Ю.* Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1975. — 248 с.
- [29] *Корнилов В. Г., Волков И. М., Захаров А. И., Козырева В. С., Корнилова Л. Н., Крутяков А. Н., Крылов А. В., Кусакин А. В., Леонтьев С. Е., Миронов А. В., Мошкалева В. Г., Погрошева Т. М., Семенов В. Н., Халиуллин Х. Ф.* Каталог WBVR-величин ярких звёзд Северного неба // *Труды ГАИШ.* — 1991. — Т. 63. — С. 400. — М.: Изд-во Моск. ун-та.
- [30] *Коронкевич В. П., Ханов В. А.* Современные лазерные интерферометры. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1985. — С. 184.
- [31] *Куимов К. В., Кузьмин А. В., Нестеров В. В.* Астрографический каталог в современной астрометрии // *Известия РАН, серия физическая.* — 1998. — Т. 62, № 10. — С. 1780–1787.
- [32] *Куимов К. В., Кузьмин А. В., Нестеров В. В.* Редукция Астрографического каталога в систему ICRS/HIPPARCOS // *Труды IV съезда Астрономического общества.* — М., Современный писатель, 1998. — С. 89–95.
- [33] *Куимов К. В., Расторгуев А. С., Глушкова Е. В., Дамбис А. К., Кузьмин А. В., Наджит А. Э., Семенов В. Н.,*

Федосеев Е. Н. Материалы к научно-техническому отчету о выполнении второго этапа научно-технических работ «Разработка предложений по выбору астрофизических источников для первой версии входного каталога избранных объектов.» по договору 026/КА от 16 февраля 2001 г. на 10 листах. — ГАИШ МГУ, 2001.

- [34] *Кучинский В. В., Эцин И. Ш.* Предел точности интерференционных измерений длин волн // *Оптика и спектроскопия.* — 1982. — Т. 52. — С. 539–544.
- [35] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. — М.: Наука, 1988.
- [36] *Ландсберг Г. С.* Оптика. — М.: Наука, 1976.
- [37] *Лебедева В. В.* Экспериментальная оптика. — 3 изд. — М.: Изд-во МГУ, 1994.
- [38] *Летохов В. С., Чеботаев В. П.* Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. — М.: Наука, 1990.
- [39] *Любомудров О. В., Эцин И. Ш.* Возможности измерения длины методом совпадения дробных частей порядков интерференции // *Оптико-Механическая Промышленность.* — 1984. — Т. 10. — С. 60–61.
- [40] *Маррей К. Э.* Векторная астрометрия. — Киев: Наукова Думка, 1986.
- [41] *Нагибина И. М.* Интерференция и дифракция света. — Ленинград: Машиностроение, 1985. — С. 336.
- [42] *НИИЭМ.* Космический комплекс «Метеор-Фотон». — Техническое предложение. — 1999.
- [43] *Подобед В. В., Нестеров В. В.* Общая астрометрия. — М.: Наука, 1975. — С. 552.

- [44] *Сажин М. В.* Фундаментальный предел точности астрометрических наблюдений // *Письма в Астрон. журн.* — 1996. — Т. 22. — С. 643.
- [45] *Сажин М. В., Сидоров В. М.* Введение в теорию гравитационных линз и наблюдательные данные по системе 0957+56 a,b: Препринт 3: ВСО ГАИШ, 1989.
- [46] *Семенов В. Н.* Отождествление звезд на пластинках в пределах зон Астрографического каталога // *Труды ГАИШ.* — Физический факультет МГУ, 2000. — Т. 68. — С. 86–102.
- [47] *Серегин А. Г., Багров А. В., Серегин Д. А., Лебедева Г. И.* Схемы наведения звездного интерферометра ОЗИРИС и имитатора интерференционного узла светоделилителя-спектрографа // *Оптический журнал.* — 2002. — Т. 69, № 11. — С. 52–57.
- [48] *Сингер С. Ф.* (ред.). Проблемы ориентации искусственных спутников Земли. — М.: «Наука» Главная редакция физ.-мат. литературы, 1966.
- [49] *Теребиж В. Ю.* Анализ временных рядов в астрофизике. — М.: Наука, 1992. — 392 с.
- [50] *Черепашук А. М., Куимов К. В., Расторгуев А. С., Глушкова Е. В., Дамбис А. К., Кузьмин А. В., Наджип А. Э., Семенов В. Н., Федосеев Е. Н., Чазов В. В.* Проработка предложений по высокоточным астрометрическим измерениям звезд космическим интерферометром. Этап № 2 «Оптимизационное моделирование для предвычислени положений объектов запланированных наблюдений» по договору 038/КА от 16 января 2002 г., на 19 листах. — Научно технический отчет ГАИШ МГУ, 2002.
- [51] *Черепашук А. М., Куимов К. В., Расторгуев А., Глушкова Е. В., Дамбис А. К., Кузьмин А. В., Наджип А. Э., Се-*

менцов В. Н., Федосеев Е. Н. Проработка предложений по высокоточным астрометрическим измерениям звезд космическим интерферометром. Этап № 1 «Составление списка всех астрофизических объектов для входного каталога» по договору 038/КА от 16 января 2002 г., на 13 листах. — 2002. — Научно технический отчет ГАИШ МГУ.

- [52] Шикин Е. В., Чхартишвили А. Г. Математические методы и модели в управлении. — М., Дело, 2002.
- [53] Яцкив Я. С., Курьянова А. Н. Об одном возможном способе обработки измерений в астрофотографии // *Кинематика и физика небесных тел.* — 1983. — Т. 1, № 1. — С. 18–26.
- [54] Alcock C., Akerloff C. W., Allsman R. A., Axelrod T. S., Bennett D. P., Chan S., Cook C. H., Freeman K. C., Griest K., Marshall S. L., Park H. S., Perlmutter S., Peterson B. A., Pratt M. R., Quinn P. J., Rodgers A. W., Stubbs C. W., Sutherland W. Possible Gravitational Microlensing of a Star in the Large Magellanic Cloud // *Nature.* — 1993. — October. — Vol. 365. — P. 621.
- [55] Arkhipov M. G., Seregin A. G., Etsin I. S. Interferometer with two-frequency phase modulation // *Optics and Spectroscopy.* — 1994. — July. — Vol. 77. — Pp. 125–128.
- [56] Bagrov A. V. Natural Limits to the accuracy of Measurements of the Angular Positions of Celestial Sources: Last Step to the Borders of the Universe // Digest Reports of the IVth ISTC Scientific advisory Committee Seminar on "Basic Science in ISTC Activities" 23-27 april 2001. — Novosibirsk: BINP SB RAS, 2001. — P. 38.
- [57] Bagrov A. V., Boyarchuk A. A., Barabanov S. I., Mikisha A. M., Rykhlova L. V., Smirnov M. A. OSIRIS — An Optical Stellar Interferometer for Russian Investigations

in Space // Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space // Proc. of a Conf. held at Dana Point, CA, USA, May 24-27, 1999 / Ed. by S. Unwin, R. Stachnik. — Vol. 194 of *ASP Conf. Ser.* — 1999. — Pp. 381–384.

- [58] *Bagrov A. V., Kolesnik Y. B.* Scientific objectives of a small size catalogue based on the space born optical interferometric mission // *Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds. Journees 2003. Systemes de references spatio-temporels. St.Petersburg, 22-25 September.* — СПб.: Изд-во Института Прикладной астрономии РАН, 2004. — Pp. 71–72.
- [59] *Bobroff N.* Recent advances in displacement measuring interferometry // *Measurement Science and Technology.* — 1993. — September. — Vol. 4. — Pp. 907–926.
- [60] *Boyarchuk A. A., Bagrov A. V., Rykhlova L. V., Sysoev V. K., Pichkhadze K. M., Stekolschikov O. Y., Ryzhenko A. P.* Project of the small-size space Optical Interferometer of two-basis // *UV/EUV and Visible Space Instrumentation for Astronomy and Solar Physics / Ed. by M. A. G. Oswald H. W. Siegmund, Silvano Fineschi.* — Vol. 4498. — Proceedings of SPIE, 2001. — Pp. 343–348.
- [61] *Buscombe W.* 14th General Catalogue of MK Spectral Classification (Buscombe 1999) // *VizieR Online Data Catalog.* — 2001. — June. — Vol. 3222.
- [62] *Cayrel de Strobel G., Soubiran C., Ralite N.* Catalogue of [Fe/H] determinations for FGK stars: 2001 edition // *A&A.* — 2001. — July. — Vol. 373. — Pp. 159–163.
- [63] *Daendliker R., Hug K., Politch J., Zimmermann E.* High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry // *Optical Engineering.* — 1995. — August. — Vol. 34. — Pp. 2407–2412.

- [64] Definition and realization of the International Celestial Reference System by VLBI astrometry of extragalactic objects / Ed. by C. Ma, M. Feissel. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Technical Note no. 23. — Observatoire de Paris, 1997.
- [65] *Eichhorn H.* Astronomy of star positions — A critical investigation of star catalogues, the methods of their construction and their purpose. — New York: Ungar, 1974.
- [66] *Etsin I. S., Butenko L. N.* Phase modulation methods of interferometry // Proc. SPIE Vol. 2782, p. 646-657, Optical Inspection and Micromasurements, Christophe Gorecki; Ed. — 1996. — September. — Pp. 646–657.
- [67] *Etsin I. S., Butenko L. N.* Phase modulation methods of interferometry // Proc. SPIE Vol. 2782, Optical Inspection and Micromasurements, Christophe Gorecki; Ed. — 1996. — September. — Pp. 646–657.
- [68] Evidence for Gravitational Microlensing by Dark Objects in the Galactic Halo / E. Aubourg, P. Bareyre, S. Brehin, M. Gros, M. Lachieze-Rey, B. Laurent, E. Lesquoy, C. Magneville, A. Milsztajn, L. Moscoso, F. Queindec, J. Rich, M. Spiro, L. Vigroux, S. Zylberajch, R. Ansari, F. Cavalier, M. Moniez, J. P. Beaulieu, R. Ferlet et al. // Nature. — 1993. — October. — Vol. 365. — P. 623.
- [69] *Extrasolar Planets.* http://exoplanets.org/planet_table.shtml. — 2005.
- [70] *Feissel M., Gontier A.-M., Eubanks T. M.* Spatial variability of compact extragalactic radiosources // A&A. — 2000. — July. — Vol. 359. — Pp. 1201–1204.
- [71] *Feissel M., Mignard F.* The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences // A&A. — 1998. — March. — Vol. 331. — Pp. L33–L36.

- [72] *Green R. M.* Spherical astronomy. — Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1985, 533 p., 1985.
- [73] *Griest K.* Galactic microlensing as a method of detecting massive compact halo objects // *ApJ*. — 1991. — January. — Vol. 366. — Pp. 412–421.
- [74] *Griffin R. F., Suchkov A. A.* The Nature of Overluminous F Stars Observed in a Radial-Velocity Survey // *ApJS*. — 2003. — July. — Vol. 147. — Pp. 103–144.
- [75] *Gursel Y.* Laser metrology gauges for OSI // *Proc. SPIE* Vol. 1947, p. 188–197, Spaceborne Interferometry, Robert D. Reasenberg; Ed. — 1993. — September. — Pp. 188–197.
- [76] *HCRF.* Resolution B1.2 adopted at the 24th General Assembly of IAU (Manchester, August 2000) // *IAU Inf. Bull.* — Vol. 88. — 2000.
- [77] *Herring T. A., Buffett B. A., Mathews P. M., Shapiro I. I.* Forced nutations of the Earth: Influence of inner core dynamics, 3. Very long baseline interferometry data analysis // *J. Geophys. Res.*. — 1991. — May. — Vol. 96, no. 15. — Pp. 8259–8273.
- [78] *Hoeg E., Kuzmin A., Bastian U., Fabricius C., Kuimov K., Lindegren L., Makarov V. V., Roeser S.* The TYCHO Reference Catalogue // *A&A*. — 1998. — July. — Vol. 335. — Pp. L65–L68.
- [79] *Høg E., Fabricius C., Makarov V. V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A.* The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // *A&A*. — 2000. — March. — Vol. 355. — Pp. L27–L30.
- [80] *Hughes J. A.* Review of projects in space astrometry // *Advances in Space Research*. — 1991. — Vol. 11. — Pp. 143–150.

- [81] *Hummels C. B., Rhee J., Polak A. A., Crane J. D., Patterson R. J., Majewski S. R., Kunkel W. E., Geisler D., Seguel J., Gieren W., Slesnick C. L., Kundu A., Benedict G. F., Johnston K. V., Moskowicz C.* The Grid Giant Star Survey (GGSS) for SIM: A Status Report // *Bulletin of the American Astronomical Society*. — 2002. — December. — Vol. 34. — P. 1223.
- [82] IERS Conventions (2003) / Ed. by D. D. McCarthy, G. Petit. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Technical Note no. 32. — Frankfurt am Main, Germany: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, ISBN 3-89888-884-3, 2004. — 127 pp. online version at: <http://www.iers.org/iers/publications/tn/tn32/>.
- [83] *Jacobs C. S., Sovers O. J., Gordon D., Ma C., Gontier A.-M.* The Accuracy of the ICRF: an Intercomparison of VLBI Analysis Software // Highlights in Astronomy, as presented at Joint Discussion 14 of the XXIIIrd General Assembly of the IAU, 1997 / Ed. by J. Andersen. — Vol. 11A. — 1998. — P. 320.
- [84] *Jacobs C. S., Sovers O. J., Williams J. G., Standish E. M.* The extragalactic and solar system celestial frames: Accuracy, stability, and interconnection // *Advances in Space Research*. — 1993. — November. — Vol. 13. — Pp. 161–174.
- [85] *Kervella P., Bersier D., Mourard D., Nardetto N., Coudé du Foresto V.* Cepheid distances from infrared long-baseline interferometry. II. Calibration of the period-radius and period-luminosity relations // *A&A*. — 2004. — August. — Vol. 423. — Pp. 327–333.
- [86] *Kolesnik Y. B.* Rigidity Estimation of the HIPPARCOS System in the Equatorial Zone by 20th Century Ground-Based Observations // *Highlights in Astronomy*. — 1998. — Vol. 11. — P. 553.

- [87] *Kopeikin S. M., Schäfer G.* Lorentz covariant theory of light propagation in gravitational fields of arbitrary-moving bodies // *Phys. Rev. D.* — 1999. — December. — Vol. 60, no. 12. — P. 124002.
- [88] *Kovalevsky J., Lindegren L., Froeschlè M.* GAIA and SIM missions // *Journées 1999 — systèmes de référence spatio-temporels. IX. Lohrmann-Kolloquium. Motion of celestial bodies, astrometry and astronomical reference frames, Dresden, 13-15 September 1999*, edited by M. Soffel and N. Capitaine. Lohrmann-Observatorium, Technische Universität Dresden; Observatoire de Paris, Département d'Astronomie Fondamentale, ISBN 2-901057-42-X, 2000, p. 119–130. — 2000. — Pp. 119–130.
- [89] *Kuimov K. V., Kuzmin A. V., Nesterov V. V.* Completion of the “Carte Du Ciel” astrophotographic catalogue project of the Sternberg Astronomical Institute // *Baltic Astronomy.* — 1997. — March. — Vol. 6. — P. 290.
- [90] *Kuzmin A., Bastian U., Hoeg E., Kuimov K., Röser S.* TYCHO Reference catalogue: Pilot Project Results // *ESA SP-402: Hipparcos – Venice '97.* — 1997. — Pp. 125–128.
- [91] *Kuzmin A., Høeg E., Bastian U., Fabricius C., Kuimov K., Lindegren L., Makarov V. V., Röser S.* Construction of the tycho reference catalogue // *A&AS.* — 1999. — may. — Vol. 136. — Pp. 491–508.
- [92] *Liebes S. J.* Gravitational Lenses // *Physical Review.* — 1964. — Vol. 133.
- [93] *Lindegren L., Perryman M. A., Bastian U., Dainty J. C., Hog E., van Leeuwen F., Kovalevsky J., Labeyrie A., Loiseau S., Mignard F., Noordam J. E., Le Poole R. S., Thejll P., Vakili F.* GAIA: global astrometric interferometer for astrophysics // *Proc. SPIE Vol. 2200*, p. 599-608, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, James B. Breckinridge; Ed. — 1994. — June. — Pp. 599–608.

- [94] *MacMillan D. S.* Quasar Apparent Proper Motion Observed by Geodetic VLBI Network – Future Directions in High Resolution Astronomy // The 10-th Anniversary of the VLBA ASP Conference Series. – Vol. 1. – 2003.
- [95] *Macri L. M.* Cepheids, Eclipsing Binaries and the Distance Scale: from the Galaxy to the Local Group // Resolved Stellar Populations / Ed. by D. Valls-Gabaud, M. Chavez; National Optical Astronomy Observatory. – 950 North Cherry Avenue, Tucson, AZ 85719, United States: 2005.
- [96] *Ma C., Arias E. F., Eubanks T. M., Fey A. L., Gontier A.-M., Jacobs C. S., Sovers O. J., Archinal B. A., Charlot P.* The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry // *AJ.* – 1998. – July. – Vol. 116. – Pp. 516–546.
- [97] *Miller D. W., Crawford S. L., Hyde T. T., Masters B. P., Crawley E. F., Blackwood G. H., Colavita M. M., Yu J. W., Shao M., Laskin R. A.* System-wide design issues for the stellar interferometer technology experiment (SITE) // Spaceborne Interferometry II, Proc. SPIE / Ed. by R. D. Reasenberg. – Vol. 2477. – 1995. – jun. – Pp. 267–275.
- [98] *Mozurkewich D.* Hybrid design for a six-way beam combiner // Proc. SPIE Vol. 2200, p. 76-80, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, James B. Breckinridge; Ed. – 1994. – June. – Pp. 76–80.
- [99] *Narayanan V. K., Gould A.* Correlated Errors in HIPPARCOS Parallaxes toward the Pleiades and the Hyades // *ApJ.* – 1999. – September. – Vol. 523. – Pp. 328–339.
- [100] *Nesterov V., Gulyaev A., Kuimov K., Kuzmin A., Sementsov V., Bastian U., Roser S.* Completion of the Sternberg Astronomical Institute Astrographic Catalogue Project // IAU Symp. 179: New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys. – 1998. – P. 409.

- [101] *Noecker M. C.* Systematic errors in high-precision optical interferometric astrometry // Proc. SPIE Vol. 2477, p. 188-208, Spaceborne Interferometry II, Robert D. Reasenberg; Ed. — 1995. — June. — Pp. 188–208.
- [102] *Noecker M. C., Phillips J. D., Babcock R. W., Reasenberg R. D.* Internal laser metrology for POINTS // Proc. SPIE Vol. 1947, p. 174-187, Spaceborne Interferometry, Robert D. Reasenberg; Ed. — 1993. — September. — Pp. 174–187.
- [103] *Paczynski B.* Gravitational microlensing by the galactic halo // ApJ. — 1986. — May. — Vol. 304. — Pp. 1–5.
- [104] *Patterson R. J., Majewski S. R., Kundu A., Kunkel W. E., Johnston K. V., Geisler D. P., Gieren W., Muñoz R.* The Grid Giant Star Survey for the SIM Astrometric Grid // *Bulletin of the American Astronomical Society*. — 1999. — December. — Vol. 31. — P. 1439.
- [105] *Perryman M. A. C.* Introduction and Guide to the Data. — Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 1997, Series: ESA SP Series vol no: 1200, ISBN: 9290923997 (set), 1997. — Vol. 1. — P. 542.
- [106] *Perryman M. A. C., ESA.* The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission. — Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 1997, Series: ESA SP Series vol no: 1200, ISBN: 9290923997 (set), 1997.
- [107] *Planet Quest.* http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/sim_index.html. — 2005.
- [108] *Quenelle R. C.* Verifying the laser accuracy specification. — Hewlett-Paccard J., v. 34, N4, p.8. — 1983.
- [109] *Reasenberg R. D., Babcock R. W., Murison M. A., Noecker M. C., Phillips J. D., Schumaker B. L., Ulvestad J. S.*

POINTS: an astrometric spacecraft with multifarious applications // Proc. SPIE Vol. 2200, p. 2-17, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, James B. Breckinridge; Ed. — 1994. — June. — Pp. 2–17.

- [110] *Reasenber R. D., Babcock R. W., Phillips J. D., Johnston K. J., Simon R. S.* Newcomb: a scientific interferometry mission at low cost // Proc. SPIE Vol. 2200, p. 18-26, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, James B. Breckinridge; Ed. — 1994. — June. — Pp. 18–26.
- [111] *Refsdal S.* The gravitational lens effect // MNRAS. — 1964. — Vol. 128. — P. 295.
- [112] *Robbe S., Sorrente B., Cassaing F., Rabbia Y., Rousset G., Dame L., Cruzalebes P., Schumacher G.* Active phase stabilization at the I2T: implementation of the ASSI table // Proc. SPIE Vol. 2200, p. 222-230, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, James B. Breckinridge; Ed. — 1994. — June. — Pp. 222–230.
- [113] *Salim S., Gould A.* Improved Astrometry and Photometry for the Luyten Catalog. II. Faint Stars and the Revised Catalog // ApJ. — 2003. — January. — Vol. 582. — Pp. 1011–1031.
- [114] *Samus N. N., Durlevich O. V., Goranskii V. P., Zharova A. V., Kazarovets E. V., Pastukhova E. N., Tsvetkova T. M., Kireeva N. N., Williams D. B., Hazen M. L.* Combined General Catalogue of Variable Stars (Samus+ 2004) // *VizieR Online Data Catalog*. — 2004. — November. — Vol. 2250.
- [115] *Sazhin M. V., Zharov V. E., Kalinina T. A.* Parallax distortion by the weak microlensing effect // MNRAS. — 2001. — May. — Vol. 323. — Pp. 952–964.
- [116] *Sazhin M. V., Zharov V. E., Volynkin A. V., Kalinina T. A.* Microarcsecond instability of the celestial reference frame // MNRAS. — 1998. — October. — Vol. 300. — Pp. 287–291.

- [117] *Sazhin M.* Quasi-Inertiality of the Celestial Reference Frame // *Gravitation and Cosmology*. — 2000. — Vol. 6.
- [118] *Schneider P., Ehlers J., Falco E. E.* Gravitational Lenses. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- [119] *SIM NL No24.* Space Interferometry Mission Newsletter Number 24. — 2002. — December 10.
- [120] *Smirnov M. A., Bagrov A. V., Mikisha A. M., Rykhlova L. V.* Space optical interferometers — a new step in astrometry // Joint European and Natoinal Astronome Meeting "JENAM-2000". 9th and 5th Euro-Asian Astronomical Society Conference. — Moscow: GEOS, 2000. — P. 173.
- [121] *Smirnov M. A., Boyarchuk A. A., Barabanov S. I., Bagrov A. V., Mikisha A. M., Rykhlova L. V., Tokovinin A. A.* OSIRIS — The Russian Space-born Astrometric Interferometer // Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space // Proc. of a Conf. held at Dana Point, CA, USA, May 24-27, 1999 / Ed. by S. Unwin, R. Stachnik. — Vol. 194 of *ASP Conf. Ser.* — 1999. — Pp. 376–380.
- [122] *Sovers O.J., Jacobs C. S.* Observation Model and Parameter Partial for the JPL VLBI Parameter Estimation Software "MODEST"-1996: Publication 83-39, rev. 6. — Pasadena, California: JPL, 1996. — aug.
- [123] *Suchkov A. A., Makarov V. V., Voges W.* ROSAT View of Hipparcos F Stars // *ApJ*. — 2003. — October. — Vol. 595. — Pp. 1206–1221.
- [124] *Ten Brummelaar T., Bagnuolo W. G.* CHARA beam combiner design // Proc. SPIE, Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II / Ed. by J. B. Breckinridge. — Vol. 2200. — 1994. — June. — Pp. 140–151.

- [125] The HIPPARCOS catalogue as a realisation of the extragalactic reference system / J. Kovalevsky, L. Lindgren, M. A. C. Perryman, P. D. Hemenway, K. J. Johnston, V. S. Kislyuk, J. F. Lestrade, L. V. Morrison, I. Platais, S. Röser, E. Schilbach, H.-J. Tucholke, C. de Veigt, J. Vondrak, F. Arias, A. M. Gontier, F. Arenou, P. Brosche, D. R. Florkowski, S. T. Garrington et al. // *A&A.* — 1997. — July. — Vol. 323. — Pp. 620–633.
- [126] The USNO-B Catalog / D. G. Monet, S. E. Levine, B. Canzian, H. D. Ables, A. R. Bird, C. C. Dahn, H. H. Guetter, H. C. Harris, A. A. Henden, S. K. Leggett, H. F. Levison, C. B. Luginbuhl, J. Martini, A. K. B. Monet, J. A. Munn, J. R. Pier, A. R. Rhodes, B. Riepe, S. Sell, R. C. Stone et al. // *AJ.* — 2003. — February. — Vol. 125. — Pp. 984–993.
- [127] *Tokovinin A.* MSC — a catalogue of physical multiple stars // *A&AS.* — 1997. — July. — Vol. 124. — Pp. 75–84.
- [128] *Tokovinin A.* Statistics of multiple stars // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series.* — 2004. — August. — Pp. 7–14.
- [129] *Udalski A., Szymanski M., Kaluzny J., Kubiak M., Mateo M., Krzeminski W.* The optical gravitational lensing experiment: The discovery of three further microlensing events in the direction of the galactic bulge // *ApJ.* — 1994. — May. — Vol. 426. — P. L69.
- [130] *Urban S. E., Corbin T. E., Wycoff G. L.* The ACT Reference Catalog // *AJ.* — 1998. — May. — Vol. 115. — Pp. 2161–2166.
- [131] *Veron-Cetty M. P., Veron P.* Quasars and Active Galactic Nuclei (11th Ed.) (Veron+, 2003) // *VizieR Online Data Catalog.* — 2003. — August. — Vol. 7235.

- [132] *Zacharias N., Urban S. E., Zacharias M. I., Wycoff G. L., Hall D. M., Monet D. G., Rafferty T. J.* The Second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2) // *AJ.* — 2004. — May. — Vol. 127. — Pp. 3043–3059.