

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

В.В.Витязев, И.С.Гусева, В.И.Кияев, М.П.Мищенко,
С.Д.Петров, О.А.Титов, А.С.Цветков

НЕБЕСНЫЕ И ЗЕМНЫЕ КООРДИНАТЫ

Учебное пособие по астрометрической практике



Санкт-Петербург
2011

ББК

Р е ц е н з е н т ы: д-р физ.-мат. наук, проф. К.В. Холшевников (С.-Петербург. гос. ун-т), канд. физ.-мат. наук, В.Л. Горшков (ГАО РАН).

*Печатается по решению Редакционно-издательского совета
математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного
университета*

Небесные и земные координаты: Учеб. пособие/ Витязев В.В., Гусева И.С., Кияев В.И., Мищенко М.П., Петров С.Д., Титов О.А., Цветков А.С. – СПб, Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2011. – 314 с.

ISBN 978-5-288-05067-1

В учебном пособии представлены описания и руководства для выполнения студентами самостоятельных практических работ по астрометрии. Содержание всех работ основано на общих и специальных курсах, читаемых на кафедре астрономии астрономического отделения математико-механического факультета. Структурно пособие разделено на две части: в первой представлены работы по определению времени и координат небесных и земных объектов на классических астрометрических инструментах, во второй - показаны современные способы определения времени и координат с использованием технологий ПЗС-астрометрии, GPS- и РСДБ-наблюдений. Последняя глава пособия посвящена работе с астрометрическим каталогом HIPPARCOS. Теоретические основы каждого метода подробно иллюстрируются практическими примерами обработки реальных наблюдений. Пособие предназначено для студентов, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников астрономических специальностей.

ББК 22.61

© Витязев В.В., Гусева И.С., Кияев В.И., Мищенко М.П.,
Петров С.Д., Титов О.А., Цветков А.С., 2011
© С.-Петербургский гос. университет, 2011

ISBN 978-5-288-05067-1

Памяти Александра Васильевича Ширяева и Марии Прокофьевны Миценко – организаторов и многолетних руководителей летней астрометрической практики в Ленинградском (Санкт-Петербургском) университете



Предисловие

Астрометрическая практика в Санкт-Петербургском (Ленинградском) государственном университете для студентов астрономического отделения математико-механического факультета существует с 1932 года. В этом же году в эту практику были включены студенты географического факультета. За несколько лет сложилась совокупность лабораторных и наблюдательных работ, которые выполняются студентами третьего курса в течение шестого семестра обучения. Наблюдательная практика проводится компактно в течение 30 дней после окончания сессии – с 15 июня по 15 июля. Большую часть необходимых теоретических знаний студенты получают из курсов сферической астрономии и общей астрометрии, а также из лекций, которые читаются студентам во время практики. В разные годы руководили и участвовали в проведении практики преподаватели кафедры А.В. Ширяев, М.П. Мищенко, В.В. Витязев, В.И. Кияев, С.Д. Петров. Техническую поддержку практики осуществляли сотрудники лаборатории астрометрии (Службы времени) Ю.А. Разживин, В.И. Левичева, Е.А. Шевцова, С.С. Беляева, В.А. Вытнов, Н.В. Павлов.

Многие годы наблюдения проводились на универсальных инструментах и на визуальном пассажном инструменте. Начиная с 90-х годов XX столетия лаборатория астрометрии стала оснащаться новой техникой. Большую работу по оснащению лаборатории компьютерной техникой провел А.С.Цветков. Расширился также и круг научных исследований, проводимых на кафедре астрономии и в лаборатории астрометрии.

В 1997 году на средства НИАИ СПбГУ была приобретена ПЗС камера, которая была установлена И.С.Гусевой на телескопе АКД в Пулковской обсерватории для проведения, в частности, студенческих работ. В 1998 году по инициативе О.А.Титова в лаборатории астрометрии Астрономического института СПбГУ был организован Центр анализа РСДБ-наблюдений, функционирующий в рамках Международной Службы РСДБ-наблюдений (IVS) и Международной службы вращения Земли (IERS). В 2006 году под руководством С.Д.Петрова в лаборатории астрометрии СПбГУ была введена в действие GPS/ГЛОНАСС станция, способ-

ная принимать сигналы спутников GPS и ГЛОНАСС. В учебный план кафедры были введены спецкурсы, спецсеминары и лабораторные практикумы по новым разделам астрометрии: радиоастрометрия, ПЗС-астрометрия, астрометрии ИСЗ, космическая астрометрия.

Оснащение лаборатории астрометрии новыми наблюдательными и программными средствами позволило расширить круг астрометрических задач, выносимых на практические занятия. К задачам классической астрометрии были добавлены задачи из современных разделов астрометрии. При этом наблюдательные работы практической астрономии, реализуемые с помощью универсалов, пассажного инструмента и GPS/ГЛОНАСС-приемника, выполняют все студенты астрономического отделения математико-механического факультета во время традиционной летней астрометрической практики. Работы, связанные с проведением и обработкой ПЗС-наблюдений, входят в программу летней астрофизической практики и полугодового лабораторного практикума студентов-астрометристов. Остальные задачи – обработка РСДБ-наблюдений и освоение практических приемов работы с каталогом HIPPARCOS – выполняются студентами, специализирующимися по астрометрии.

Заслуживает внимания вопрос о том, нужно ли в настоящее время обучать студентов методам классической астрометрии. Действительно, времена, когда методы Цингера, Талькотта, Певцова и т.п. служили большой науке, ушли в прошлое. Тем не менее, методическое содержание этих и других работ, включаемых в учебную наблюдательную практику, позволяет оптимальным образом показать студентам основные принципы астрометрии, так как в основе всех "астрометрий" лежит одна и та же методология. Она заключается в том, что в показание прибора (отсчет микроскопамикрометра меридианного круга, временная задержка радиointерферометра, псевдодальность в технологии GPS и т.п.) всегда вносятся поправки, которые тем или иным способом учитывают несовершенство инструментов и влияние окружающей среды на показание прибора (ошибки деления кругов, рефракция, рассогласование часов на пунктах РСДБ, "сухая" и "влажная" компонента тропосферной задержки). Отметим также общность

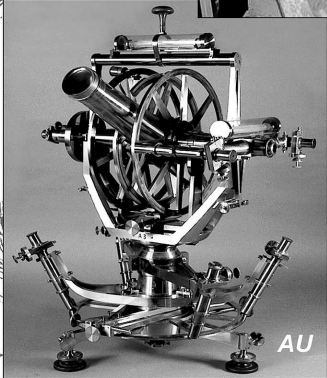
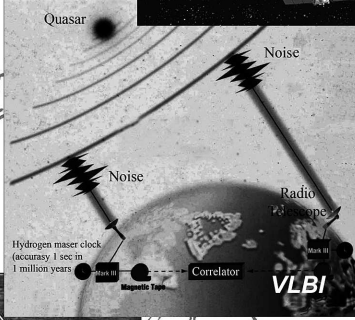
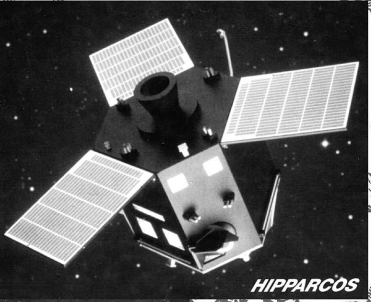
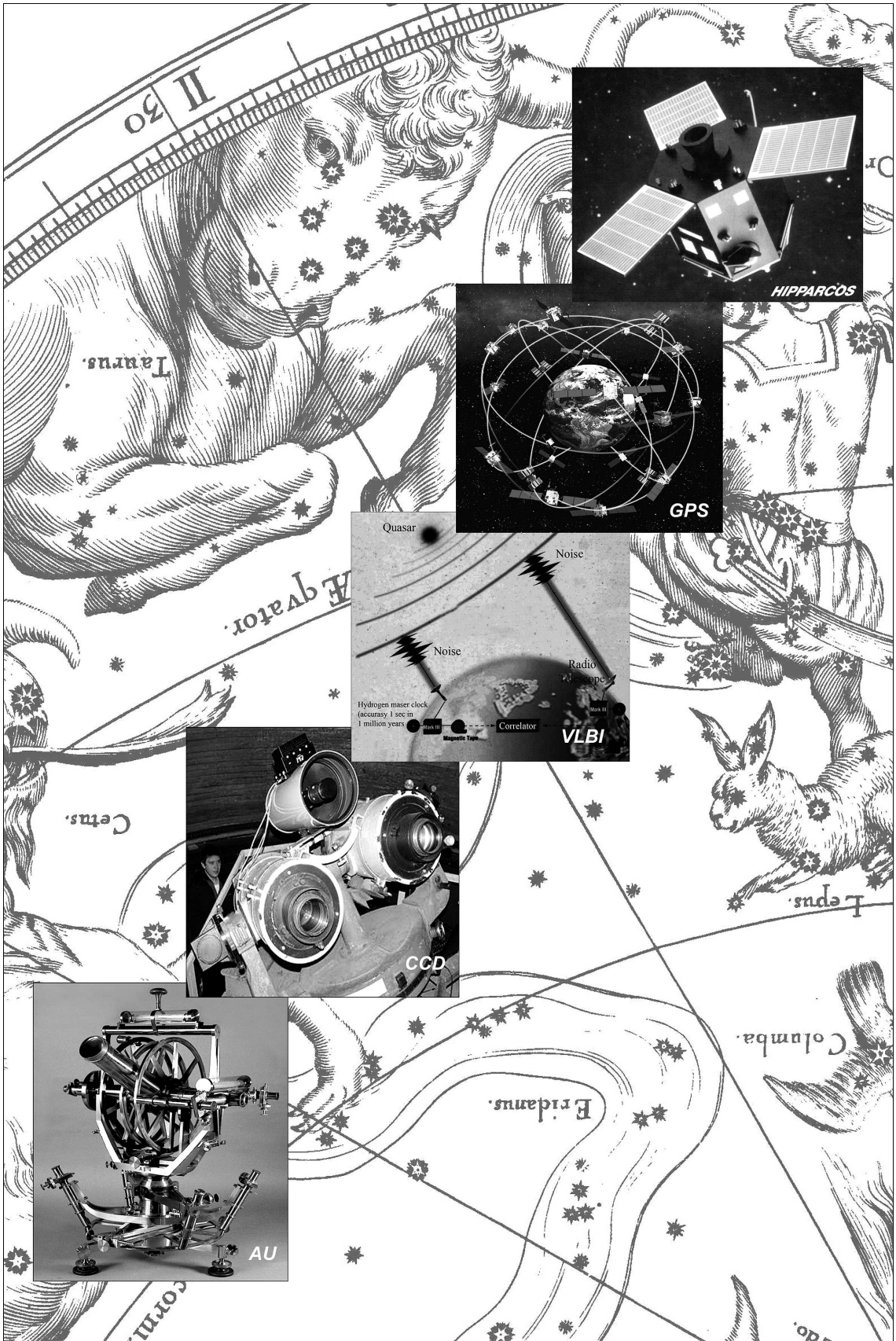
классических и новых разделов астрометрии. Например, базовые геометрические соотношения, связывающие измеряемые величины с искомыми координатами небесных объектов, и в классической астрометрии, и в РСДБ следуют из одной и той же формулы сферической тригонометрии – формулы Аль-Батани. Инструменты космической астрометрии HIPPARCOS и GAIA основаны на принципе пассажного инструмента, а методы фотоэлектрической (HIPPARCOS) и ПЗС-регистрации (GAIA) были первоначально разработаны в наземной оптической астрометрии.

Однако технологии современных разделов астрометрии (РСДБ, GPS, измерения в космосе) очень громоздки, что не дает возможности сделать их во всей своей полноте предметом традиционного университетского лабораторного практикума. Наоборот, методы практической астрономии достаточно просты и, как показывает большой опыт, могут с успехом использоваться для обучения основам астрометрии уже на младших курсах. Все это существенно облегчает дальнейшее изучение астрометрии на старших курсах в рамках специальных курсов и практикумов.

Эта идея преемственности разделов астрометрии и является основой предлагаемого учебного пособия. Хочется выразить надежду, что оно окажется полезным будущим поколениям студентов. А те люди, которые в разные годы уже прошли через летнюю астрометрическую практику, наверняка, с интересом и, возможно, с грустью полистают эту книгу, вспоминая свои первые шаги приобщения к наблюдательной астрономии.

Концепция книги предложена проф. В.В.Витязевым, им же выполнена редакция текста книги и её научного содержания. Главы 1,2 и 8 написаны В.И.Кияевым и М.П.Мищенко, главы 3, 4, 5, 6, 7 – В.В.Витязевым, глава 9 – С.Д.Петровым, глава 10 – И.С.Гусевой, глава 11 – О.А.Титовым и глава 12 – А.С.Цветковым.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам лаборатории астрометрии Д.А.Трофимову, С.А.Фетисову, С.С.Смирнову, В.И.Левичевой за участие в огромной технической работе по подготовке книги к изданию.



Оглавление

1	Астрономический универсальный инструмент	15
1.1	Астрономический универсал	16
1.2	Устройство универсала	16
1.2.1	Общее устройство инструмента	16
1.2.2	Устройство трубы универсала	18
1.3	Угломерные системы инструмента	20
1.3.1	Разделенные круги	20
1.3.2	Микроскоп-микрометр	22
1.3.3	Окулярный микрометр	26
1.3.4	Устройство уровня	27
1.4	Подготовка инструмента к наблюдениям	32
1.4.1	Регулировка универсала	32
1.4.2	Фокусировка трубы	36
1.4.3	Установка инструмента в меридиане	37
1.4.4	Проверка горизонтальности нитей	38
2	Аппаратура точного времени и частоты	41
2.1	Частотно-временная аппаратура	42
2.2	Определение поправки часов	44
3	Определение широты	47
3.1	Идея метода	48
3.2	Редукция зенитного расстояния на меридиан	49
3.3	Место зенита на вертикальном круге	52
3.4	Исправление зенитного расстояния за рефракцию	53
3.5	Гнутие трубы	54
3.6	Эфемериды Полярной и "южной" звезды	54
3.7	Вычисление видимых мест	56
3.8	Методика наблюдений	61

3.9	Журнал наблюдений	62
3.10	Журнал наблюдений	63
3.11	Обработка журнала наблюдений	64
3.11.1	Широта по Полярной звезде. Видимые места	67
3.11.2	Широта по Полярной звезде. Рефракция, вспомогательные величины	68
3.11.3	Широта по "южной" звезде. Видимые места	70
3.11.4	Широта по "южной" звезде. Рефракция, вспо- могательные величины	71
4	Определение азимута земного предмета	73
4.1	Азимут и место юга на круге	74
4.2	Определение азимута и зенитного расстояния светил	76
4.3	Наилучшие условия наблюдений	77
4.4	Поправки отсчётов горизонтального круга	78
4.4.1	Поправка за ошибку коллимации	79
4.4.2	Поправка за наклонность горизонтальной оси	80
4.4.3	Поправка за окулярный микрометр	82
4.5	Влияние суточной аберрации	84
4.6	Вычисление азимута предмета и места юга	85
4.7	Инструкция по наблюдению Полярной звезды	88
4.8	Обработка журнала наблюдений	93
4.9	Инструкция по наблюдениям Солнца	96
4.10	Обработка журнала наблюдений	100
4.11	Видимые координаты центра Солнца	100
4.12	Общая схема вычисления азимута по Солнцу	104
5	Определение поправки часов и долготы места наблюдения по методу Цингера	107
5.1	Общий принцип определения долготы	108
5.2	Принцип равных высот	108
5.3	Наилучшие условия наблюдений	109
5.4	Вычисление поправки часов	112
5.5	Суточная аберрация и изменение наклона трубы	113
5.5.1	Поправка за суточную аберрацию	114
5.5.2	Поправка за изменение наклона трубы	116
5.6	Вычисление долготы	119

5.7	Наблюдение звёзд пар Цингера	119
5.7.1	Инструкция для наблюдений звёзд пар Цингера	120
5.7.2	Обработка журнала наблюдений	121
6	Определение широты места наблюдения методом Певцова	127
6.1	Идея метода	128
6.2	Вычисление широты	130
6.3	Порядок наблюдения пар Певцова	134
6.4	Обработка результатов наблюдений	137
7	Определение широты пункта методом Талькотта	141
7.1	Описание метода	142
7.2	Рабочие формулы	143
7.3	Вычисление видимых мест	147
7.4	Инструкция по наблюдению пар Талькотта	150
7.5	Обработка журнала наблюдений	151
8	Определение разности шкал времени $UT_0 - UTC$ с помощью наблюдений на пассажном инструменте	155
8.1	Пассажный инструмент	156
8.2	Определение поправки часов с помощью пассажного инструмента	160
8.3	Каталог служб времени СССР	161
8.4	Метод Н.Н.Павлова вычисления поправки часов	162
8.5	Устройство для регистрации прохождений звёзд через меридиан	165
8.6	Установка пассажного инструмента в меридиан	168
8.7	Наблюдения прохождений звёзд и их обработка	168
9	Определение координат пунктов и времени методом GPS	173
9.1	Введение	174
9.2	Краткие сведения о GPS	175
9.3	Геодинамическая станция СПбГУ	178
9.4	RINEX-формат данных для хранения GPS-измерений	178
9.5	Определение координат спутника по бортовым эфемерисам	181

9.6	Определение координат места и поправки часов приемника	184
9.7	Пример вычисления координат и времени по GPS-измерениям	188
9.8	Приложения	195
10	ПЗС-астрометрия	201
10.1	Введение	202
10.1.1	Краткая история ПЗС	202
10.1.2	Современные задачи ПЗС-астрометрии	205
10.2	ПЗС как устройство для регистрации изображений	207
10.2.1	Принцип работы ПЗС	207
10.2.2	Основные параметры и характеристики ПЗС-матриц	210
10.3	Наблюдения и первичная обработка снимков	212
10.3.1	Инструменты	212
10.3.2	Особенности работы с ПЗС-изображениями	216
10.3.3	Методика наблюдений	221
10.3.4	Предварительная обработка снимков	223
10.3.5	Определение прямоугольных координат и блеска объектов на матрице	225
10.4	Астрометрическая редукция ПЗС-наблюдений	229
10.4.1	Определение экваториальных координат объектов	229
10.4.2	Астрометрия звезд	233
10.4.3	Астрометрия движущихся объектов	242
11	Получение параметров ориентации Земли из РСДБ наблюдений	247
11.1	Метод РСДБ	248
11.2	Международная служба РСДБ (IVS)	250
11.3	Измеряемые величины	252
11.4	Модель задержки	254
11.5	Методы получения оценок астрономических и геодезических параметров	257
11.6	Необходимое программное обеспечение. Форматы данных. Возможности пакета ОССАМ	259

11.7	Инструкция обработки сеанса наблюдений	261
11.7.1	Загрузка данных	261
11.7.2	NGS файлы, дополнительные файлы, проблемы с дополнительной секундой	263
11.7.3	Подготовка файлов input.txt	265
11.7.4	Подготовка файла bat	265
11.7.5	Обработка	266
11.7.6	Диагноз ошибок, коррекция kvlibi.opt, breaks.res	267
11.7.7	Файлы - SESS.DAT и SPU0000N.EOPS replace NEOS to R1, R4	267
11.7.8	Отправка результатов	269
11.8	Получение ПОЗ из обработки РСДБ-сессии за 5 января 2009 года	269
11.8.1	Получение данных	269
11.8.2	Подготовка данных	270
11.8.3	Обработка данных	272
12	Работа с каталогом Hipparcos	275
12.1	Общие сведения о проекте Hipparcos	276
12.1.1	Система каталогов Hipparcos и Tycho	277
12.1.2	Входной каталог	280
12.1.3	Обозначения и размерности астрометрических параметров	280
12.1.4	Вариационно-ковариационные данные и корреляции	283
12.1.5	Преобразование астрометрических данных	284
12.1.6	Фотометрические системы каталогов Tycho и Hipparcos	287
12.2	Работа с ASCII версией каталога Hipparcos	288
12.2.1	Программы чтения каталога	289
12.2.2	Программа отбора звезд	296
12.2.3	Программа распределения звезд каталога Hipparcos на небесной сфере	297
12.2.4	Построение диаграммы Герцшпрунга–Рессела	305
12.3	Упражнения к главе	310

Глава 1

Астрономический универсальный инструмент



1.1 Астрономический универсал

Классические современные астрометрические инструменты ¹ – это большей частью стационарные специализированные инструменты, установленные в крупных обсерваториях и предназначенные для решения задач фундаментальной астрометрии по определению высокоточных абсолютных и относительных координат звезд, их собственных движений и параллаксов. Однако для решения прикладных задач точного картографирования территории и привязки точек её поверхности к принятой модели геоида сформировалась обширная область астрономо-геодезических определений, основой которой служили массовые наблюдения, проводимые в полевых условиях. Для таких наблюдений необходимы были астрономические инструменты, которые совмещали бы в себе функциональные возможности большинства классических инструментов. Такие инструменты были созданы и получили название универсальных астрономических инструментов, сокращенно – астрономический универсал (АУ).

1.2 Устройство универсала

1.2.1 Общее устройство инструмента

Астрономический универсал – основной угломерный инструмент, позволяющий в любой точке земной поверхности измерять горизонтальные координаты светила, географические координаты места наблюдения и поправку рабочих часов (рис. 1.1). Инструмент состоит из ломаной астрономической трубы, имеющей возможность поворачиваться вокруг двух взаимноперпендикулярных осей – горизонтальной и вертикальной, горизонтального и вертикального разделённых кругов, отсчетных приспособлений и системы уровней. Установка осей в плоскости физического горизонта (уровенной поверхности – геоида) и в вертикальной плоскости (отвесная линия) производится с помощью системы уровней и регулировочных винтов.

¹При написании этой главы использовались цитирования текстов из книг [3], [15].

Углы поворота трубы около той и другой оси отсчитываются по двум кругам – вертикальному и горизонтальному. Вертикальный круг соединен с горизонтальной осью и служит для отсчётов углов в вертикальной плоскости; горизонтальный круг соединен с вертикальной осью и по нему отсчитываются углы в горизонтальной плоскости. С нижней частью инструмента, укрепленной на трехлучевом основании с тремя винтами, служащими для регулирования, скреплен горизонтальный разделённый круг (1), предназначенный для измерения горизонтальных углов. Верхняя часть инструмента вращается вокруг вертикальной оси и несёт алидаду (2) горизонтального круга с отсчётными приспособлениями, а также вилку (3) с лагерами, в которых на своих цапфах лежит горизонтальная ось инструмента. На этой оси, перпендикулярно к ней укреплена астрономическая труба (4), служащая для визирования объекта наблюдения.

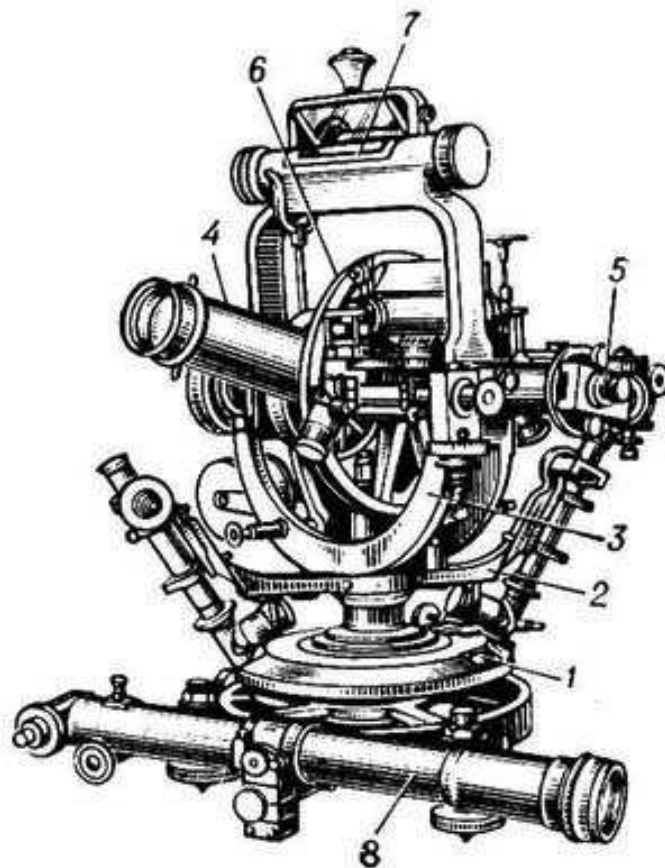


Рис. 1.1: Универсальный инструмент

В случае ломаной конструкции трубы (см. рис. 1.1), линия визирования с помощью призмы направляется вдоль полой горизонтальной оси, на одном конце которой находится коробка окулярного микрометра (5) с сеткой нитей, а на другом – осветитель для освещения поля зрения при ночных наблюдениях. АУ имеет приспособления для "тонких" микрометрических поворотов трубы вокруг обеих осей, что необходимо при точном наведении её на наблюдаемый объект.

На горизонтальную ось надет вертикальный разделённый круг (6), алидада которого снабжена уровнем, служащим для контроля положения алидады при измерении зенитных расстояний или высот. Наклон горизонтальной оси определяется с помощью специального накладного уровня (7). Для контроля за устойчивостью по азимуту точные АУ снабжаются поверительной трубой (8) с микрометром, скрепляемой с нижней частью и наводимой при азимутальных и триангуляционных измерениях на удалённую неподвижную марку (миру).

1.2.2 Устройство трубы универсала

Для переносных астрономических инструментов чаще всего используются конструкция "ломаной" трубы. Инструменты с прямой трубой, применявшиеся в XIX веке, были неудобны для наблюдений звезд на малых зенитных расстояниях. Применение ломаных труб в переносных астрономических инструментах позволяет наблюдать светила на любых доступных зенитных расстояниях. На рис. 1.2 изображена верхняя часть инструмента со схемой устройства ломаной астрономической трубы.

Труба состоит из объективного колена и полой горизонтальной оси, на одном конце которой укреплен тубус окулярного микрометра (11), на другом – уравнивающий противовес оси (10) и система подсветки поля зрения трубы. Объектив (1), состоящий из двух линз, собран в оправе (2) и навинчен на объективное колено. Объективное колено, несущее преломляющую призму (3), прочно скреплено винтами со стенкой куба горизонтальной оси. На противоположной стенке куба укреплен противовес объективной части трубы (4). Окулярное колено горизонтальной оси за-

канчивается отверстием, в которое входит тубус (6) окулярного микрометра (11). Окулярный микрометр закрепляется в теле горизонтальной оси с помощью винта (7) и пружины (8), а также стопорных винтов направляющей планки.

В фокальной плоскости объектива установлена сетка нитей. Поле зрения трубы освещается электрической лампочкой, укрепляемой на кронштейне перед отверстием (10) лампового конца горизонтальной оси. Свет от лампочки падает на маленькую призму (5), приклеенную к призме (3), и освещает поле зрения трубы. На горизонтальной оси крепится также оправа с одним или двумя талькоттовскими уровнями, которые во время наблюдений по способу Талькотта жёстко прикрепляются к оси винтом (12).

Отметим, что наличие в ломаной трубе прямоугольной преломляющей призмы облегчает производство астрономических наблю-

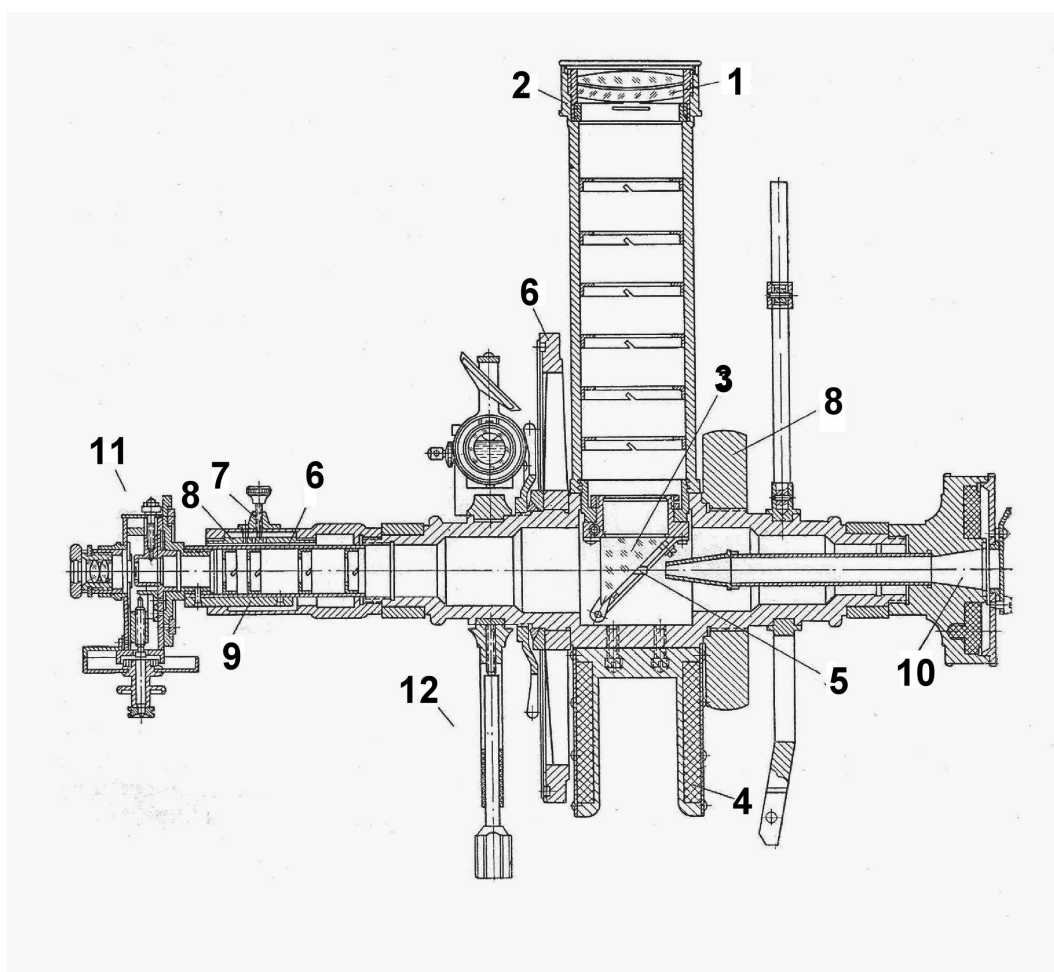


Рис. 1.2: Труба астрономического универсала

дений, но вместе с тем может быть источником дополнительных ошибок. Оправа призмы изготавливается из материала, линейный коэффициент расширения которого отличен от линейного коэффициента расширения стекла призмы, и при колебаниях температуры по этой причине в призме возникают дополнительные напряжения, вызывающие искажение изображений. Перемещения и деформации призмы являются одной из основных причин изменения коллимационной ошибки трубы. При измерении горизонтальных углов инструментом с ломаной трубой для достижения высокой точности результатов измерений необходимо, чтобы изменения коллимационной ошибки трубы были минимальные.

1.3 Угломерные системы инструмента

Универсальный инструмент снабжён системой угломерных отсчётных устройств, позволяющих: регулировать и нивелировать инструмент при установке его на опору; производить необходимые отсчёты во время астрономических наблюдений; контролировать поведение инструмента в течение наблюдений. Система отсчётных устройств включает два точно разделённых круга (горизонтальный и вертикальный), четыре микроскопа-микрометра, окулярный микрометр и совокупность уровней (накладной, алидадный и талькоттовский).

1.3.1 Разделенные круги

Горизонтальный и вертикальный отсчётные круги установлены соответственно на вертикальной и горизонтальной осях инструмента и имеют на своей поверхности круговую полосу – лимб, на котором нанесена точная равномерная последовательность штрихов. Лимбы чаще всего изготавливаются из сплава (90% серебра и 10% меди) и завальцовываются в латунное основание круга. Угловое расстояние между соседними штрихами (цена деления) зависит от требуемой точности инструмента и от точности отсчётных устройств. Лимбы делятся штрихами на градусы, а каждый градус – на 2, 3, 6 или 12 частей, т.е. между двумя соседними штрихами содержится 30', 20', 10' или 5'. Обычно 10-

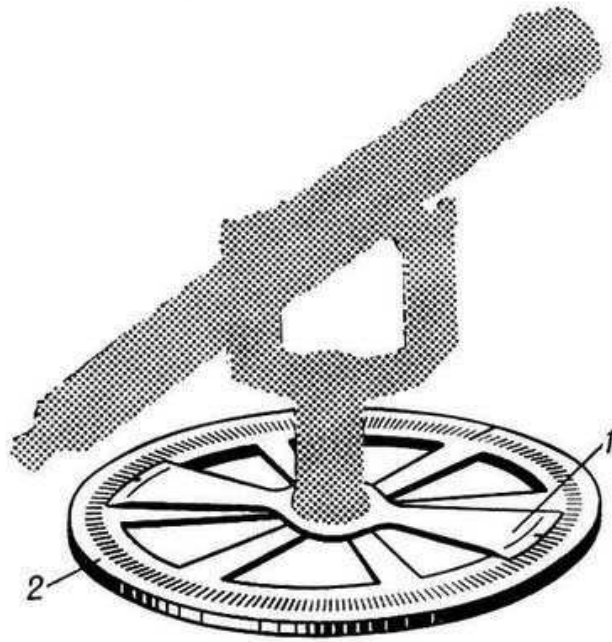


Рис. 1.3: Горизонтальный круг астрономического универсала

градусные, а иногда и 5-градусные штрихи оцифровываются. Отсчеты каждого лимба (2) производятся с помощью концентрического с ним круга, или части круга (1), на котором наносится нулевой штрих (указатель) для отсчета целых делений лимба (рис.1.3). Оцифровывание штрихов чаще всего сплошное – от 0° до 360° , по часовой стрелке, если смотреть на круг с его лицевой стороны. Для удобства считывания штрихов различной "цены" они делаются разной длины.

Отсчёты производятся сквозь лупу, а иногда через специальный микроскоп, содержащий коробку с отсчётным нитяным устройством (микроскопом-микрометром), так как деления кругов очень мелкие.

Если центр лимба не совпадает с центром оси вращения, то отсчет по одному микроскопу-микрометру будет ошибочен. Эта ошибка в отсчете называется ошибкой эксцентриситета. Она исключается при отсчётах лимба в двух диаметрально противоположных точках круга, из которых берется среднее арифметическое. Поэтому все угломерные инструменты имеют по два отсчетных устройства для каждого лимба. Точность разделенного круга определяется погрешностью взаимного расположения штрихов,

зависящей от точности делительной машины, с помощью которой делили круг. Установочные круги, которые служат для предварительного наведения визирной линии на объект и которые можно считать невооруженным глазом, имеют допустимые погрешности до $5'$. Точные круги, отсчитываемые с помощью верньеров или микроскопов-микрометров, имеют допустимые погрешности положения штрихов от $3''$ до $8''$, высокоточные круги – от $0.5''$ до $2.5''$.

1.3.2 Микроскоп-микрометр

В высокоточных инструментах микроскопы снабжаются специальной коробкой с микрометрическим устройством, содержащим дополнительную отсчётную шкалу и подвижную нить, которые позволяют отсчитывать углы с точностью до десятых долей секунды дуги. Схема микроскопа с микрометрической коробкой (микроскопа-микрометра) представлена на рис. 1.4. Объектив микроскопа (1) строит изображение лимба круга (3) в фокальной плоскости (4). Изображение рассматривается через окуляр (5). Лучи, идущие от объектива, отклоняются призмой (6) под углом в 45° к оси инструмента. Это сделано для удобства наблюдений. Иногда применяются микроскопы с прямым ходом лучей, но тогда лимбы делаются не плоскими, а коническими, и микроскопы устанавливаются под углом к оси инструмента. В фокальной плоскости (4) размещается сетка микрометра (7), натянутая на рамочке (8) из паутинных нитей или нарезанная на стеклянной пластине. Микроскоп крепится в оправе (9), которая привинчивается к корпусу инструмента.

Устройство самого микрометра показано на рис.1.5,а. Вид его поля зрения – на рис.1.5,б. В том месте, где от объектива микроскопа получается увеличенное изображение части круга, помещается коробочка КК, в которой на направляющих движется рамочка РР с паутинными нитями. Рамочку можно медленно перемещать очень точно нарезанным винтом; обычно с одной из сторон рамочки соединена гайка, в которую входит винт, конец же его упирается в подпятник N'; пружина или каждая из двух спиральных пружин одним своим концом соединена с коробоч-

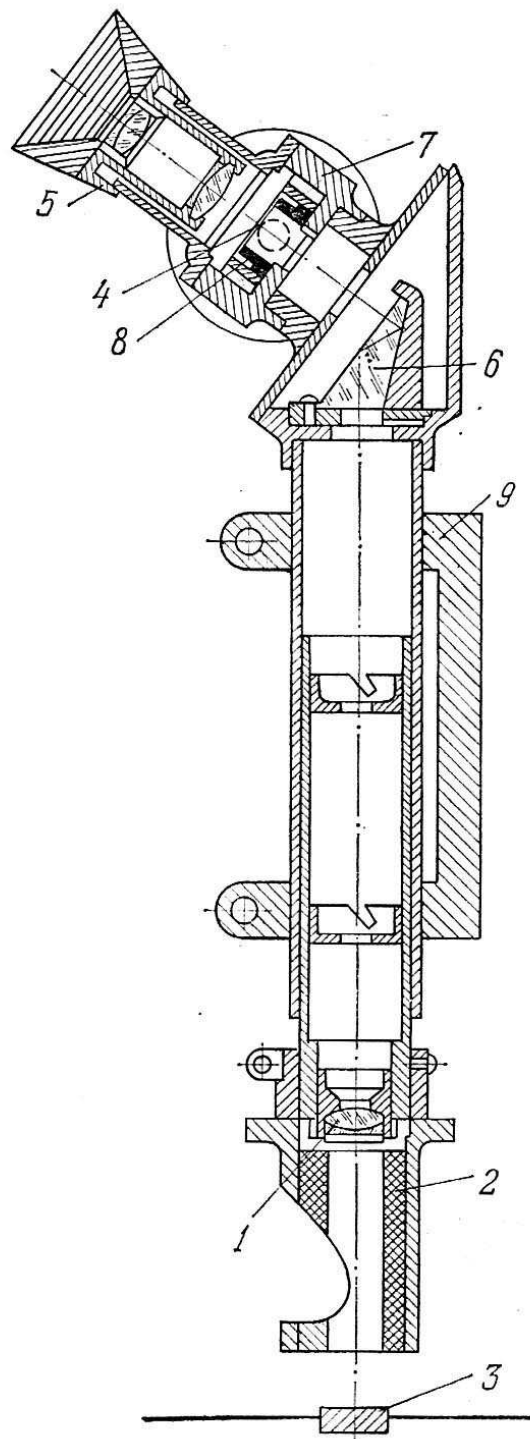


Рис. 1.4: Микроскоп-микrometer

кой КК, а другим – с рамочкой РР. Эти пружины, действуя на сжатие, прижимают конец винта к его упору.

На другом конце винта, свободно выходящем наружу из ко-

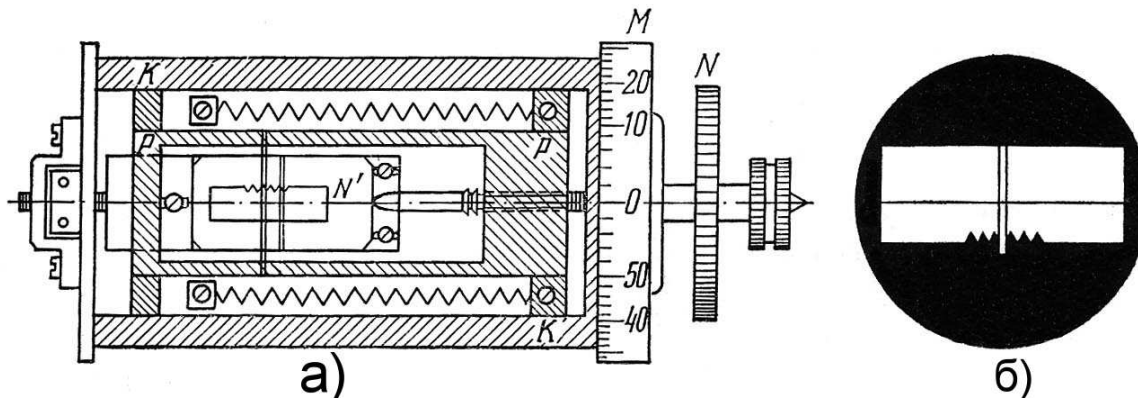


Рис. 1.5: Схема устройства коробки микроскоп-микromетра

робочки, помещается цилиндр М (так называемый "отсчётный барабан"), на котором нанесены деления для отсчётов кругов. Число делений обыкновенно кратно 60, к коробочке прикреплен указатель, по которому производится отсчет деления барабана до десятой доли деления на глаз. Внутри коробочки находится в плоскости движения нитей гребеночка, причем расстояние между зубчиками ее равно одному шагу винта, т. е. перемещению рамочки с нитями при повороте винта ровно на один оборот.

У барабана на самом конце винта находится головка N для вращения винта. Вблизи объектива (1), между ним и лимбом круга (рис.1.4), помещается "иллюминатор" (2), или осветитель; обычно он имеет форму белой пластинки с отверстием перед самым объективом. Дневной свет, а ночью свет лампочки освещает эту пластинку; она рассеивает свет и таким образом освещает часть лимба (3) под микроскопом. Нити натягивают на рамочку PP следующим образом: две нити перпендикулярно к оси винта, близко одна к другой, так что образуется парная или двойная нить (биссектор), и третью – перпендикулярно к ним, т. е. параллельно винту. Когда отсчет на барабане есть 0.0 (индекс барабана "стоит" на нуле), то двойная нить находится во впадине между зубцами гребенки. Между двумя центральными зубцами гребенки есть прорезь (рис. 1.5,б).

Будем называть начальным или нулевым такое положение двойной нити, при котором отсчет барабана есть точно 0.0, а нить проходит точно через прорезь. Совершенно не важно, если при этом

двойная нить не в точности проходит через прорезь – она служит только для отметки начального нулевого оборота винта, при этом обороте отсчет на барабане должен быть 0,0. Такое вращение винта, при котором он ввинчивается в свою гайку, называется положительным вращением; при положительном вращении винта нити движутся к барабану, пружина внутри коробки должна в таком случае растягиваться. Обычно при положительном вращении винта деления барабана, проходящие мимо его указателя, возрастают.

Опыт показывает, что отсчёт на барабане при наведении двойной нити на штрих может быть различным, смотря по тому, было ли последнее движение ввинчиванием винта или его вывинчиванием – это различие называется мертвым ходом винта. Для однообразия и ввиду большей определенности, чтобы не было ошибки из-за мертвого хода, наведение двойной нити (биссектора) на отсчётный штрих круга должно производиться всякий раз или только на ввинчивании, или только на вывинчивании винта микрометра. Винт микрометра должен быть по возможности максимально точным. Однако в настоящее время техника изготовления и монтировки микрометрических винтов ещё не настолько совершенна, что ошибками винтов можно было бы пренебрегать – поэтому ошибки винтов исследуются и учитываются при обработке высокоточных наблюдений.

Микроскоп с микрометром описанного устройства помещается над разделенным кругом таким образом, чтобы:

- изображение части круга находилось точно в той плоскости, где находятся нити, с тем чтобы через окуляр одновременно были резко видны и нити, и штрихи круга без параллакса;
- двойная нить была параллельна штрихам круга, так что при установке штриха посередине между нитями весь штрих находился бы точно посередине между обеими нитями; неподвижная нить микрометра, перпендикулярная к двойной, пересекала штрихи круга по их середине;
- при таком вращении винта, когда мимо указателя проходят возрастающие деления, нить двигалась от старших к младшим штрихам в изображении круга в микроскопе;

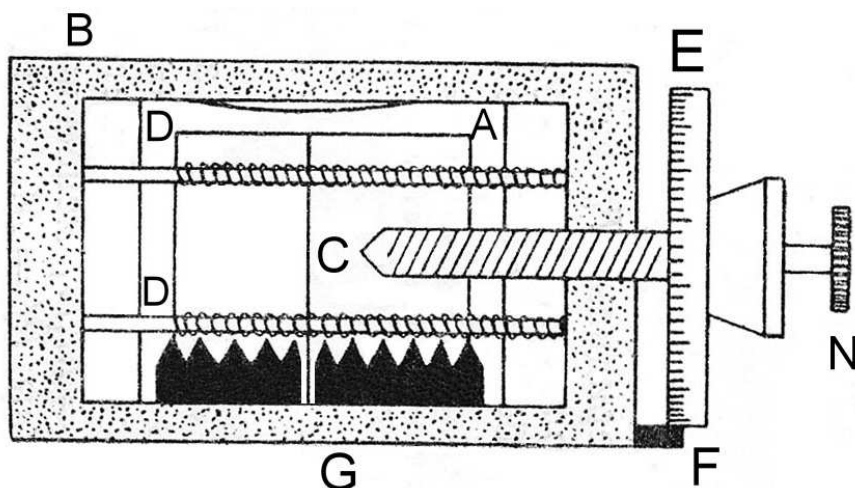


Рис. 1.6: Схема устройства окулярного микрометра

- расстояние между соседними штрихами круга равнялось целому числу оборотов винта.

Почему речь идёт об использовании двойной нити вместо одинарной? Практика показала, что установка двойной нити (биссектора) на штрих круга со штрихом посередине между нитями делается точнее, чем установка одиночной нити на середину толщины штриха – поэтому во всех микрометрах для отсчета кругов применяется двойная нить. Обе нити должны быть натянуты так, чтобы в то время, когда штрих круга находится между ними, по обе стороны его оставались узкие просветы; при правильном наведении на штрих эти просветы должны быть равны между собой.

1.3.3 Окулярный микрометр

Окуляр универсального инструмента снабжается микрометром, предназначенным для точного измерения малых углов.

Окулярный микрометр (рис.1.6) устроен таким образом, что внутри рамки В, скрепленной с окулярной частью трубы, помещается подвижная рамка А, на которой натянута нить. Рамка А с помощью микрометрического винта С может перемещаться относительно рамки В. Для плавного перемещения рамки А и для устранения мертвого хода винта служат спиральные пружины D, оттягивающие рамку А.

На головке микрометричного винта укреплен барабан с делениями E. При помощи указателя F можно делать отсчет на барабане. Обычно барабан разделяется на 100 частей. При повороте барабана на 360° подвижная нить перемещается на один зубец гребенки G, неподвижно связанной с рамкой B. При совмещении подвижной нити со впадиной в гребенке отсчет на барабане должен быть нуль.

Если подвижная нить горизонтальна, то можно измерить зенитное расстояние звезды, наводя последовательно подвижную нить на изображение звезды и делая при этом отсчет делений барабана и зубцов гребенки; при этом полученный отсчёт будет выражен в делениях барабана. Чтобы получить его в минутах и секундах дуги, необходимо знать цену оборота микрометра.

Окулярный микрометр монтируется на горизонтальную ось таким образом, чтобы его можно было повернуть на 90° . Тогда подвижная нить будет вертикальна нитям, и микрометр может быть использован для определения азимутов. Обычно цену оборота окулярного микрометра определяют по наблюдениям зенитных звёзд. Устанавливают инструмент по возможности точно в меридиане. Подвижную нить, параллельную вертикальной неподвижной нити, загоняют на край гребенки, двигая ее навстречу звезде. Выбирают звезду со склонением от 65° до 80° . Отмечают по хронометру момент прохождения через подвижную нить. После этого передвигают подвижную нить в направлении движения звезды, повернув барабан на $1/2$ оборота или целый оборот. При новом положении нити отмечают момент прохождения через нее той же звезды. Эта операция продолжается до тех пор, пока подвижная нить не дойдет до противоположного края гребенки. Зная склонение звезды и имея соответствующие отсчёты хронометра, можно точно вычислить цену одного оборота винта в секундах времени и, умножив это значение на 15, получить её в секундах дуги.

1.3.4 Устройство уровня

Пусть мы имеем хорошо отрегулированный универсальный инструмент с взаимно перпендикулярными осями, с визирной ли-

нией, перпендикулярной к горизонтальной оси, с кругами, точно разделенными и перпендикулярными к осям. При подготовке такого инструмента к наблюдениям нужно еще уметь установить вертикальную ось нашего инструмента действительно вертикально и контролировать положение осей в течение наблюдений. Кроме того, мы должны контролировать положение алидады микроскопов-микрометров при отсчётах вертикального круга и положение визирной линии при наблюдении звёзд на круге равных высот. Для этих целей служит специальный высокоточный прибор – уровень.

Уровень состоит из стеклянной трубки – ампулы, снаружи приблизительно цилиндрической, а внутренняя поверхность которой представляет в идеальном случае поверхность вращения, образованную дугой круга очень большого радиуса (десятки метров) (рис. 1.7).

Трубка заполнена жидким серным эфиром и запаена с обоих концов, но так, что внутри имеется небольшое пространство, заполненное только парами эфира; это пространство называется

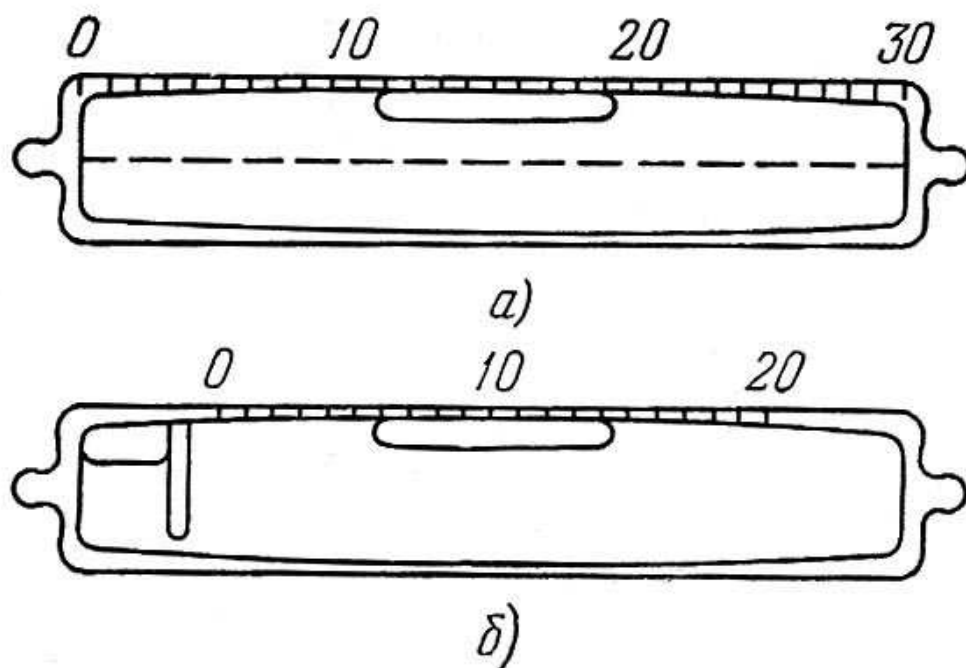


Рис. 1.7: Схема устройства уровня

пузырьком уровня. Снаружи на трубке нанесены деления, обыкновенно через 2 мм. Они оцифрованы, как правило, так, что нуль находится на одном конце, а в середине шкалы стоит какое-либо круглое число: 10, 15, 20 и т. п. Иногда нуль стоит в середине шкалы.

Основное свойство уровня заключается в том, что он очень чувствителен к изменению наклона его оси к горизонту. При малейшем изменении этого наклона пузырек перемещается вдоль делений более или менее быстро – в зависимости от величины радиуса дуги внутреннего продольного сечения уровня. Вследствие действия силы тяжести каждая капля эфира стремится быть как можно ниже, и поэтому середина пузырька при спокойном состоянии жидкости всегда занимает самое высокое место внутри трубки. Если уровень, установленный на горизонтальную ось инструмента, хорошо отрегулирован и горизонтальная ось горизонтальна, то нуль-пункт шкалы уровня совпадает с серединой пузырька уровня. Горизонтальная линия, проведённая касательно к кривой меридионального сечения ампулы в точке середины пузырька уровня, называется осью уровня.

Исходя из этого, важно уяснить следующие свойства уровня:

1. Пузырек не сходит с места, если уровень вращается вокруг отвесной линии или он перемещается поступательно, т. е. так, что каждая прямая линия в нем остается параллельной своему начальному направлению.
2. Пузырек не передвигается вдоль делений, а только перемещается перпендикулярно к оси, если уровень вращается вокруг горизонтальной оси. В этих двух случаях при движении уровня не происходит изменения наклона его оси к горизонту. При всех других вращениях и движениях этот наклон изменяется, и сообразно с этим изменяется и положение верхней точки внутри уровня, а пузырек перемещается вдоль делений.

Когда ось уровня горизонтальна, то середина пузырька уровня стоит приблизительно, но не обязательно точно, на среднем делении. Положение пузырька на трубке определяется отсчётами на шкале концов пузырька. Например, на рис. 1.7-а) отсчёты уровня суть 11,5-19,4 по концам пузырька. Отсчёты производят-

ся с точностью до десятых долей деления; смотреть на каждый конец пузырька нужно перпендикулярно к оси уровня во избежание влияния параллакса. Такие отсчёты производятся регулярно при наблюдении каждой звезды, после чего они используются при обработке наблюдений. Конкретные формулы для учёта наклонности приводятся ниже – в соответствующих разделах, где описывается порядок наблюдений и алгоритм их обработки.

Длина пузырька уменьшается при повышении температуры, потому что кубическое расширение эфира больше кубического расширения стекла и при повышении температуры часть паров эфира обращается в жидкость. Чтобы избежать быстрого изменения длины пузырька при изменении температуры, делают уровни с камерой, так называемые камерные (рис.1.7,б)). В них у одного конца трубки помещается стеклянная перегородка с отверстием внизу. Если этот конец опустить или поднять, повернув уровень шкалой вниз, то пары эфира выходят из-за перегородки или заходят за нее, и объем пузырька изменяется. Для изменения длины пузырька уровня следует держать уровень наклонно, примерно под углом 45° , делениями вниз. Не следует трясти уровень, толкать, задевать или дышать на него.

На рис. 1.8 показано устройство алидадного уровня, который устанавливается на специальные площадки алидады микроскопов-микрометров вертикального круга. Ампула уровня (1) заключена в металлическую оправу (2), таким образом, что концами он лежит на прямоугольных вырезах, как цапфы на лагерах, а сверху прижимается к ним пружинками (3), действующими на нерабочую часть ампулы.

Оправа уровня представляет собой полый металлический цилиндр, внутренний диаметр которого чуть больше диаметра ампулы. С торцов цилиндр закрывается металлическими заглушками (5), прикрепленными к цилиндру винтами, а между заглушками и ампулой расположены пробковые амортизаторы (4). В верхней части цилиндра делается срез, позволяющий видеть шкалу ампулы и делать отсчёты положения пузырька. Своими концами – "ножками уровня" (6) оправка устанавливается на инструмент. При этом концы оправы обязательно имеют юстировочные винты (7), позволяющие установить уровень так, чтобы его ось заня-

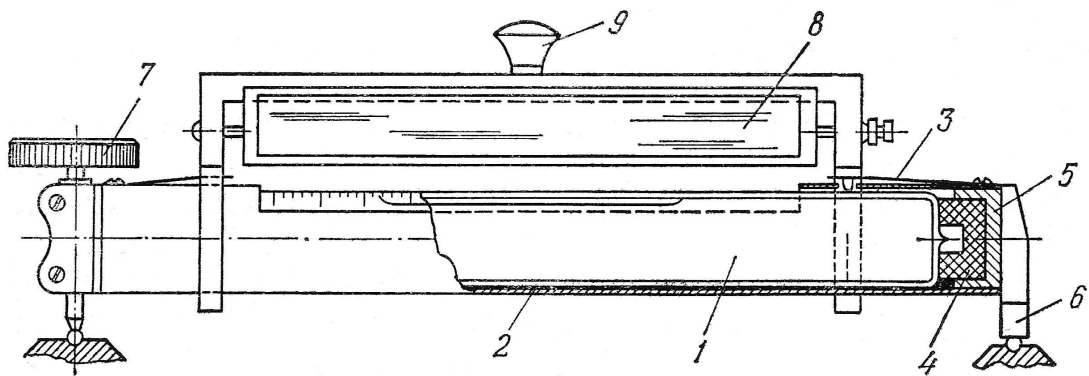


Рис. 1.8: Устройство алидадного уровня

ла соответствующее положение. Над шкалой ампулы на оправе обычно устанавливается наклонное зеркальце (8), позволяющее наблюдателю удобно отсчитывать уровень, глядя на него сбоку. Часто уровень имеет ручку или кнопку (9), за которую наблюдатель берет уровень.

Перед началом наблюдений инструмент должен быть отрегулирован так, чтобы в течение наблюдений пузырьки уровней оставались в пределах измерительной шкалы. Отметим, что неосторожные движения наблюдателя, когда он задевает опорное (треггерное) кольцо инструмента, конец горизонтальной оси или уровня, окуляр микроскопа-микрометра, могут привести к разбалансировке инструмента и, как следствие, к невозможности отсчетов уровней, так как пузырёк "уходит" за край шкалы ("зашкаливает"). В связи с этим во время наблюдений следует соблюдать максимальную осторожность в обращении – как с самим универсальным инструментом, так и с его уровнями и отсчётными приспособлениями.

Перед началом высокоточных наблюдений уровни обычно исследуются – определяется степень равномерности перемещения пузырька уровня вдоль делений и определяется цена деления. Исследование проводится в лабораторных условиях на специальном приборе, который называется экзаменатором уровней. Прибор снабжен высокоточным вертикальным винтом, который позволяет поднимать или опускать ампулу уровня и отсчётную шкалу, по которой определяются угол наклона. "Прогоняя" пузырёк

уровня вдоль всей шкалы прямым и обратным ходом и отсчитывая угол в делениях шкалы, можно вычислить точное значение цены деления этой шкалы.

1.4 Подготовка инструмента к наблюдениям

Универсальный инструмент, предназначенный для определения координат пункта наблюдения, следует установить на столбе или на специальной геодезической треноге до захода Солнца, чтобы, не спеша, привести его в порядок и в сумерки приступить к наблюдениям. Подготовка инструмента производится в следующем порядке:

- производится регулировка инструмента;
- определяется и исправляется место зенита на круге;
- определяется коллимационная ошибка;
- производится фокусировка трубы;
- инструмент устанавливается в меридиане;
- делается проверка горизонтальности нитей в поле зрения трубы.

1.4.1 Регулировка универсала

До начала наблюдений универсальный инструмент должен быть приведен в такое состояние, чтобы:

- его горизонтальная и вертикальная оси стали взаимно перпендикулярны;
- горизонтальная ось стала параллельной плоскости горизонта;
- ось накладного уровня стала параллельной горизонтальной оси инструмента;
- вертикальная ось стала вертикальной, т. е. она должна быть параллельна вектору силы тяжести места наблюдения;
- ось алидадного уровня стала перпендикулярна вертикальной оси инструмента.

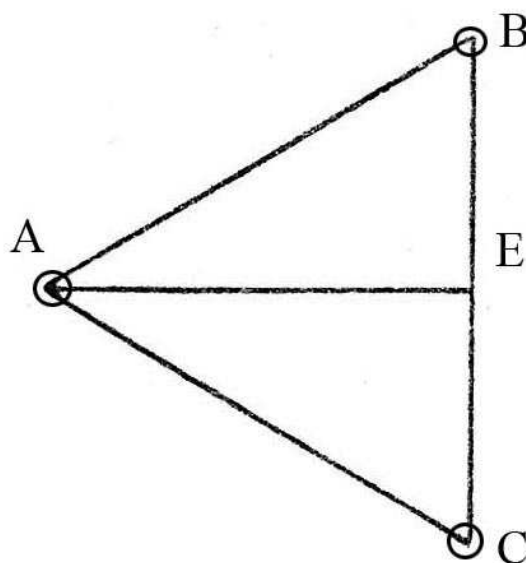


Рис. 1.9: К процедуре регулировки инструмента. Точки А, В, С изображают положение подъемных винтов на ножках инструмента.

Регулировку инструмента удобнее всего делать с помощью накладного уровня и производить в следующем порядке.

1. Горизонтальная ось инструмента устанавливается по направлению, параллельному линии АЕ (рис. 1.9). Точки А, В, С изображают положение подъемных винтов на ножках инструмента. Конец оси при этом должен проектироваться на одну из ножек, пусть, например, это будет ножка А. На горизонтальную ось инструмента устанавливается накладной уровень. Поскольку инструмент не отрегулирован, то в общем случае пузырёк уровня может сместиться вправо или влево. С помощью винта А – ввинчивая или вывинчивая его – следует установить пузырек уровня на середине шкалы.
2. Накладной уровень слегка покачивают в направлении, перпендикулярном горизонтальной оси, не снимая его с оси. Если пузырек уровня будет смещаться в разные стороны, то это указывает на то, что ось уровня и горизонтальная ось инструмента не лежат в одной плоскости (не компланарны). Исправление делается двумя горизонтальными коррекцион-

ными винтами, расположенными на одном из концов накладного уровня. Операция эта продолжается до тех пор, пока смещение пузырька не будет превышать 0.2 – 0.3 деления уровня.

3. Снимают накладной уровень, поворачивают его на 180° , и вновь накладывают на горизонтальную ось. Если пузырек сместится в сторону, то это показывает, что ось уровня наклонена к горизонтальной оси инструмента. Исправление делается вертикальными коррекционными винтами, расположенными на конце накладного уровня, и подъемным винтом А; при этом смотрят, на сколько делений сместился пузырек. Половина смещения ликвидируется подъемным винтом А, половина устраняется коррекционными винтами уровня. Операция повторяется до тех пор, пока отклонения пузырька после перекладки не будут превышать 0.3 деления уровня.

Бывают случаи, что после первой перекладки пузырек уровня скроется за оправой. В этом случае подъемным винтом А пузырек выгоняют на середину, при этом ведут счет оборотам подъемного винта. Затем подъемный винт А на половину числа оборотов отводят назад, отчего пузырек уровня снова уйдет в сторону. После этого, действуя вертикальными коррекционными винтами, находящимися на конце уровня, пузырек вновь выгоняется на середину.

4. Для приведения вертикальной оси инструмента в вертикальное положение повернем верхнюю часть инструмента на 90° ; в таком положении горизонтальная ось расположится параллельно прямой ВС. При этом пузырек уровня обычно не будет посередине. Исправление наклона делается подъемными винтами В и С. Их следует вращать одновременно в разные стороны, по возможности равномерно. После этого верхняя часть инструмента снова приводится в первоначальное положение. Для этого она поворачивается на 90° . Если пузырек уровня окажется на середине, то нивелировку инструмента можно считать законченной; если же пузырек отойдет в сторону, то, действуя подъемным винтом А, его следует привести на середину.
5. Проверяется взаимная перпендикулярность осей инструмен-

та. Для этой цели верхняя часть инструмента поворачивается около вертикальной оси точно на 180° . Если оси инструмента взаимно перпендикулярны, то при горизонтальности горизонтальной оси вертикальная ось будет занимать вертикальное положение и при повороте верхней части инструмента на 180° пузырек накладного уровня должен остаться на середине. Смещение пузырька в сторону указывает на неперпендикулярность осей. Для того чтобы можно было менять взаимное расположение осей, один из лагерей, поддерживающих горизонтальную ось, разрезан. Величину щели можно изменять с помощью коррекционных винтов. Исправление делается наполовину подъемным винтом А, наполовину коррекционными винтами, изменяющими ширину щели. На этом заканчивается регулировка инструмента, и следует перейти к его нивелировке. В направлении АЕ инструмент уже отрегулирован; остается отрегулировать его в направлении ВС.

6. Приведение алидадного уровня в надлежащее положение делается или с помощью микрометрического винта, позволяющего менять наклон алидады, с которой скреплен уровень, или с помощью коррекционных винтов, помещенных на одном из концов алидадного уровня.

После успешного выполнения всех перечисленных действий пузырьки уровней будут находиться посередине при любом положении верхней части инструмента. Регулировка инструмента отнимает немало времени, но если все коррекционные винты хорошо зажаты, то нормальное положение осей сохраняется долго.

Теперь необходимо проверить положение микроскопов-микрометров, служащих для отсчетов кругов. Разность отсчетов по ним должна по возможности мало отличаться от 180° . Нити каждого микроскопа-микрометра должны быть параллельны штрихам лимба. Ослабив винты, поддерживающие микроскопы, всегда можно придать им надлежащее положение и после этого вновь закрепить винты.

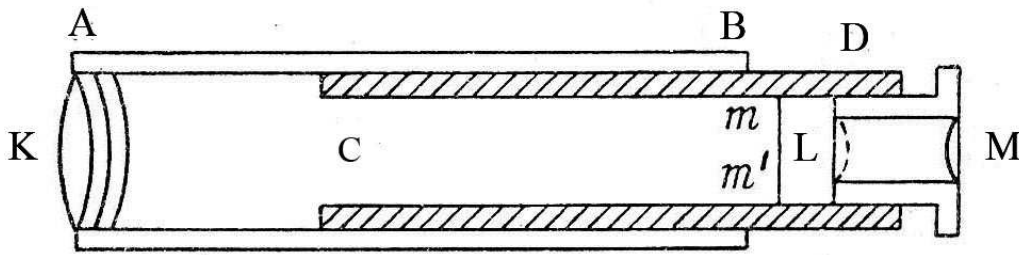


Рис. 1.10: Схема астрономической трубы

1.4.2 Фокусировка трубы

Астрономическая труба состоит из трех частей, вставленных друг в друга (рис.1.10). В конце трубы АВ вставлен объектив К. Средняя часть – трубка CD – при помощи кремальеры или непосредственно руками может перемещаться вдоль трубы АВ; в конце ее, обращенном в противоположную сторону от объектива, вставлена сетка нитей mm' , служащая для визирования. Третья часть трубы – окуляр LM. Перед наблюдением труба должна быть сфокусирована, т. е. сетка нитей должна быть совмещена с плоскостью, в которой находится действительное изображение наблюдаемого предмета. В зависимости от расстояния до земного предмета фокусное расстояние трубы меняется, а потому для получения резкого изображения приходится трубку CD, с которой скреплена сетка нитей, перемещать относительно трубы АВ, в конце которой находится объектив.

При наблюдении светил фокусное расстояние постоянно. Приступая к фокусировке трубы, устанавливают ее окуляр таким образом, чтобы сетка нитей была видна совершенно отчетливо. Затем наводят трубу на Солнце, наблюдая его через темное стекло, и перемещают трубку CD до тех пор, пока края Солнца будут видны очень резко. После захода Солнца фокусировку удобнее всего делать по Луне или яркой звезде. В хорошо сфокусированной трубе лунные кратеры должны быть отчетливо видны, а звезды, независимо от их яркости, должны казаться светящимися точками с дифракционными кольцами вокруг ядра. Если труба правильно сфокусирована, то при любом положении глаза наблюдателя положение центра сетки нитей не должно сходить с

наблюдаемого объекта. При наличии смещения следует уточнить фокусировку. Указанное явление называется параллаксом нитей. При наличии параллакса нитей невозможно точное наведение на визируемый предмет.

1.4.3 Установка инструмента в меридиане

Для наведения инструмента на нужную звезду используются таблицы, дающие высоты и азимуты звезд в различные моменты времени. Эти таблицы называются эфемеридами. Для того чтобы было возможно пользоваться эфемеридами, необходимо установить инструмент в меридиане, для чего нужно знать место юга на круге M_0 , т. е. тот отсчет горизонтального круга инструмента, который получается, когда труба находится в плоскости меридиана. Если возможно передвигать горизонтальный круг, то следует место меридиана M_0 сделать близким к нулю. Эта операция называется установкой инструмента в меридиане. Обычно для установки инструмента в меридиане пользуются Полярной звездой ($\alpha Ursae Minoris$). Ее эфемерида ежегодно печатается в "Астрономическом ежегоднике". Чтобы можно было воспользоваться эфемеридой Полярной, необходимо знать поправку хронометра относительно местного звездного времени с точностью до $2^m - 3^m$ и широту места наблюдения ϕ до нескольких минут дуги.

Для того, чтобы навести трубу на Полярную звезду, на вертикальном круге устанавливают отсчет, соответствующий зенитному расстоянию Полярной, взятому из эфемериды на данный момент. Направляют трубу в северную часть неба и, медленно перемещая по азимуту верхнюю часть инструмента, разыскивают звезду. После того как звезда появится в поле зрения трубы, действуя микрометренными винтами, совмещают ее с перекрестком нитей и, аккуратно перемещая горизонтальный круг, устанавливают по микроскопу-микрометру А выбранный из эфемериды азимут Полярной звезды, соответствующий моменту наблюдений. После чего горизонтальный круг закрепляется.

После того как инструмент установлен в меридиане, следует навести вертикальную нить трубы на какой-либо земной предмет и, сделав отсчет на горизонтальном круге, записать его азимут.

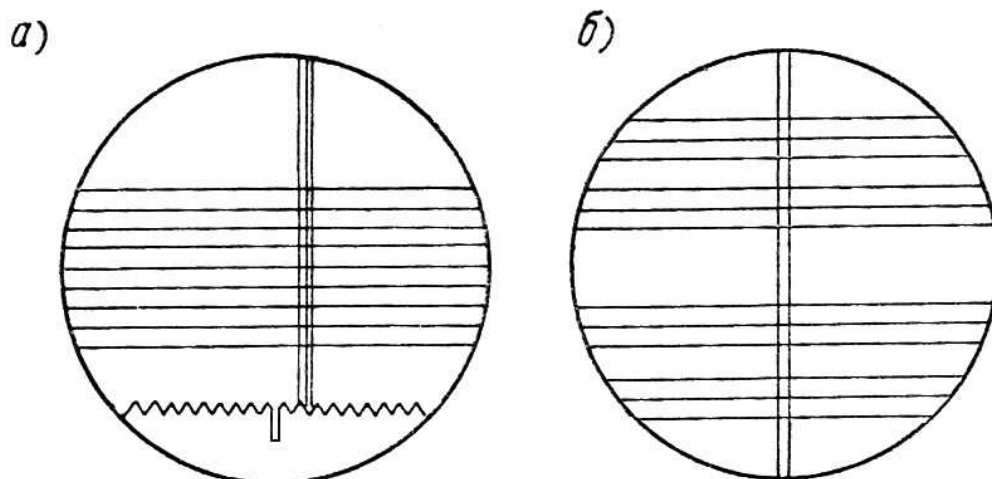


Рис. 1.11: Сетки нитей окулярного микрометра: а)– универсальный инструмент; б)– пассажный инструмент

Это облегчит установку инструмента в следующие вечера. При установке инструмента в меридиане по азимуту земного предмета поступают следующим образом: наводят среднюю вертикальную нить на предмет, азимут которого известен, открепляют горизонтальный круг и ставят отсчет, соответствующий азимуту земного предмета.

1.4.4 Проверка горизонтальности нитей

При астрономических определениях наблюдают преимущественно светящиеся визирные цели (звёзды, планеты, Солнце, Луна), находящиеся на различных зенитных расстояниях. Фиксирование зенитных расстояний объектов или азимутов, а также прохождение светил через круг равных высот в поле зрения трубы производится с помощью сетки нитей, помещенной в фокальной плоскости трубы. На рис. 1.11 приведены различные формы сеток нитей, применяемые в астрономии.

При измерении зенитных расстояний (высот) на звезду наводят горизонтальную нить вблизи перекрестья нитей, натянутых в поле зрения трубы, и при этом отмечают время прохождения светила; при определении же азимутов отмечают момент прохождения светила через вертикальную нить. В силу этого необходимо,

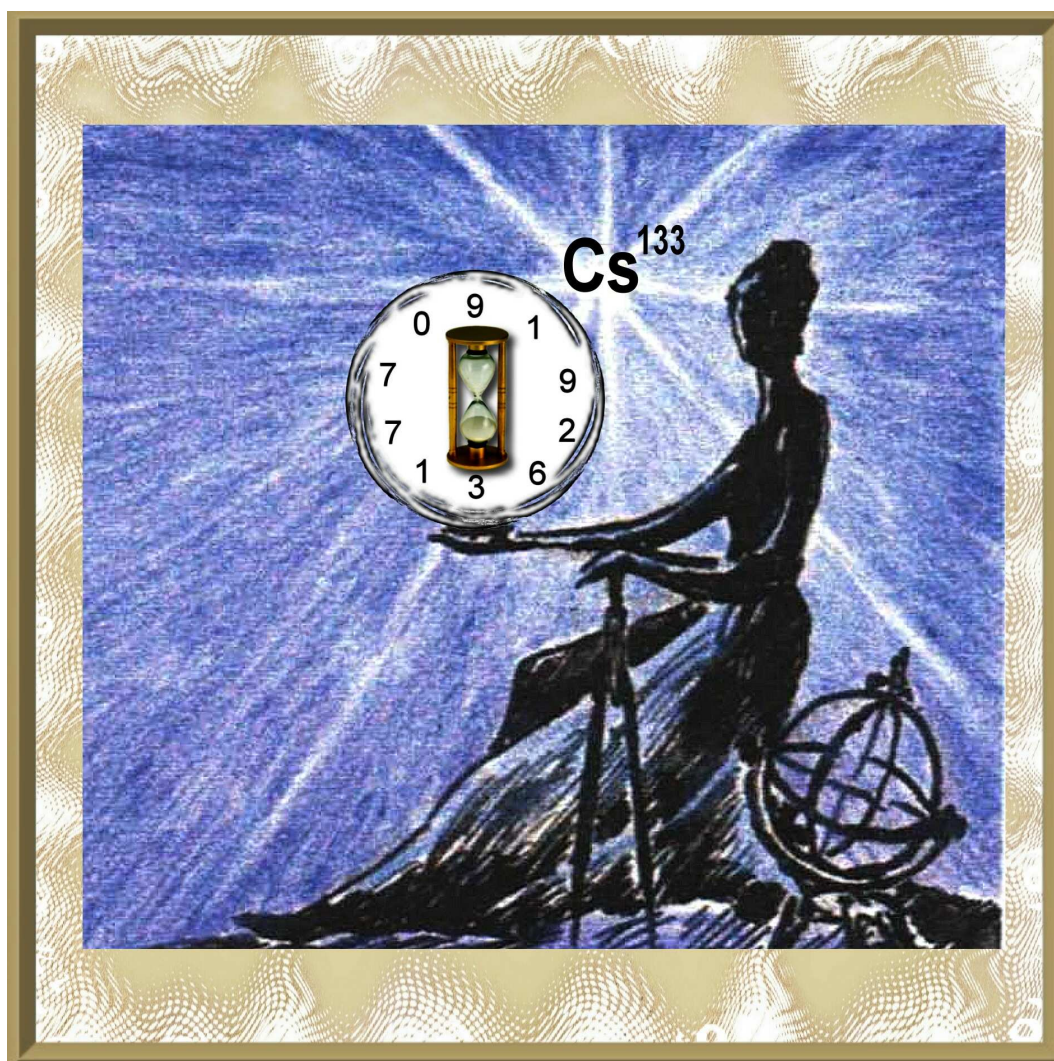
чтобы горизонтальная нить была действительно горизонтальна, а вертикальная – вертикальна. Горизонтальность нитей лучше всего проверять по Полярной звезде. Следует навести крест нитей на Полярную звезду и перемещать трубу микрометрическим винтом по азимуту в разные стороны. Если на краях поля зрения трубы звезда будет отходить от средней нити в разные стороны, то нить не горизонтальна. Ослабив коррекционные винты, поддерживающие диафрагму с натянутой на ней сеткой нитей, делают исправление, после чего вновь закрепляют диафрагму. Если на краях поля зрения звезда будет находиться на нити или немного смещаться в одну и ту же сторону, то нити горизонтальны. Такое смещение вызывается дефектами оптики.

Горизонтальность нитей можно проверять и днем. В этом случае вместо Полярной звезды выбирают резко видимую точку на отдаленном предмете. Каретка с нитями устроена таким образом, что нити пересекаются под прямым углом, а потому достаточно выверить их установку только в одном направлении.

В заключение этой главы отметим, что операции по определению места зенита на вертикальном круге, редукции, связанные с наличием коллимации, а также правила составления эфемериды Полярной звезды приводятся ниже – в соответствующих главах, посвященных определению широты места наблюдения и азимута земного предмета по наблюдениям Полярной звезды.

Глава 2

Аппаратура точного времени и частоты



2.1 Частотно-временная аппаратура

Астрономические определения прямых восхождений звёзд и Всемирного времени производятся на основе некоторой частотно-временной шкалы. Такая шкала задаётся "рабочими" часами, секундные сигналы которых поступают на регистрирующую аппаратуру, работающую в комплексе с астрометрическим инструментом (телескопом).

Современный уровень технической реализации и хранения шкалы времени определяет погрешность воспроизведения единицы частоты и времени в одну наносекунду, а иногда и меньше. Существует ряд каналов, передающих сигналы точного времени, в том числе спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС. Точность приёма этих сигналов зависит от приёмного устройства и его технической характеристики; погрешность регистрации обычно составляет ± 40 наносекунд.

В течение ряда лет в лаборатории астрометрии (Службе времени) Астрономической обсерватории Ленинградского (Санкт-Петербургского) университета применялись вначале кварцевые, а затем рубидиевые стандарты частоты. Шкала времени, задаваемая этими стандартами, использовалась при учебных и производственных астрономических наблюдениях. Ход стандартов определяли из ежесуточных сличений шкалы этих стандартов с Государственным эталоном СССР с помощью радиосигналов точного времени.

При модернизации аппаратуры было решено использовать сигналы времени, заложенные в шестой строке телевизионного растра первого канала телевидения, как более простой и надёжный способ сверки часов. Секунда, выделенная из телевизионного сигнала, была синхронизирована с Государственным эталоном России и имела погрешность меньше трёх микросекунд.

Комплекс аппаратуры точного времени предназначен для воспроизведения, хранения шкал среднего и звёздного времени и обеспечения ими как научных исследований, так и учебного процесса. В её состав входят:

- 1) телевизионный приёмник;
- 2) блок выделения секунды из телевизионного сигнала;

- 3) рубидиевый стандарт частоты и времени Ч1-78;
- 4) измеритель частоты и интервалов времени ЧЗ-34;
- 5) кварцевый синхронметр Ч7-15 – звёздные часы;
- 6) коммутатор сигналов времени и датчик звёздных импульсов для вторичных часов;
- 7) источник бесперебойного питания стандартов частоты;
- 8) вторичные часы.

Все приборы вмонтированы в стойку (рис.2.1), их функциональность заключается в следующем.

Телевизионный приёмник используется для приёма сигналов точного времени Государственного эталона времени и частоты через систему телевизионного вещания. Блок выделения секунды из телевизионного сигнала формирует сигналы 1 и 50 герц, на



Рис. 2.1: Аппаратура точного времени

дисплее блока при этом высвечивается текущее точное время.

Рубидиевый стандарт частоты и времени Ч1-78 является основным прибором, от которого зависит стабильность работы всего устройства. На выходных разъемах стандарта имеются следующие сигналы: 5 МГц – 100 кГц – 1 Гц.

Измеритель частоты и времени Ч3-34 применяется для сличения сигналов основных часов Ч1-78 с сигналами времени, принимаемыми по телевидению, а также сличения звёздных часов с основными.

Синхрометр Ч7-15 перестроен на звёздные часы и синхронизирован с основными часами частотой пять мегагерц. Индикатор на передней панели показывает точное звёздное время.

Коммутатор сигналов времени позволяет подавать любой избранный сигнал на частотомер, включенный в режиме измерения интервалов времени, и измерять расхождение сигналов относительно ведущих основных часов Ч1-78. В коммутаторе смонтирован датчик сигналов времени для звёздных вторичных часов.

Источник бесперебойного питания 30 вольт постоянного тока обеспечивает питанием рубидиевый стандарт и звёздные часы на время отключения электросети.

В связи с прекращением передач сигналов точного времени через телевидение в настоящее время в лаборатории астрометрии НИАИ СПбГУ сличение рубидиевых часов производится через радиостанцию РВМ на несущей частоте 4996 кГц. Особое внимание уделено применению современной регистрирующей аппаратуры и удобству её эксплуатации при проведении астрономических наблюдений во время летней астрометрической практики. Секундные импульсы от звёздных и средних часов передаются на астрономическую площадку лаборатории астрометрии, где используются при производстве наблюдений в соответствии с программой практики.

2.2 Определение поправки часов

Выполняя астрономические наблюдения, наблюдатель регистрирует в шкале звёздных рабочих часов момент прохождения звезды через нить координатной сетки. При обработке результатов

наблюдений необходимо иметь истинное местное звёздное время S_λ в тот же момент наблюдений, которое получим, если к T прибавим поправку u рабочих часов:

$$S_\lambda = T + u.$$

Следовательно, решение задачи сводится к тому, чтобы в один и тот же физический момент времени иметь как показания часов T , так и истинное звёздное время S_λ , тогда $u = S_\lambda - T$.

Ниже приводится пример определения поправки u рабочих часов. Исходные данные получаются следующим образом. Начало минуты звёздного времени запускает счёт частотомера, а начало ближайшей минуты среднего времени счёт останавливает, и на дисплее высвечивается разность Δ , выраженная в единицах среднего времени.

Пусть в момент звёздного времени $S_H = 14^h 12^m$ частотомер запускается, а в момент среднего времени $t = 21^h 26^m$ он останавливается, при этом на дисплее частотомера высветилась разность $\Delta = 37^s.229$.

Истинное звёздное время S_λ в момент t получим по известной формуле: $S_\lambda = M + \mu M + S_0 + \lambda$, где M – Гринвичское среднее солнечное время, μ – коэффициент перехода от среднего времени M к звёздному S , S_0 – звёздное время в Гринвичскую полночь, λ – долгота места наблюдения (μ и S_0 выбираются из Астрономического Ежегодника, причём μ – постоянная величина, а S_0 следует брать на дату наблюдения).

Гринвичское среднее солнечное время M отличается летом от местного среднего солнечного времени t в Санкт-Петербурге на 4 часа: $t = M + 2^h_l + 1^h_d + 1^h_s$, здесь 2^h_l – долгота Санкт-Петербурга (в целых часах), 1^h_d – один час декретного времени и 1^h_s – один час летнего времени.

Таким образом, $M = 21^h 26^m - 4^h 00^m = 17^h 26^m$. Произведём далее простые вычисления, чтобы получить необходимое значение S_λ :

$$\begin{array}{r}
M=17^h 26^m 00^s .000 \\
\mu M= \quad 2^m 51^s .831 \\
S_0=18^h 42^m 34^s .373 \\
\hline
S=12^h 11^m 26^s .204 \quad - \text{Гринвичское звёздное время} \\
\lambda= 2^h 01^m 10^s .771 \\
\hline
S_\lambda=14^h 12^m 36^s .975 \quad - \text{местное звёздное время}
\end{array}$$

Показание звёздных рабочих часов T в этот же момент t можно записать как $T = S_H + \Delta + \mu\Delta$, где $\mu\Delta$ – поправка за перевод величины Δ из шкалы среднего времени в шкалу звёздного времени.

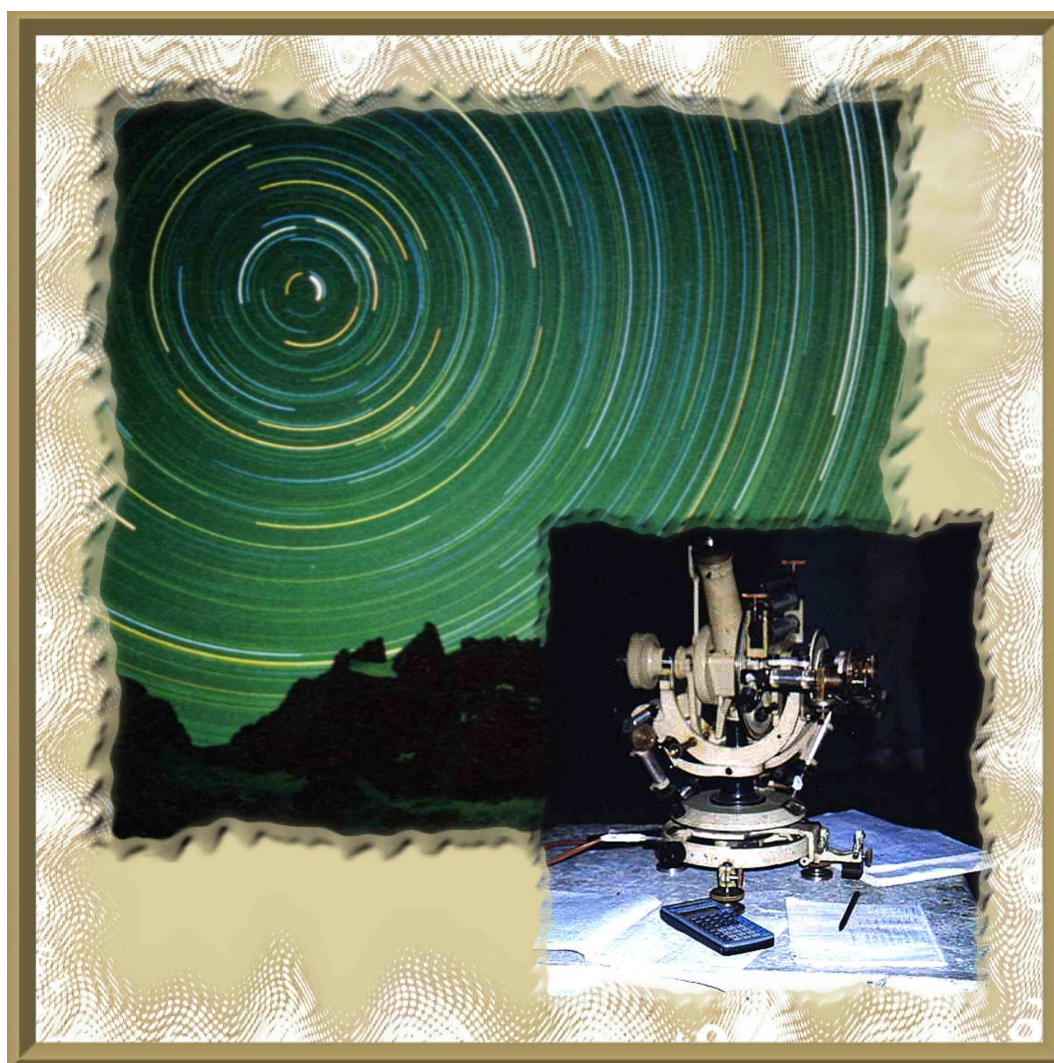
$$\begin{array}{r}
S_H=14^h 12^m 00^s .000 \\
\Delta= \quad 37^s .229 \\
\mu\Delta= \quad 0^s .102 \\
\hline
T=14^h 12^m 37^s .331
\end{array}$$

Окончательно получаем исходную поправку часов в шкале звёздного времени $u = S_\lambda - T = -0^s .356$.

Указанным образом поправка рабочих звёздных часов определяется для каждого вечера наблюдений и используется при их обработке.

Глава 3

Определение широты пункта по измерениям зенитных расстояний звезд



3.1 Идея метода

Пусть в пункте с широтой φ в момент по звёздному времени $S = T + U$, где T - показания рабочего хронометра, U - его поправка, произведено наблюдение звезды σ с видимыми координатами α , δ . Из параллактического треугольника $Pz\sigma$ (рис. 3.1) в данном случае имеем:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (3.1)$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t, \quad (3.2)$$

$$\sin z \cos A = -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos t, \quad (3.3)$$

где z и A - зенитное расстояние и азимут звезды σ в момент S , t - её часовой угол,

$$t = T - \alpha + U. \quad (3.4)$$

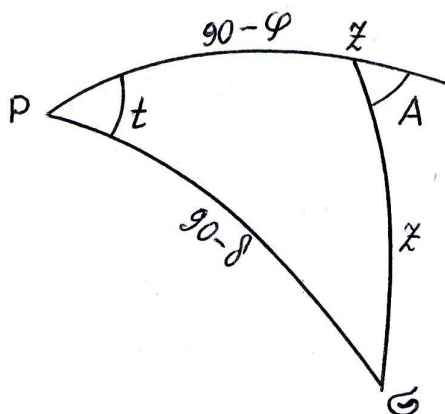


Рис. 3.1: Параллактический треугольник

При известных на момент S видимых координатах α и δ измененному зенитному расстоянию z формулы (3.1)-(3.4) позволяют вычислить широту места наблюдения φ .

Рассмотрим, как надо производить измерения зенитного расстояния z , чтобы сопутствующие этим измерениям ошибки зенитного расстояния Δz , момента измерения ΔT и поправки хронометра ΔU наименьшим образом исказили бы результат. Считая видимые координаты звезды α и δ величинами постоянными, продифференцируем формулы (3.1) и (3.4) и заменим в них

дифференциалы dz , $d\varphi$, dt , dU , конечными приращениями Δz , $\Delta\varphi$, Δt и ΔU :

$$\sin z \Delta z = (-\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos t) \Delta\varphi + \cos \varphi \cos \delta \sin t \Delta t, \quad (3.5)$$

$$\Delta t = \Delta T + \Delta U. \quad (3.6)$$

С учётом (3.2) и (3.3) отсюда получаем:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta z}{\cos A} - (\Delta T + \Delta U) \cos \varphi \operatorname{tg} A. \quad (3.7)$$

Из формулы (3.7) следует, что при наблюдениях в меридиане ($A = 0^\circ$ или $A = 180^\circ$) ошибка определения широты $\Delta\varphi$ не зависит от суммы ошибок $\Delta T + \Delta U$, а определяется только ошибками измерения зенитного расстояния Δz . Поскольку коэффициент при Δz в формуле (3.7) при $A = 0^\circ$ или $A = 180^\circ$ принимает к тому же минимальное значение, мы приходим к выводу, что для наибольшего исключения влияния ошибок $\Delta T + \Delta U$, Δz измерения зенитных расстояний с целью получения широты места лучше всего производить в меридиане.

Обозначая через z_0 зенитное расстояние в меридиане, выпишем известные соотношения:

$$z_0 = \varphi - \delta \quad - \quad \text{верхняя кульминация к югу от зенита}; \quad (3.8)$$

$$z_0 = \delta - \varphi \quad - \quad \text{верхняя кульминация к северу от зенита}; \quad (3.9)$$

$$z_0 = 180^\circ - (\varphi + \delta) \quad - \quad \text{нижняя кульминация}. \quad (3.10)$$

Следовательно, если по результатам измерений получены значения z_0 , то с помощью формул (3.8) - (3.10) можно вычислить широту места наблюдения.

3.2 Редукция зенитного расстояния на меридиан

При определении широты звёзды наблюдаются не в меридиане, а на некотором расстоянии от него. Выясним, как можно вычислить зенитное расстояние в меридиане z_0 , если измеряется зенитное расстояние z вблизи меридиана. С этой целью, сделав в формуле (3.1) замену $\cos t = 1 - 2 \sin^2 \frac{t}{2}$, получим

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta - 2 \cos \varphi \cos \delta \sin^2 \frac{t}{2}. \quad (3.11)$$

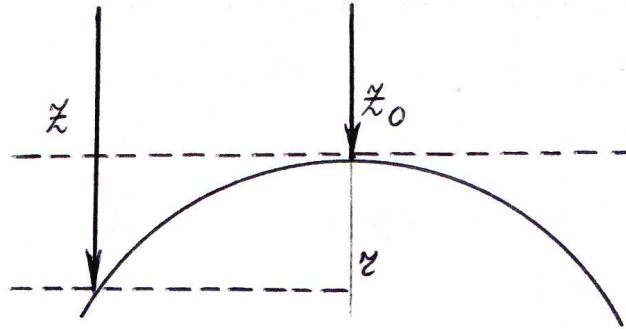


Рис. 3.2: Наблюдения вблизи верхней кульминации

Обозначим через r редукцию наблюденного зенитного расстояния z к меридиональному зенитному расстоянию z_0 . В том случае, когда звезда наблюдается вблизи верхней кульминации (рис. 3.2), её наблюденное зенитное расстояние z больше меридионального расстояния z_0 . Поэтому, полагая

$$r = z - z_0, \quad (3.12)$$

из формулы (3.11) имеем

$$\cos(r + z_0) = \cos(\varphi - \delta) - 2 \cos \varphi \cos \delta \sin^2 \frac{t}{2} \quad (3.13)$$

или

$$\cos r \cos z_0 - \sin r \sin z_0 = \cos z_0 - 2 \cos \varphi \cos \delta \sin^2 \frac{t}{2}. \quad (3.14)$$

Разделив обе части уравнения (3.14) на $\sin z_0$, получим:

$$\cos r \operatorname{ctg} z_0 - \sin r = \operatorname{ctg} z_0 - \frac{2 \cos \varphi \cos \delta}{\sin z_0} \sin^2 \frac{t}{2}. \quad (3.15)$$

Разложим $\sin r$ и $\cos r$ в ряды, пренебрегая членами, начиная с четвертого порядка:

$$\sin r = r - \frac{r^3}{6}, \quad (3.16)$$

$$\cos r = 1 - \frac{r^2}{2}. \quad (3.17)$$

С учётом (3.16) и (3.17) из (3.15) находим

$$r = \rho - r^2 \frac{\text{ctg} z_0}{2} + \frac{r^3}{6}, \quad (3.18)$$

$$\rho = \lambda \sin^2 \frac{t}{2}, \quad (3.19)$$

$$\lambda = \frac{2 \cos \varphi \cos \delta}{\sin z_0}. \quad (3.20)$$

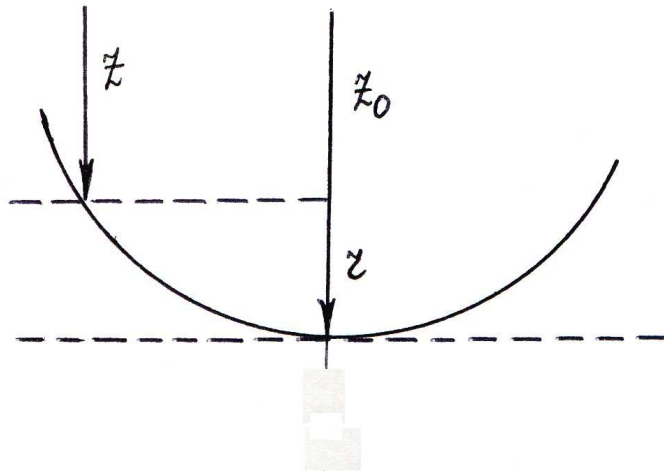


Рис. 3.3: Наблюдения вблизи нижней кульминации

Уравнение (3.18) соответствует наблюдению звёзд вблизи верхней кульминации. Нетрудно показать, что для редукции

$$r = z_0 - z \quad (3.21)$$

при наблюдениях вблизи нижней кульминации (рис. 3.3) вместо (3.18) можно получить аналогичное уравнение

$$r = \rho + r^2 \frac{\text{ctg} z_0}{2} + \frac{r^3}{6}. \quad (3.22)$$

Отметим, что для решения уравнений (3.18) и (3.22) относительно искомой редукции r можно в качестве искомой широты φ взять её приближенное значение φ_0 (с точностью до $1'$), с помощью которого по формулам (3.8) - (3.10) рассчитать приближённое значение $z_0 = \zeta_0$. Ввиду малости величины r можно решать уравнения (3.18) и (3.22) методом итерации. Выражая углы r, ρ

и λ в угловых секундах, с точностью до членов третьего порядка малости имеем

$$r = \rho \pm \rho^2 \frac{\text{ctg}\zeta_0}{412530} + \rho^3 \frac{\text{ctg}^2\zeta_0 + \frac{1}{3}}{2 \cdot 206265^2}. \quad (3.23)$$

Здесь

$$\rho = \lambda \sin^2 \frac{t}{2}, \quad (3.24)$$

$$\lambda = 412530 \frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin \zeta_0}, \quad (3.25)$$

φ_0 - принятое значение широты, ζ_0 - приближённое значение меридионального зенитного расстояния, вычисленного по формулам (3.8) - (3.10) с принятым значением широты φ_0 :

$\zeta_0 = \varphi_0 - \delta$ - верхняя кульминация к югу от зенита;

$\zeta_0 = 180^\circ - (\varphi_0 + \delta)$ - нижняя кульминация.

В формуле (3.23) знак "+" берётся при наблюдениях вблизи нижней кульминации, а знак "-" при наблюдениях вблизи верхней кульминации. Заметим, что третий член (3.23) следует принимать во внимание только в тех случаях, когда наблюдения звезды производились в часовых углах $t \geq 1^h$.

3.3 Место зенита на вертикальном круге

Место зенита - это такой отсчёт вертикального круга, при котором труба направлена точно в зенит. Практически невозможно добиться, чтобы нулевое деление круга соответствовало зениту. В силу этого обстоятельства измеряемое с помощью микроскопа-микрометра зенитное расстояние объекта будет содержать ошибку места зенита.

Для определения места зенита и истинного зенитного расстояния производят измерения зенитного расстояния объекта в двух положениях инструмента: "круг лево" (КЛ) и "круг право" (КП). Обозначая получившиеся отсчёты через (L) и (R) соответственно, для места зенита M_z имеем

$$M_z = \frac{1}{2}[(L) + (R) - 360^\circ]. \quad (3.26)$$

Как следует из схемы, приведенной на рис. 3.4, для зенитного расстояния, свободного от ошибки места зенита, теперь можно

записать:

$$z = (L) - M_z = \frac{1}{2}[(L) - (R) + 360^\circ]. \quad (3.27)$$

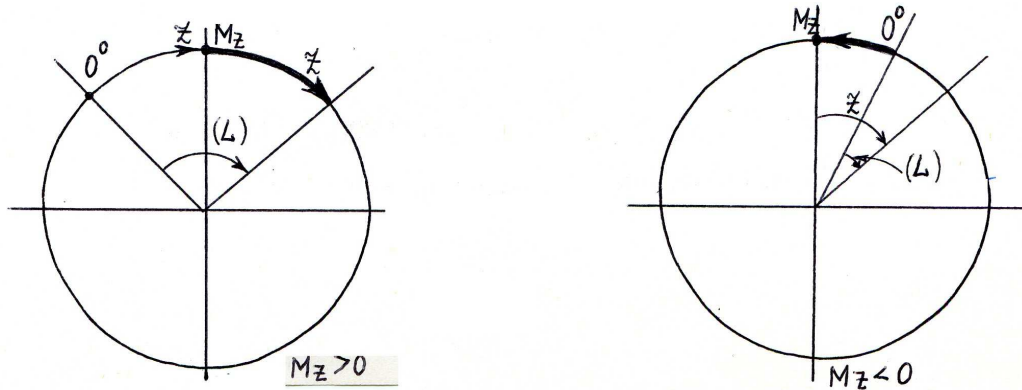


Рис. 3.4: Место зенита

3.4 Исправление зенитного расстояния за рефракцию

Как известно, преломление света в атмосфере Земли (рефракция) приводит к тому, что полученное из наблюдений зенитное расстояние z оказывается меньше истинного зенитного расстояния z' , то есть

$$z' = z + \rho, \quad (3.28)$$

где величина рефракции ρ вычисляется по формуле

$$\lg \rho = \mu + \lg \operatorname{tg} z + \lambda \gamma + B. \quad (3.29)$$

Входящие в правую часть этой формулы величины μ , λ , γ , B приводятся в "Астрономическом Ежегоднике". При этом величины μ и λ являются функциями наблюденного зенитного расстояния z , величина γ - функцией температуры t° , выраженной в градусах Цельсия, а величина B - функцией атмосферного давления, выраженного в миллиметрах ртутного столба. Значения γ и B даются в единицах четвертого знака логарифма рефракции. Сама рефракция ρ , вычисленная по формуле (3.29), получается в секундах дуги.

3.5 Гнутие трубы

Астрономическая труба не является абсолютно твёрдым телом, поэтому под влиянием силы тяжести объектив и окуляр трубы провисают, вызывая изгиб (гнутие) трубы. Очевидно, что наибольшее гнутие будет у трубы в горизонтальном положении, а наименьшее - в вертикальном. Обычно считают, что зависимость ошибки зенитного расстояния от гнутия трубы выражается формулой $x = a \sin z$, причём постоянная гнутия a определяется из меридианных наблюдений звёзд на различных высотах.

Чтобы освободить от влияния гнутия определяемую широту, следует выводить её из наблюдения двух звёзд, одна из которых наблюдается вблизи нижней кульминации, а другая - вблизи верхней кульминации примерно на одинаковых высотах. Разность высот не должна превышать $5^\circ - 10^\circ$. Действительно, обозначая через φ_N и φ_S значения широт, полученные с учётом гнутия из наблюдения звёзд к северу и к югу от зенита соответственно, из формул (3.8) и (3.10) имеем

$$\varphi_N = 180^\circ - (z_N + a \sin z_N + \delta_N) = \varphi - a \sin z_N; \quad (3.30)$$

$$\varphi_S = z_S + a \sin z_S + \delta_S = \varphi + a \sin z_S.$$

Так как $z_N \approx z_S$, то из (3.30) получаем

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_S + \varphi_N). \quad (3.31)$$

Очевидно, что это значение широты будет более свободно от ошибок гнутия, чем ближе к нулю разность зенитных расстояний $z_N - z_S$. Исходя из вышесказанного, целесообразно определение широты производить из наблюдений Полярной звезды вблизи её нижней кульминации и из наблюдений "южной" звезды, кульминирующей к югу от зенита. В качестве южных звёзд для широты Петербурга можно брать звёзды со склонениями от 20° до 40° .

3.6 Эфемериды Полярной и "южной" звезды

Для того чтобы в заданный момент времени навести трубу на небесное светило, необходимо иметь относящиеся к этому моменту времени его зенитное расстояние и азимут. Таблица высот и

азимуты светил, соответствующих различным моментам времени, называется эфемеридой этого светила.

Эфемерида Полярной звезды может быть получена на момент s по звёздному времени с помощью следующих формул:

$$z = 90^\circ - (\varphi + f), \quad (3.32)$$

$$\operatorname{tga} = \operatorname{tgy} \sec(\varphi + f), \quad (3.33)$$

где

$$f = (90^\circ - \delta) \cos t, \quad y = (90^\circ - \delta) \sin t, \quad (3.34)$$

$$t = s - \alpha,$$

α, δ - экваториальные координаты Полярной звезды, φ - широта места наблюдения.

На практике эфемериды Полярной звезды получают с помощью таблицы "Высоты и азимуты Полярной", публикуемой в "Астрономическом Ежегоднике". В этой таблице для широт от 35° до 84° через каждые 20^m даются значения f и азимуты Полярной a , отсчитанные от точки Севера. В тех случаях, когда звёздное время s дано в левой части таблицы, Полярная звезда находится к западу от меридиана и для получения её астрономического азимута (считаемого от точки юга) следует табличное значение a вычесть из 180° . Если же звёздное время дано в правой части таблицы, то Полярная находится к востоку от меридиана, и для получения её астрономического азимута следует значение a прибавить к 180° .

Зенитное расстояние Полярной по взятому из таблицы значению f и известной с точностью до $1'$ широте φ вычисляется по формуле (3.32). Эфемерида "южной" звезды вблизи её верхней кульминации рассчитывается по формулам:

$$z = z_0 + \Delta z_0 \left(\frac{\Delta t}{10} \right)^2, \quad (3.35)$$

$$A = 360^\circ - \Delta A_0 \left(\frac{\Delta t}{10} \right), \quad (3.36)$$

где Δt - интервал времени в минутах до и после кульминации,

$$z_0 = \varphi - \delta, \quad (3.37)$$

$$\Delta z_0 = 11250 \sin 1'' \frac{\cos \varphi \cos \delta}{\sin(\varphi - \delta)}, \quad (3.38)$$

$$\Delta A_0 = 2^\circ.5 \frac{\cos \delta}{\sin(\varphi - \delta)}. \quad (3.39)$$

Подходящие звёзды выбираются из списка "Средние места звёзд", публикуемого в "Астрономическом Ежегоднике". Обычно наблюдение "южной" звезды начинается и заканчивается приблизительно за 20^m от момента кульминации. В среднем, для звёзд со склонением от 20° до 40° в качестве эфемериды можно пользоваться следующими данными

Время	z	A
20^m до кульминации	$z_0 + 14'$	351°
10^m до кульминации	$z_0 + 4'$	$355^\circ.5$
Кульминация	z_0	0°
10^m после кульминации	$z_0 + 4'$	$4^\circ.5$
20^m после кульминации	$z_0 + 14'$	9°

3.7 Вычисление видимых мест

Видимые места 685 звёзд на моменты их верхних кульминаций в Гринвиче публикуются в "Астрономическом Ежегоднике". Для близполюсных звёзд они даются с интервалом в одни сутки, а для остальных звёзд - с десятисуточным интервалом. Поскольку табличные значения видимых мест относятся к моментам верхней кульминации звёзд на Гринвичском меридиане, аргументы таблиц, т.е. календарные даты, даются в виде дробных чисел. Дробная часть даты с точностью до 0.05 звёздных суток соответствует выраженному в долях суток промежутку $\alpha - S_0$, где α - приближённое (с точностью до 1^m) прямое восхождение звезды (следовательно, и звёздное время кульминации в Гринвиче), а S_0 - звёздное время, соответствующее 0^h всемирного времени. Значения S_0 для каждой календарной даты года также публикуются в "Астрономическом Ежегоднике". Так, например, при вычислении видимого места Полярной звезды в ночь с 15 на 16 июня 1980 г. из "Астрономического Ежегодника" имеем:

	$\alpha = 2^h 11^m$	$\delta = 89^\circ 10'$		
Июнь	15.4	$33^s .41$	$08'' .03$	
		123	-10	
	16.4	$34^s .64$	$07'' .93$	
	$S_0 = 17^h 33^m$	$\delta = 89^\circ 10' 08'' .03$	$S_0 = 17^h 37^m$	$\delta = 89^\circ 10' 07'' .93$
		$\alpha = 2^h 11^m 33^s .41$		$\alpha = 2^h 11^m 34^s .64$

Эта ситуация иллюстрируется рис.3.5:

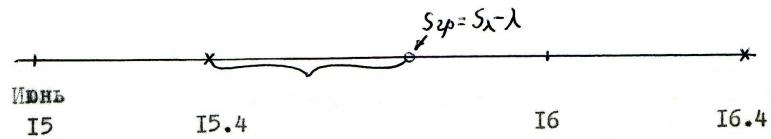


Рис. 3.5: К вычислению видимых мест.

На рисунке одно и то же явление (верхняя кульминация Полярной в Гринвиче) соотнесено как со шкалой гринвичского звёздного времени (верхняя шкала), так и со шкалой календарных дат (нижняя шкала).

Задача интерполирования видимых координат на момент наблюдения S_λ по местному звёздному времени пункта с долготой λ сводится к установлению интерполяционного множителя n , равного доле звёздных суток, протекшей с момента верхней кульминации $S = \alpha$ до момента наблюдения $S_{гр} = S_\lambda - \lambda$ по гринвичскому звёздному времени:

$$n = \frac{[S_{гр} - \alpha]^h}{24^h}. \quad (3.40)$$

Пример I. Вычислить видимое место Полярной звезды 15 июня 1980 г. в $16^h 35^m 20^s .265$ по местному звёздному времени Ленинграда ($\lambda = 2^h 01^m 10^s .771$).

Все необходимые данные из "Астрономического Ежегодника" приведены выше и показаны на рис. 3.5.

Вычислим момент наблюдения по гринвичскому звёздному времени:

$$\begin{aligned}
S_{\lambda} & 16^h 35^m 20^s.265, \\
\lambda & 2^h 01^m 10^s.771, \\
S_{\text{гр}} &= 14^h 34^m 09^s.494.
\end{aligned}$$

Очевидно, что от момента верхней кульминации

$$\alpha = 2^h 11^m$$

до момента наблюдения

$$S_{\text{гр}}$$

прошло

$$S_{\text{гр}} - \alpha = 12^h 23^m = 12^h.383,$$

поэтому

$$n = \frac{12^h.383}{24} = 0.516.$$

Линейная интерполяция видимых мест осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned}
\alpha &= 12^h 11^m + [33^s.41 + 0.516(34^s.64 - 33^s.41)] = 12^h 11^m 34^s.045, \\
\delta &= 89^\circ 10' + [08''.03 + 0.516(07''.93 - 0.803)] = 89^\circ 10' 07''.98.
\end{aligned}$$

Для вычисления видимых координат звёзд, для которых в "Астрономическом Ежегоднике" видимые места даны с десятисуточным интервалом, интерполяционный множитель определяется через интервал времени, протекший от момента наблюдения по Гринвичу до момента верхней кульминации звезды, данного в таблице. Этот интервал времени в общем случае состоит из целого числа звёздных суток d и некоторой доли звёздных суток, устанавливаемой подобно тому, как это было сделано в предыдущем примере.

Пример 2. Вычислить видимое место звезды βUMi (N360 по А.Е.) в $20^h 00^m 09^s.544$ по местному звёздному времени 2/3 сентября 1983 года в Ленинграде ($\lambda = 2^h 01^m 10^s.771$).

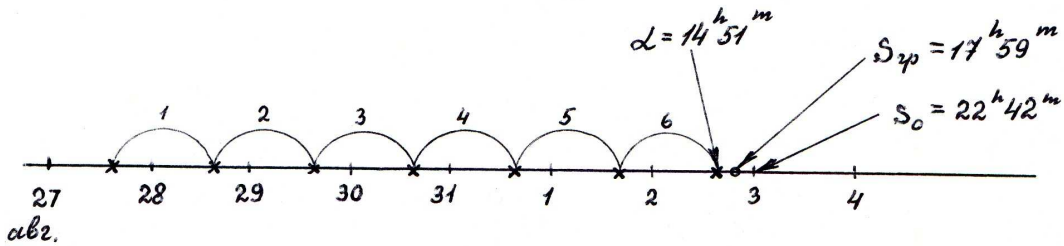
Определим вначале момент наблюдения по гринвичскому звёздному времени

$$\begin{aligned}
S_{\lambda} & 20^h 00^m 09^s.544, \\
\lambda & 2^h 01^m 10^s.771, \\
S_{\text{гр}} &= 17^h 58^m 58^s.773
\end{aligned}$$

Из "Астрономического Ежегодника" имеем:

	α	δ
авг. 27.7	$14^h 50^m 43^s.196$	$74^\circ 13' 43''.05$
	-0.711	-1.84
сент. 6.7	$42^s.485$	$41''.21$

Для вычисления интерполяционного множителя построим схему



На основании этой схемы

$$n = \frac{1}{10} \left[6 + \frac{17^h 59^m - 14^h 51^m}{24^h} \right] = 0.613.$$

Теперь с помощью линейной интерполяции вычисляем видимые координаты:

$$\alpha = 14^h 50^m 43^s.196 - 0.711 \times 0.613 = 14^h 50^m 42^s.760,$$

$$\delta = 74^\circ 13' 43''.05 - 1''.84 \times 0.613 = 74^\circ 13' 41''.92.$$

Частным случаем рассмотренной только что задачи является задача определения видимого места звезды в момент её верхней кульминации.

Пример 3. Вычислить видимое место звезды αLyr (N453 по А.Е.) в момент её верхней кульминации 15/16 июня 1980 г. в Ленинграде ($\lambda = 2^h 01^m 10^s.771$).

Очевидно, что момент наблюдения по гринвичскому звёздному времени $S_{гр} = \alpha - \lambda$ всегда будет отстоять от начального табличного значения на величину

$$d + \frac{24^h - [\alpha - (\alpha - \lambda)]}{24},$$

где d - целое число звёздных суток, устанавливаемое так же, как это делалось выше. Поэтому для интерполяционного множителя

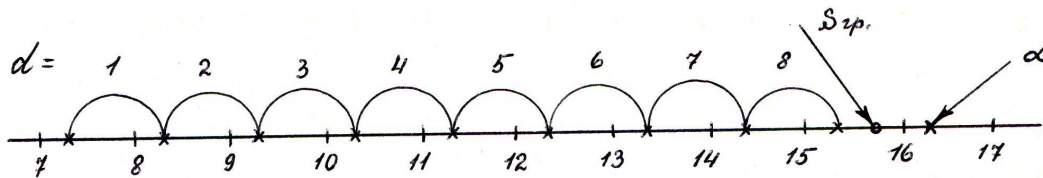
при $\lambda = 2^h 01^m 10^s.771$ получаем

$$n = \frac{1}{10}[d + 0.916].$$

Для условия нашего примера из "Астрономического Ежегодника" находим

июнь	α	δ
7.1	$18^h 36^m 17^s.725$	$38^\circ 45' 54''.19$
	$0^s.150$	$3''.03$
17.0	$17^s.875$	$57''.22$

и строим соответствующую схему:



В результате находим

$$n = \frac{1}{10}[8 + 0.916] = 0.892.$$

Видимые места получим с помощью линейной интерполяции

$$\alpha = 18^h 36^m 17^s.725 + 0^s.150 \times 0.892 = 18^h 36^m 17^s.859,$$

$$\delta = 38^\circ 45' 54''.19 + 3''.03 \times 0.892 = 38^\circ 45' 56''.89.$$

3.8 Методика наблюдений

1. Отрегулировать инструмент с помощью накладного уровня.
2. Установить инструмент в меридиан.
3. Снять накладной уровень, установить алидадный уровень и вывести его пузырёк на середину. В процессе наблюдений алидадный уровень трогать нельзя.
4. Проверить горизонтальность нитей.
5. Пользуясь эфемеридами, навести трубу на нужную звезду.

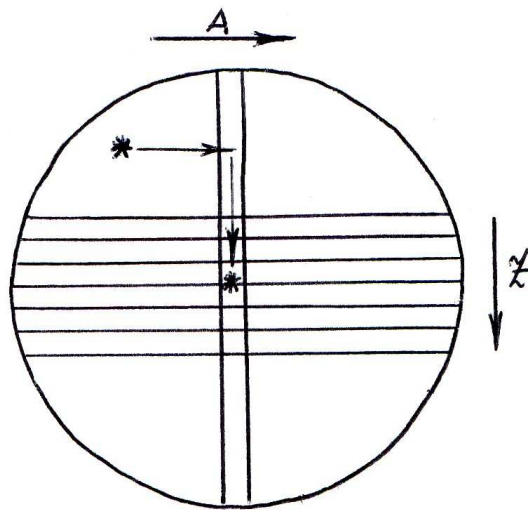


Рис. 3.6: Звезда в поле зрения инструмента

Азимутальным винтом ввести звезду в биссектор. Микрометренным винтом вертикального круга подвести звезду к центральной нити (рис.3.6).

6. В положениях "КРУГ ЛЕВО" и "КРУГ ПРАВО" сделать по четыре наведения средней нити на звезду микрометренным винтом вертикального круга. Момент каждого наведения отмечать по хронометру с точностью до одного удара ($0^s.5$). Каждое наведение сопровождать отсчётами I и II микроскопа-микрометра и алидадного уровня. Звезду в биссекторе удерживать вращением инструмента по азимуту.
7. Для учёта рефракции необходимо измерить температуру воздуха возле инструмента и атмосферное давление.

3.9 Журнал наблюдений

Звезда αUMi Наблюдатель Инструмент 112104
 Дата наблюдения В.В. Витязев Хронометр 3555
 1/2 сентября 1983 г.
 $t = 11^\circ.8$; $P = 763.7$

КРУГ ЛЕВО				
	1	2	3	4
	Хронометр	Уровень	Микроскопы-микрометры	
		л-п	I	II
1	$19^h 10^m 25^s + 7.0$	11.0-30.2	$30^\circ 10' 0'' \text{об} 4' \frac{23''}{26''}$	$210^\circ 10' 1'' \text{об} 0' \frac{35''}{36''}$
2	$19^h 15^m 35^s + 5.0$	10.6-30.0	$30^\circ 10' 0'' \text{об} 3' \frac{19''}{21''}$	$210^\circ 10' 0'' \text{об} 4' \frac{32''}{36''}$
3	$19^h 19^m 25^s + 7.0$	10.9-30.2	$30^\circ 10' 0'' \text{об} 2' \frac{32''}{32''}$	$210^\circ 10' 0'' \text{об} 3' \frac{47''}{48''}$
4	$19^h 22^m 15^s + 5.0$	10.9-30.2	$30^\circ 10' 0'' \text{об} 1' \frac{55''}{54''}$	$210^\circ 10' 0'' \text{об} 3' \frac{10''}{12''}$
КРУГ ПРАВО				
1	$19^h 27^m 15^s + 6.5$	10.9-30.2	$329^\circ 40' 0'' \text{об} 4' \frac{07''}{08''}$	$149^\circ 40' 1'' \text{об} 0' \frac{20''}{22''}$
2	$19^h 31^m 20^s + 4.5$	10.7-30.2	$329^\circ 40' 0'' \text{об} 4' \frac{55''}{56''}$	$149^\circ 40' 1'' \text{об} 1' \frac{11''}{13''}$
3	$19^h 35^m 30^s + 4.0$	10.9-30.2	$329^\circ 40' 1'' \text{об} 0' \frac{48''}{50''}$	$149^\circ 40' 1'' \text{об} 2' \frac{01''}{04''}$
4	$19^h 39^m 10^s + 5.0$	11.0-30.5	$329^\circ 40' 1'' \text{об} 1' \frac{30''}{32''}$	$149^\circ 40' 1'' \text{об} 2' \frac{48''}{50''}$

3.10 Журнал наблюдений

Звезда αLyr Наблюдатель Инструмент 112104
 Дата наблюдения В.В. Витязев Хронометр 3555
 1/2 сентября 1983 г.
 $t = 11^{\circ}.8$; $P = 763.7$

КРУГ ЛЕВО				
	1	2	3	4
	Хронометр	Уровень	Микроскопы-микрометры	
		л-п	I	II
1	$18^h 23^m 40^s + 4.5$	10.0-28.0	$21^{\circ} 10' 0'' \text{об} 1 \frac{54''}{56''}$	$201^{\circ} 10' 0'' \text{об} 3 \frac{13''}{12''}$
2	$18^h 29^m 10^s + 5.0$	10.5-28.5	$21^{\circ} 00' 1'' \text{об} 3 \frac{28''}{31''}$	$201^{\circ} 00' 1'' \text{об} 4 \frac{44''}{48''}$
3	$18^h 33^m 45^s + 3.5$	10.8-29.2	$21^{\circ} 00' 1'' \text{об} 2 \frac{22''}{25''}$	$201^{\circ} 00' 1'' \text{об} 3 \frac{41''}{43''}$
4	$18^h 37^m 45^s + 6.75$	10.5-29.0	$21^{\circ} 00' 1'' \text{об} 2 \frac{31''}{35''}$	$201^{\circ} 00' 1'' \text{об} 3 \frac{53''}{51''}$
КРУГ ПРАВО				
1	$18^h 43^m 20^s + 6.0$	10.5-29.2	$338^{\circ} 40' 1'' \text{об} 0 \frac{07''}{08''}$	$158^{\circ} 40' 1'' \text{об} 1 \frac{26''}{26''}$
2	$18^h 47^m 35^s + 4.5$	10.6-29.6	$338^{\circ} 40' 0'' \text{об} 2 \frac{04''}{01''}$	$158^{\circ} 40' 1'' \text{об} 3 \frac{20''}{21''}$
3	$18^h 51^m 10^s + 4.5$	10.5-29.5	$338^{\circ} 30' 1'' \text{об} 3 \frac{19''}{21''}$	$158^{\circ} 30' 1'' \text{об} 4 \frac{41''}{43''}$
4	$18^h 54^m 40^s + 6.5$	11.0-30.0	$338^{\circ} 30' 0'' \text{об} 3 \frac{54''}{56''}$	$158^{\circ} 30' 1'' \text{об} 0 \frac{14''}{14''}$

3.11 Обработка журнала наблюдений

1 столбец. Перевести удары хронометра в секунды и вычислить моменты наведения средней нити на звезду

T_1, T_2, T_3, T_4 при КЛ;

T_1, T_2, T_3, T_4 при КП.

2 столбец. Вычислить поправки за уровень (наклон алидады микроскопов-микрометров) по формуле

$$\Delta R'' = \pm[(л+п) - m] \frac{\tau''}{2}, \quad (3.41)$$

где

m - старшее деление алидадного уровня,

$\frac{\tau}{2}$ - цена полуделения алидадного уровня.

Знак "+" соответствует положению нуля уровня слева,

Знак "-" соответствует положению нуля уровня справа.

3 и 4 столбцы. Вычислить отсчеты по микроскопам-микрометрам, усредняя значения младшего и старшего штрихов.

5 столбец. Вычислить отсчёты микроскопов, свободные от эксцентриситета и наклона алидады, по формулам

$$L' = \frac{I + II}{2} + \Delta R; \quad R' = \frac{I + II}{2} + \Delta R \quad (3.42)$$

Отсчётам L' и R' приписать градусы, соответствующие показаниям I микроскопа.

Результаты обработки журнала наблюдений (αUMi)

КРУГ ЛЕВО					
	T_i	ΔR	I	II	L'
1	$19^h 10^m 28^s.50$	$1''.44$	$30^\circ 14' 24''.5$	$210^\circ 15' 35''.5$	$30^\circ 15' 01''.44$
2	$19^h 15^m 37^s.50$	$0''.72$	$30^\circ 13' 20''.0$	$210^\circ 14' 34''.0$	$30^\circ 13' 57''.72$
3	$19^h 19^m 38^s.50$	$1''.32$	$30^\circ 12' 32''.0$	$210^\circ 13' 47''.5$	$30^\circ 13' 11''.07$
4	$19^h 22^m 17^s.50$	$1''.32$	$30^\circ 11' 54''.5$	$210^\circ 13' 11''.0$	$30^\circ 12' 34''.07$
КРУГ ПРАВО					
	T_i	ΔR	I	II	R'
1	$19^h 27^m 18^s.25$	$1''.32$	$329^\circ 44' 07''.5$	$149^\circ 45' 21''.0$	$329^\circ 44' 45''.57$
2	$19^h 31^m 22^s.25$	$1''.08$	$329^\circ 44' 55''.5$	$149^\circ 46' 12''.0$	$329^\circ 45' 34''.83$
3	$19^h 35^m 32^s.00$	$1''.32$	$329^\circ 45' 49''.0$	$149^\circ 47' 02''.5$	$329^\circ 46' 27''.07$
4	$19^h 39^m 12^s.50$	$1''.81$	$329^\circ 46' 31''.0$	$149^\circ 47' 49''.0$	$329^\circ 47' 11''.81$

Средний момент наблюдений: $T_0 = 19^h 24^m 50^s.500$.

Поправка хронометра: $u = 1^m 21^s.715$.

Средний момент по звездному времени: $S_\lambda = 19^h 26^m 12^s.215$.

Результаты обработки журнала наблюдений (αLyr)

КРУГ ЛЕВО					
	T_i	ΔR	I	II	L'
1	$18^h 23^m 42^s.25$	$-2''.41$	$21^\circ 11' 55''.00$	$201^\circ 13' 12''.50$	$21^\circ 12' 31''.34$
2	$18^h 29^m 12^s.50$	$-1''.20$	$21^\circ 08' 29''.50$	$201^\circ 09' 46''.00$	$21^\circ 09' 06''.55$
3	$18^h 33^m 46^s.75$	$0''.00$	$21^\circ 07' 23''.50$	$201^\circ 08' 42''.00$	$21^\circ 08' 02''.75$
4	$18^h 37^m 48^s.25$	$-0''.60$	$21^\circ 07' 33''.00$	$201^\circ 08' 52''.00$	$21^\circ 08' 11''.90$
КРУГ ПРАВО					
	T_i	ΔR	I	II	R'
1	$18^h 43^m 23^s.00$	$-0''.36$	$338^\circ 45' 07''.50$	$158^\circ 46' 26''.00$	$338^\circ 45' 46''.39$
2	$18^h 47^m 37^s.25$	$0''.24$	$338^\circ 42' 02''.50$	$158^\circ 43' 20''.50$	$338^\circ 42' 41''.73$
3	$18^h 51^m 12^s.25$	$0''.00$	$338^\circ 38' 20''.00$	$158^\circ 39' 42''.00$	$338^\circ 39' 01''.00$
4	$18^h 54^m 43^s.25$	$1''.20$	$338^\circ 33' 55''.00$	$158^\circ 35' 14''.00$	$338^\circ 34' 35''.70$

Средний момент наблюдений: $T_0 = 18^h 39^m 12^s.750$.

Поправка хронометра: $u = 1^m 21^s.755$.

Средний момент по звездному времени:

$S_\lambda = 18^h 40^m 34^s.505$.

3.11.1 Широта по Полярной звезде. Видимые места

$$S_{\lambda} = 19^h 26^m 12^s.215$$

$$\lambda = 2^h 01^m 10^s.771$$

$$S = 17^h 25^m 01^s.444$$

$$\alpha = 2^h 15^m$$

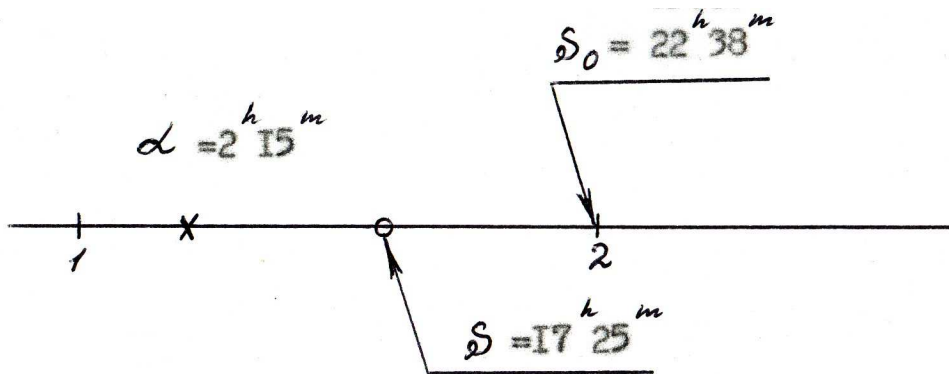
$$S - \alpha = 15^h 10^m = 15^h.167$$

$$n = \frac{S - \alpha}{24} = 0.632$$

$\alpha U M i$

$$\text{сент.1.2} \quad 2^h 15^m 31^s.18 \quad 89^\circ 11' 05'' .39 \quad (\text{из А.Е})$$

$$2.1 \quad 32^s.71 \quad 05'' .67$$



$$\delta = 89^\circ 11' 05'' .39 + 0.632(5.67 - 5.39) = 89^\circ 11' 05'' .57$$

$$\alpha = 2^h 15^m 31^s.18 + 0.632(32.71 - 31.18) = 2^h 15^m 32^s.147$$

$$U = 1^m 21^s.715$$

$$\alpha - U = 2^h 14^m 10^s.432$$

$$12 + \alpha - U = 14^h 14^m 10^s.432$$

3.11.2 Широта по Полярной звезде. Рефракция, вспомогательные величины

$z_1=30^\circ 15' 01''.44$	$\mu=1.7640$	$\lambda_\gamma=-27.8$
$z_8=30^\circ 12' 48''.19$	$\lg \operatorname{tg} z=9.7655$	$B=21.1$
$z=30^\circ 13' 54''.82$	1.5295	-6.7
$t=11^\circ.8$	-7	
$P=763.7$	$\lg \rho=1.5288$	
	$\rho=33''.80$	
$\varphi_0=59^\circ 56'$	$\cos \varphi_0=0.501008$	
$\delta=89^\circ 11' 05''.57$	$\cos \delta=0.0142275$	
$\varphi_0 + \delta=149^\circ 07' 05.57$		
$\zeta_0=180^\circ - (\varphi_0 + \delta)=30^\circ 52' 54''.43$		
$\sin \zeta_0=0.513267$	$\lambda = 412530 \frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin \zeta_0} = 5729.08$	
$\operatorname{ctg} \zeta_0=1.672089$	$\frac{\operatorname{ctg} \zeta_0}{412530} = 4.053254 \cdot 10^{-6}$	
	$\frac{\operatorname{ctg}^2 \zeta_0 + \frac{1}{3}}{2 \cdot 206265^2} = 3.6775136 \cdot 10^{-11}$	

Расчетные формулы (широта по Полярной звезде):

$$t = T - (12 + \alpha - U);$$

$$\lambda = 412530 \frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin \zeta_0};$$

$$\rho = \lambda \sin^2 \frac{t}{2};$$

$$r = \rho + \rho^2 \frac{\operatorname{ctg} \zeta_0}{412530} + \rho^3 \frac{\operatorname{ctg}^2 \zeta_0 + \frac{1}{3}}{2 \cdot 206265^2};$$

$$(L) = \frac{1}{4} \sum_i L_i; \quad (R) = \frac{1}{4} \sum_i R_i;$$

$$L = L' + r; \quad R = R' - r;$$

$$M_z = \frac{1}{2} [(L) + (R) - 360^\circ].$$

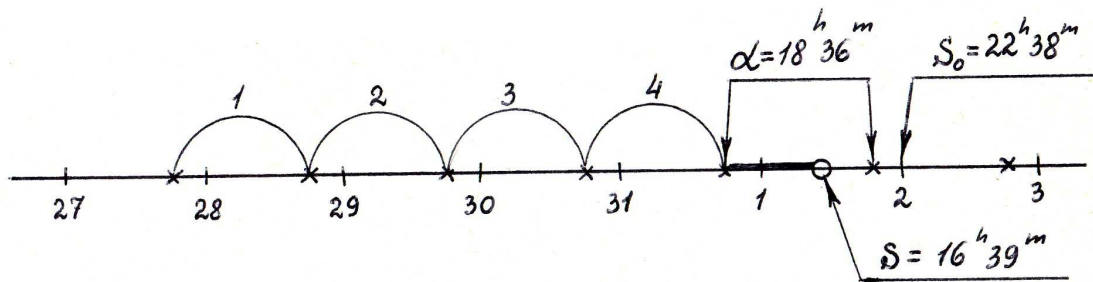
Вычисление широты по Полярной звезде

Величины	КРУГ ЛЕВО				КРУГ ПРАВО			
	1	2	3	4	1	2	3	4
T	$19^h 10^m 28^s .50$	$19^h 15^m 37^s .50$	$19^h 19^m 28^s .50$	$19^h 22^m 17^s .50$	$19^h 27^m 18^s .25$	$19^h 31^m 22^s .25$	$19^h 35^m 32^s .00$	$19^h 39^m 12^s .50$
$12^h + \alpha - U$	$14^h 14^m 10^s .432$							
t	$4^h 56^m 18^s .068$	$5^h 01^m 27^s .068$	$5^h 05^m 18^s .068$	$5^h 08^m 07^s .068$	$5^h 13^m 07^s .818$	$5^h 17^m 11^s .818$	$5^h 21^m 21^s .568$	$5^h 25^m 02^s .068$
$\sin^2 \frac{t}{2}$	0.36281	0.37365	0.38179	0.38777	0.39846	0.40716	0.41610	0.42401
λ	5729.08							
ρ	2078.58	2140.67	2187.33	2221.59	2282.79	2332.65	2383.85	2429.20
r	$34'56'' .42$	$35'59'' .61$	$36'47'' .10$	$37'21'' .99$	$38'24'' .35$	$39'15'' .17$	$40'07'' .39$	$40'53'' .64$
L', R'	$30^\circ 15' 01'' .44$	$30^\circ 13' 57'' .72$	$30^\circ 13' 11'' .07$	$30^\circ 12' 34'' .07$	$329^\circ 44' 45'' .57$	$329^\circ 45' 34'' .83$	$329^\circ 46' 27'' .07$	$329^\circ 47' 11'' .83$
L, R	$30^\circ 49' 57'' .86$	$30^\circ 49' 57'' .33$	$30^\circ 49' 58'' .17$	$30^\circ 49' 56'' .06$	$329^\circ 06' 21'' .22$	$329^\circ 06' 19'' .68$	$329^\circ 06' 19'' .68$	$329^\circ 06' 18'' .19$
$(L), (R)$	$30^\circ 49' 57'' .36$				$329^\circ 06' 19'' .69$			
M_z	$-1'51'' .48$							
$(L) - M_z$	$30^\circ 51' 48'' .84$							
$refr$	$33'' .80$							
z	$30^\circ 52' 22'' .64$							
δ	$89^\circ 11' 05'' .57$							
$z + \delta$	$120^\circ 03' 28'' .21$							
φ	$59^\circ 56' 31'' .79$							

3.11.3 Широта по "южной" звезде. Видимые места

$$\begin{array}{r}
 S_{\lambda} = 18^h 40^m 34^s.505 \\
 \lambda = 2^h 01^m 10^s.771 \\
 \hline
 S = 16^h 39^m 23^s.734 \\
 \alpha = 18^h 36^m \\
 \hline
 S - \alpha = 22^h 03^m = 22^h.050
 \end{array}$$

авг. 27.8	18 ^h 36 ^m 23 ^s .383	38°45'76".74	
	215		128(Из А.Е.)
сент. 6.8	23 ^s .118	78".02	



$$n = \frac{1}{10} \left[4 + \frac{(S - \alpha)^h}{24^h} \right] = \frac{1}{10} [4 + 0.918] = 0.492;$$

$$\delta = 38^\circ 45' 76''.74 + 1''.28 \times 0.492 = 38^\circ 46' 17''.37;$$

$$\alpha = 18^h 36^m 23^s.333 - 0.215 \times 0.492 = 18^h 36^m 23^s.227;$$

$$U = 1^m 21^s.755;$$

$$\alpha - U = 18^h 35^m 01^s.472.$$

3.11.4 Широта по "южной" звезде. Рефракция, вспомогательные величины

Рефракция

$z_1=21^\circ 12' 31''.34$	$\mu=1.7641$	$\lambda_\gamma=-27.8$
$z_8=21^\circ 25' 24''.30$	$\lg \operatorname{tg} z=9.5913$	$B=21.1$
$z=21^\circ 18' 57''.82$	1.3554	-6.7
$t=11^\circ.8$	-7	
$P=763.7$	$\lg \rho=1.3547$	
	$\rho=22''.63$	

$\varphi_0=59^\circ 56'$	$\cos \varphi_0=0.501008$
$\delta=38^\circ 46' 17''.37$	$\cos \delta=0.779650$
$\zeta_0=21^\circ 09' 42''.63$	
$\sin \zeta_0=0.361003$	$\lambda = 412530 \frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin \zeta_0} = 446363.8$
$\operatorname{ctg} \zeta_0=2.58326$	$\frac{\operatorname{ctg} \zeta_0}{412530} = 0.626198 \cdot 10^{-5}$

Расчетные формулы (широта по южной звезде):

$$t = T - (\alpha - U); \quad \lambda = 412530 \frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin \zeta_0}; \quad \rho = \lambda \sin^2 \frac{t}{2};$$

$$r = \rho - \rho^2 \frac{\operatorname{ctg} \zeta_0}{412530} + \rho^3 \frac{\operatorname{ctg}^2 \zeta_0 + \frac{1}{3}}{2 \cdot 206265^2};$$

$$(L) = \frac{1}{4} \sum_i L_i; \quad (R) = \frac{1}{4} \sum_i R_i;$$

$$L = L' - r; \quad R = R' + r;$$

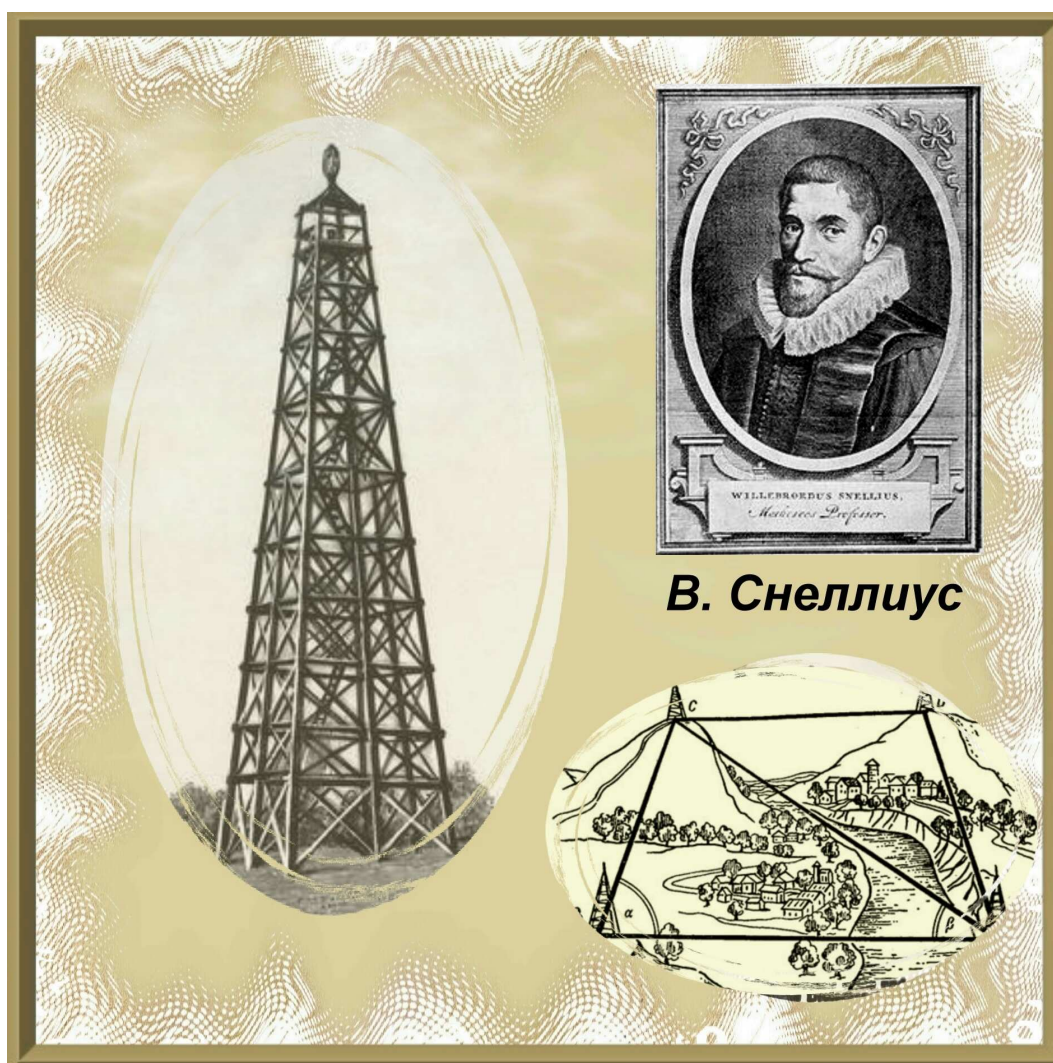
$$M_z = \frac{1}{2} [(L) + (R) - 360^\circ].$$

Вычисление широты по Южной звезде

Величины	КРУГ ЛЕВО				КРУГ ПРАВО			
	1	2	3	4	1	2	3	4
T	$18^h 23^m 42^s .25$	$18^h 29^m 12^s .50$	$18^h 33^m 46^s .75$	$18^h 37^m 48^s .25$	$18^h 43^m 23^s .00$	$18^h 47^m 37^s .25$	$18^h 51^m 12^s .25$	$18^h 54^m 43^s .25$
$\alpha - U$	$18^h 35^m 01^s .472$							
t	$-11^m 19^s .222$	$-5^m 48^s .972$	$-1^m 14^s .722$	$2^m 46^s .778$	$8^m 21^s .528$	$12^m 35^s .778$	$16^m 10^s .778$	$19^m 41^s .778$
$\sin^2 \frac{t}{2}$	$0.60982 \cdot 10^{-3}$	$0.16100 \cdot 10^{-3}$	$0.7381 \cdot 10^{-5}$	$0.3677 \cdot 10^{-4}$	$0.33252 \cdot 10^{-3}$	$0.75501 \cdot 10^{-3}$	$0.12455 \cdot 10^{-2}$	$0.18453 \cdot 10^{-2}$
λ	446363.8							
ρ	$272'' .20$	$71'' .86$	$3'' .29$	$16'' .41$	$148'' .42$	$337'' .01$	$555'' .93$	$823'' .69$
r	$271'' .74$	$71'' .83$	$3'' .29$	$16'' .41$	$148'' .29$	$336'' .30$	$553'' .99$	$819'' .44$
L', R'	$21^\circ 12' 31'' .34$	$21^\circ 09' 06'' .55$	$21^\circ 08' 02'' .75$	$21^\circ 08' 11'' .90$	$338^\circ 45' 46'' .39$	$338^\circ 42' 41'' .73$	$338^\circ 39' 01'' .00$	$338^\circ 34' 35'' .70$
L, R	$21^\circ 07' 59'' .60$	$21^\circ 07' 54'' .71$	$21^\circ 07' 59'' .46$	$21^\circ 07' 55'' .49$	$338^\circ 48' 14'' .67$	$338^\circ 48' 18'' .03$	$338^\circ 48' 15'' .00$	$338^\circ 48' 15'' .14$
$(L), (R)$	$21^\circ 07' 57'' .31$				$338^\circ 48' 15'' .72$			
M_z	$-1' 53'' .48$							
$(L) - M_z$	$21^\circ 09' 50'' .79$							
rfr	$22'' .55$							
$(L) - M_z + rfr$	$21^\circ 10' 13'' .34$							
δ	$38^\circ 46' 17'' .37$							
φ	$59^\circ 56' 30'' .71$							

Глава 4

Определение азимута земного предмета



4.1 Азимут и место юга на круге

Азимутом объекта при наблюдении с пункта C называется угол, лежащий в плоскости горизонта, заключенный между плоскостью меридиана места и плоскостью, проходящей через направление на объект.

Азимут называется астрономическим, если он отсчитывается от точки юга S в направлении на запад. Астрономический азимут

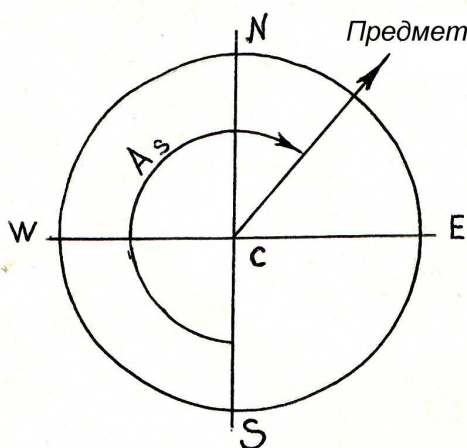


Рис. 4.1: Астрономический азимут

изменяется от 0° до 360° (рис.4.1). Азимут называется геодезическим, если он отсчитывается от точки севера N в направлении на восток. Геодезический азимут также изменяется от 0° до 360° (рис.4.2). Обозначая через A_S и A_N соответственно астрономический и геодезический азимуты, имеем очевидную связь:

$$A_S = A_N + 180^\circ. \quad (4.1)$$

В дальнейшем, опуская индекс S при обозначении азимута, мы будем считать все азимуты астрономическими.

Азимутальные измерения используются в триангуляции¹. Кроме того, знание азимута направления с пункта C на удаленный

¹Триангуляция - метод определения положения опорных геодезических пунктов на местности путем построения системы смежных треугольников, в которых измеряются углы. При известной длине стороны одного треугольника длины других сторон вычисляются. Триангуляция, предложенная в 1614 г. голландским астрономом В. Снеллиусом, является основным методом создания опорных геодезических сетей.

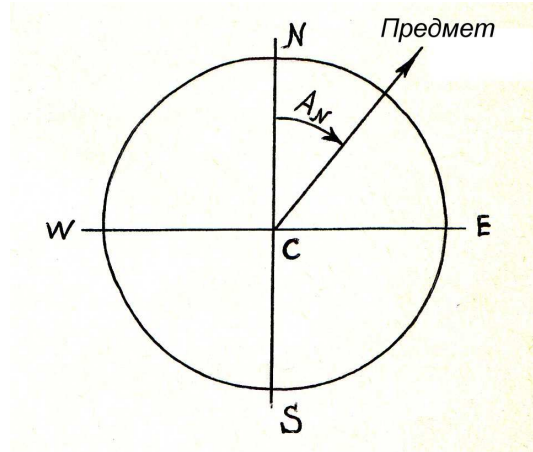


Рис. 4.2: Геодезический азимут

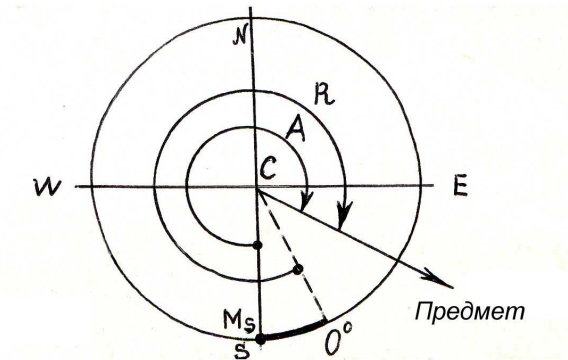


Рис. 4.3: Место юга на горизонтальном круге инструмента

неподвижный предмет позволяет зафиксировать направление меридиана, проходящего через точку C . Фактически это сводится к установлению на горизонтальном круге универсального инструмента так называемого места юга M_S , то есть такого отсчёта, который соответствует направлению на юг (рис.4.3). При этом

$$M_S = R - A, \quad (4.2)$$

где R - отсчёт горизонтального круга при наведении трубы на предмет, азимут A которого известен. С практической точки зрения удобно иметь место юга на круге как можно меньшим. На многих инструментах этого можно добиться путём вращения горизонтального круга до тех пор, пока с заданной точностью не будет выполняться равенство $R = A$.

4.2 Определение азимута и зенитного расстояния светил

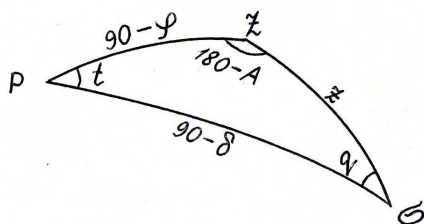


Рис. 4.4: Параллактический треугольник

В основе метода определения азимута земного предмета лежит следующая идея: разность двух отсчётов горизонтального круга равна разности азимутов двух направлений. Если азимут одного из них известен, то легко вычисляется и азимут второго направления. Естественно в качестве такого азимута-репера взять азимут небесного светила. Действительно, пусть на широте φ в момент T по звёздному хронометру с поправкой U известны видимые координаты α и δ светила σ . Из параллактического треугольника $Pz\sigma$ (рис.4.4) имеем

$$\sin z \sin A = \sin t \cos \delta, \quad (4.3)$$

$$\sin z \cos A = -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t, \quad (4.4)$$

где

$$t = T + U - \alpha. \quad (4.5)$$

Из формул (4.3) и (4.4) находим

$$\operatorname{tg} A = \frac{\sin t \cos \delta}{-\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t}. \quad (4.6)$$

Введя обозначения

$$m = \operatorname{ctg} \delta \sec \varphi, \quad (4.7)$$

$$n = \operatorname{ctg} \delta \operatorname{tg} \varphi, \quad (4.8)$$

перепишем формулу (4.6) следующим образом

$$\operatorname{tg} A = -\frac{m \sin t}{1 - n \cos t}. \quad (4.9)$$

С помощью этой формулы вычисляется азимут светила. Четверть, в которой находится светило, легко устанавливается с помощью правила знаков, следующего из формул (4.3) и (4.4):

$$\text{sign}[\sin A] = \text{sign}[\sin t], \quad (4.10)$$

$$\text{sign}[\cos A] = \text{sign}[-1 + n \cos t]. \quad (4.11)$$

После того как азимут светила найден, его зенитное расстояние можно вычислить по формуле

$$\sin z = \frac{\cos \delta \sin t}{\sin A}. \quad (4.12)$$

4.3 Наилучшие условия наблюдений

Выясним теперь, при каких условиях ошибки в наблюденном моменте ΔT , в поправке часов ΔU и в широте $\Delta \varphi$ дают наименьшую ошибку в определяемом азимуте. Для этого перепишем равенство (4.6) в следующем виде:

$$\sin t \operatorname{ctg} A + \operatorname{tg} \delta \cos \varphi - \sin \varphi \cos t = 0. \quad (4.13)$$

Считая α и δ точными, продифференцируем (4.13) по переменным t , φ и A . Заменяя дифференциалы конечными приращениями, находим

$$\begin{aligned} -\frac{\sin t}{\sin^2 A} \Delta A + (\cos t \operatorname{ctg} A + \sin \varphi \sin t) \Delta t - \\ - (\operatorname{tg} \delta \sin \varphi + \cos \varphi \cos t) \Delta \varphi = 0, \end{aligned} \quad (4.14)$$

откуда

$$\begin{aligned} \Delta A = \frac{(\cos t \operatorname{ctg} A + \sin \varphi \sin t) \sin^2 A}{\sin t} \Delta t - \\ - \frac{(\operatorname{tg} \delta \sin \varphi + \cos \varphi \cos t) \sin^2 A}{\sin t} \Delta \varphi. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Из параллактического треугольника $Pz\sigma$ имеем

$$\cos q = \cos t \cos A + \sin t \sin A \sin \varphi, \quad (4.16)$$

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t. \quad (4.17)$$

С учётом равенств (4.16), (4.17), (4.3) и (4.5) из (4.15) получаем

$$\Delta A = \frac{\cos q \cos \delta}{\sin z} (\Delta T + \Delta U) - \operatorname{ctgz} \sin A \Delta \varphi. \quad (4.18)$$

Из этой формулы видно, что ошибка $\Delta T + \Delta U$ наименьшим образом скажется на определении азимута, если наблюдать светило вблизи элонгаций ($q = 90^\circ$) или если наблюдать звёзды, склонения которых близки к 90° . В свою очередь, ошибка в широте $\Delta \varphi$ окажет наименьшее воздействие на азимут, если светило наблюдается либо в меридиане ($A = 0^\circ$ или $A = 180^\circ$), либо вблизи горизонта, когда z близко к 90° .

Перечисленным условиям хорошо удовлетворяет Полярная звезда, которая близка к полюсу и даже в элонгациях недалеко удаляется от меридиана. Кроме того, для определения азимута земного предмета можно наблюдать Солнце (утром или вечером, на больших зенитных расстояниях). В этом случае коэффициент при $\Delta \varphi$ будет близок к нулю, а коэффициент при $\Delta T + \Delta U$ - наименьший. Следует, однако, отметить, что азимут земного предмета из наблюдений Полярной получается точнее, чем из наблюдений Солнца.

4.4 Поправки отсчётов горизонтального круга

Отсчёты горизонтального круга, соответствующие наведению трубы на предмет или светило, будем обозначать символами КЛ и КП в зависимости от того, получены ли они в положении инструмента "КРУГ ЛЕВО" или "КРУГ ПРАВО". Эти отсчёты вычисляются по формулам

$$\text{КЛ} = \frac{1}{2}(A+B); \quad \text{КП} = \frac{1}{2}(A+B), \quad (4.19)$$

где через A и B обозначены отсчёты одноимённых микроскопов-микрометров горизонтального круга. В отсчёты КЛ и КП, хотя они и свободны от ошибки эксцентриситета алидады горизонтального круга, необходимо ввести ещё некоторые поправки

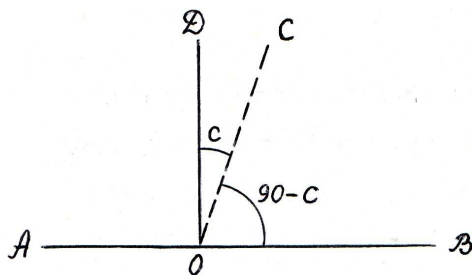


Рис. 4.5: Определение коллимации

4.4.1 Поправка за ошибку коллимации

Коллимацией называется отличие угла между осью трубы OC и горизонтальной осью инструмента AB от 90° (рис. 4.5).

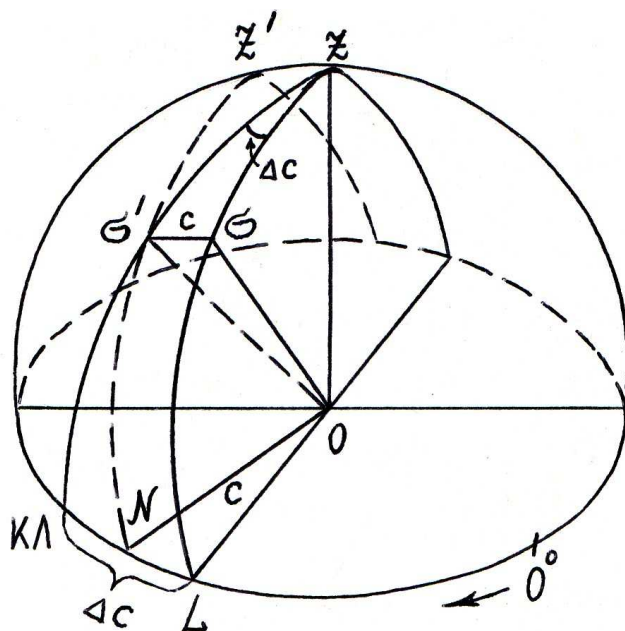


Рис. 4.6: К определению коллимации

Получим формулы для вычисления поправок отсчёта горизонтального круга за влияние ошибки коллимации. На рис. 4.6 дуга zL - вертикал, который описывает на небесной сфере ось трубы при отсутствии коллимации, а $z'N$ - малый круг, который описывает ось трубы при наличии коллимации c . При фиксированном зенитном расстоянии z две точки σ' и σ , лежащие на одном альмукантарате на угловом расстоянии c , имеют азимуты,

различающиеся на величину

$$\Delta c = \text{КЛ} - L, \quad (4.20)$$

где через КЛ обозначен отсчёт горизонтального круга, отягощённый коллимационной ошибкой, а через L - отсчёт, свободный от неё.

Из треугольника $\sigma'\sigma z$ имеем

$$\frac{\sin c}{\sin \Delta c} = \frac{\sin z}{1}, \quad (4.21)$$

откуда ввиду малости c и Δc получаем

$$\Delta c = c \csc z. \quad (4.22)$$

Если повернуть инструмент на 180° вокруг вертикальной оси, то коллимационная ошибка c будет иметь противоположный знак. Поэтому, обозначая через R исправленный за ошибку коллимации отсчёт горизонтального круга в положении "круг право", запишем искомые формулы в окончательном виде

$$L = \text{КЛ} - c \csc z, \quad (4.23)$$

$$R = \text{КП} + c \csc z \quad (4.24)$$

Из этих выражений видно, что полусумма отсчётов

$$\frac{1}{2}(L + R) = \frac{\text{КЛ} + \text{КП}}{2}$$

свободна от ошибки коллимации. Поэтому при определении азимутов измерения производят дважды: в положениях инструмента "КРУГ ЛЕВО" и "КРУГ ПРАВО".

4.4.2 Поправка за наклонность горизонтальной оси

В идеальном инструменте вертикальная ось направлена в зенит, а оптическая ось трубы описывает вертикал $z\sigma L$. Если горизонтальная ось наклонена на угол b , то оптическая ось описывает большой круг $z'\sigma\text{КЛ}$. Здесь через КЛ обозначен отсчёт горизонтального круга, отягощенный ошибкой наклона горизонтальной оси, а через L - отсчёт, свободный от неё. При этом

$$L = \text{КЛ} + \Delta b, \quad (4.25)$$

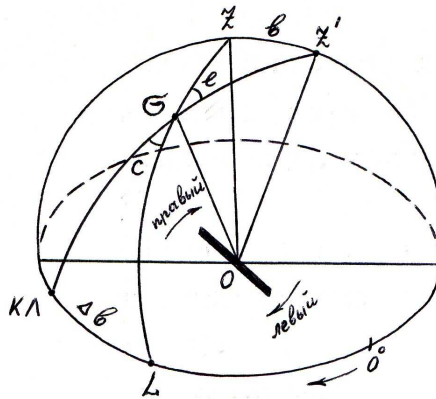


Рис. 4.7: Наклонность вертикальной оси

где Δb - поправка отсчёта. Из прямоугольных треугольников $z\sigma z'$ и $K\sigma L$ имеем

$$\sin z \cdot \operatorname{ctg} b = \operatorname{ctg} e, \quad (4.26)$$

$$\cos z \cdot \operatorname{ctg} \Delta b = \operatorname{ctg} e, \quad (4.27)$$

откуда

$$\sin z \cdot \operatorname{ctg} b = \cos z \cdot \operatorname{ctg} \Delta b \quad (4.28)$$

Ввиду малости величин b и Δb из (4.28) получаем

$$\Delta b = b \operatorname{ctg} z. \quad (4.29)$$

В частности, при наведении на земной предмет ($z = 90^\circ$) $\Delta b = 0$.

Наклонность горизонтальной оси инструмента измеряется с помощью накладного уровня. Отсчёты по накладному уровню делают, находясь всё время позади инструмента и глядя в том направлении, куда направлен объектив

Рассмотрим правило вычисления наклонности b . Из рис. 4.8 следует, что $\Delta b < 0$. Следовательно, правый конец уровня приподнят. Здесь могут представиться два случая: нуль уровня слева и нуль уровня справа

$$i_1 = [m - (\lambda + \pi)] < 0, \quad i_2 = [(\lambda + \pi) - m] < 0.$$



Рис. 4.8: Ситуация $\Delta b < 0$.

В том случае, когда $\Delta b > 0$, будет приподнят левый конец уровня. Здесь также возможны две аналогичные ситуации (рис.4.9)

$$i_1 = [m - (л+п)] > 0, \quad i_2 = [(л+п) - m] > 0.$$



Рис. 4.9: Ситуация $\Delta b > 0$.

В приведенных формулах i_1 , i_2 - наклонность оси уровня, m - старшее деление уровня, л, п - соответственно левый и правый отсчёты пузырька.

Между осью уровня и горизонтальной осью инструмента имеется некоторый угол, который называется нуль-пунктом уровня. Для его исключения делают перекидку уровня. Поэтому истинный наклон вычисляется по формуле

$$b = \frac{i_1 + i_2}{2} \frac{\tau}{2}, \quad (4.30)$$

где τ - цена деления накладного уровня.

4.4.3 Поправка за окулярный микрометр

При высокоточных измерениях азимута используется окулярный микрометр. Окулярный микрометр - это точный угломерный при-

бор, позволяющий измерять угловые расстояния между объектами, находящимися в поле зрения трубы. Такие измерения производятся посредством наведения на объекты центральной нити или одной из нитей биссектора. Наведение производится путем вращения оцифрованного барабана окулярного микрометра. Вращение барабана в сторону возрастания его отсчётов вызывает перемещение рабочей нити, называемое рабочим ходом. Для исключения мёртвого хода микрометрического винта микрометра наведение на объект всегда нужно производить в направлении рабочего хода. Окулярный микрометр устроен так, что полному обороту барабана соответствует перемещение рабочей нити ровно на один зубец гребёнки. Нумерация зубцов возрастает в сторону рабочего хода, при этом центральному зубцу условно приписывают значение 10.

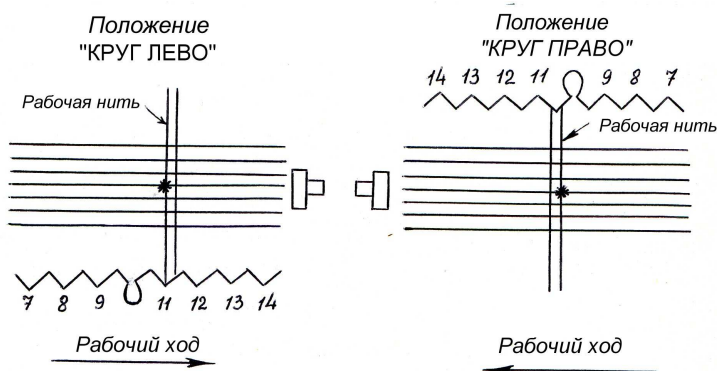


Рис. 4.10: Наведение рабочей нити на звезду

На рис. 4.10 показано наведение рабочей нити (выбрана та нить биссектора, которая более удалена от барабана микрометра) на звезду, находящуюся вблизи горизонта. Угловое расстояние звезды от плоскости, задаваемой центральным зубцом гребёнки, равно $(M - 10)R \pm \frac{b}{2}R$, где целая часть M равна номеру ближайшего к рабочей нити зубца гребёнки, а дробная часть - отсчёт барабана (барабан разделен на 100 частей, третий знак в M , то есть тысячные доли, считаются приблизительно), R - цена оборота барабана окулярного микрометра, b - угловое расстояние между нитями биссектора.

Очевидно, что измеряемое микрометром угловое смещение от

направления задаваемого центральным зубцом гребёнки равно- сильно появлению искусственной коллимации. Поэтому учёт по- казаний окулярного микрометра даёт нам величины

$$L = \text{КЛ} + (M - 10)R \csc z - \frac{b}{2}R \csc z, \quad (4.31)$$

$$R = \text{КП} - (M - 10)R \csc z + \frac{b}{2}R \csc z, \quad (4.32)$$

где z - зенитное расстояние наблюдаемого светила. Обращаем внимание, что для инструментов фирмы "Bamberg" в формулах (4.31) и (4.32) вторые члены следует взять с противоположны- ми знаками. Таким образом, истинные отсчёты горизонтального круга L и R получаются путём коррекции наблюденных отсчётов КЛ и КП за ошибки коллимации и наклона горизонтальной оси инструмента, а также за использование окулярного микрометра. Эта коррекция осуществляется по формулам

$$L = \text{КЛ} - c \csc z - b \operatorname{ctg} z + (M - 10)R \csc z - \frac{b}{2}R \csc z, \quad (4.33)$$

$$R = \text{КП} + c \csc z - b \operatorname{ctg} z - (M - 10)R \csc z + \frac{b}{2}R \csc z. \quad (4.34)$$

Отметим, что при наблюдениях Солнца окулярный микрометр не используется. В этом случае последние два слагаемые в фор- мулах (4.33) и (4.34) опускаются.

4.5 Влияние суточной аберрации

Как известно, явление суточной аберрации проявляется в сме- щении наблюдаемого изображения светила σ' от его действитель- ного положения σ по дуге большого круга $\sigma'E$ на величину

$$\sigma\sigma' = 0''.32 \cos \varphi \sin \sigma E. \quad (4.35)$$

Из вычислений по формуле (4.9) мы получаем азимут A истин- ного положения светила σ , а измерения с помощью горизонталь- ного круга дают нам азимут смещённого светила A' .

Из треугольника $\sigma z \sigma'$ имеем

$$\frac{\sin(A' - A)}{\sin \sigma\sigma'} = \frac{\sin z \sigma E}{\sin z}, \quad (4.36)$$

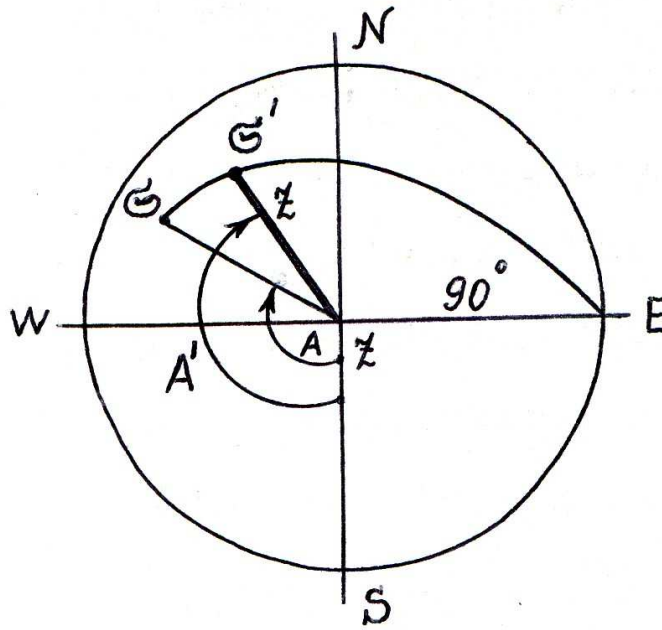


Рис. 4.11: Суточная абберация

откуда ввиду малости $A' - A$ и $\sigma\sigma'$ находим

$$A' - A = \sigma\sigma' \frac{\sin z\sigma E}{\sin z}. \quad (4.37)$$

Из треугольника $\sigma z E$ получаем

$$\frac{\sin z\sigma E}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin(270^\circ - A)}{\sin \sigma E}, \quad (4.38)$$

откуда следует

$$\sin z\sigma E = -\frac{\cos A}{\sin \sigma E}. \quad (4.39)$$

Подставляя (4.35) и (4.39) в (4.37), имеем

$$A' = A - 0''.32 \cos \varphi \csc z \cos A. \quad (4.40)$$

Эта формула учитывает эффект суточной абберации при редукции вычисленных азимутов к наблюдаемым.

4.6 Вычисление азимута предмета и места юга

Введём следующие обозначения (рис. 4.12):

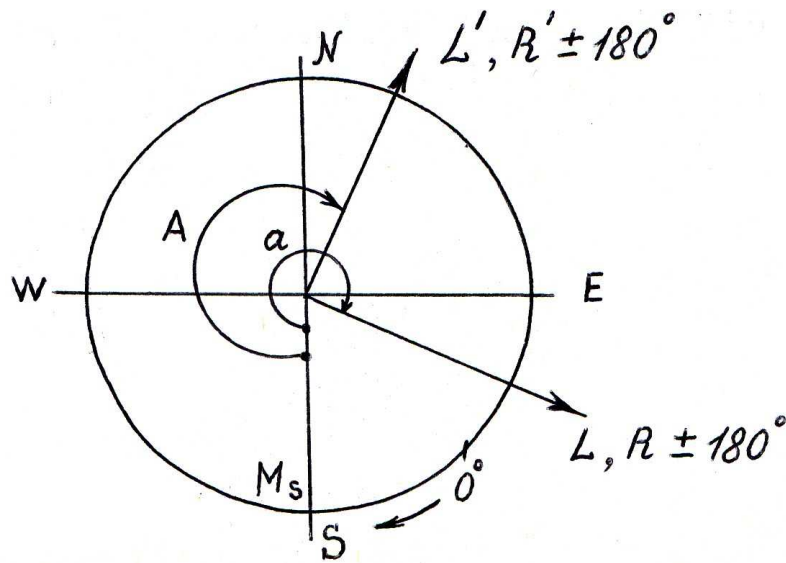


Рис. 4.12: Отсчеты горизонтального круга

L, R - отсчёты горизонтального круга при наведении на предмет, исправленные за наклонность горизонтальной оси инструмента и учитывающие показания окулярного микрометра (если он использовался)

L', R' - то же при наведении на светило;

a - искомый азимут земного предмета;

A_L, A_R - азимуты светила, соответствующие моментам наведения в положениях "КРУГ ЛЕВО" и "КРУГ ПРАВО" соответственно;

c - коллимация инструмента;

M_S - место юга на круге.

По результатам наведения трубы на предмет имеем следующие уравнения:

$$L - c = M_S + a, \quad (4.41)$$

$$R \pm 180^\circ + c = M_S + a, \quad (4.42)$$

откуда получаем

$$a = \frac{L + [R \pm 180^\circ]}{2} - M_S, \quad (4.43)$$

$$c = \frac{L - [R \pm 180^\circ]}{2}. \quad (4.44)$$

Значение коллимации, вычисленное по формуле (4.44), будем обозначать c_1 и называть "коллимацией по предмету".

Аналогично, по результатам наблюдения светила, запишем следующие уравнения:

$$L' - c \operatorname{csc} z_L = M_S + A_L - 0''.32 \cos \varphi \operatorname{csc} z_L \cos A_L, \quad (4.45)$$

$$[R' \pm 180^\circ] + c \operatorname{csc} z_R = M_S + A_R - 0''.32 \cos \varphi \operatorname{csc} z_R \cos A_R, \quad (4.46)$$

где z_L и z_R - зенитные расстояния светила, соответствующие моментам наведения в положениях "КРУГ ЛЕВО" и "КРУГ ПРАВО".

Перепишем уравнения (4.45) и (4.46) в виде

$$M_L - c \operatorname{csc} z_L + 0''.32 \cos \varphi \operatorname{csc} z_L \cos A_L = M_S, \quad (4.47)$$

$$M_R + c \operatorname{csc} z_R + 0''.32 \cos \varphi \operatorname{csc} z_R \cos A_R = M_S, \quad (4.48)$$

где введены обозначения

$$M_L = L' - A_L; \quad M_R = R' \pm 180^\circ - A_R. \quad (4.49)$$

Очевидно, что величины M_L и M_R представляют собой значения места юга на круге, полученные по измерениям в двух положениях инструмента (без учёта коллимации и абберации).

Из уравнений (4.47) и (4.48) находим

$$c = \frac{M_L - M_R}{p} + \frac{0''.64q' \cos \varphi}{p}, \quad (4.50)$$

где

$$p = \operatorname{csc} z_L + \operatorname{csc} z_R, \quad (4.51)$$

$$2q' = \operatorname{csc} z_L \cos A_L - \operatorname{csc} z_R \cos A_R. \quad (4.52)$$

Значение коллимации, вычисленное по формуле (4.50), будем обозначать c_2 и называть "коллимацией по светилу". Значения c_1 и c_2 , как правило, не совпадают из-за случайных ошибок измерений. При хорошем состоянии инструмента их разность не превышает удвоенной точности измерения с помощью горизонтального круга. Принимая за окончательное значение коллимации величину

$$c = \frac{1}{2}(c_1 + c_2), \quad (4.53)$$

из уравнений (4.47) и (4.48) для места юга получаем

$$M_S = \frac{M_L + M_R}{2} - qc + 0''.16p' \cos \varphi, \quad (4.54)$$

где

$$p' = \csc z_L \cos A_L + \csc z_R \cos A_R \quad (4.55)$$

$$2q = \csc z_L - \csc z_R. \quad (4.56)$$

Искомый азимут земного предмета можно теперь получить по формуле (4.44) при учете (4.54).

Полученные формулы дают строгое решение задачи об определении азимута земного предмета и места юга на круге. Рассмотрим два частных случая, для которых эти формулы можно несколько упростить.

1. При наблюдениях Полярной звезды с достаточной для нас точностью можно принять $\cos A_L = \cos A_R = -1$. Из выражений (4.52) и (4.56) находим $q' = -q$; $p' = -p$. Поэтому вместо (4.50) и (4.54) имеем:

$$c = \frac{M_L - M_R}{p} - \frac{0''.64q \cos \varphi}{p}, \quad (4.57)$$

$$M_S = \frac{M_L + M_R}{2} - qc - 0''.16p \cos \varphi. \quad (4.58)$$

2. При наблюдениях Солнца (обычно вблизи первого вертикала) можно положить $\cos A_L = \cos A_R = 0$. В этом случае имеем $q' = 0$; $p' = 0$. Формулы (4.50) и (4.54) приобретают теперь следующий вид:

$$c = \frac{M_L - M_R}{p}, \quad (4.59)$$

$$M_S = \frac{M_L + M_R}{2} - qc. \quad (4.60)$$

4.7 Инструкция по наблюдению Полярной звезды

Наблюдения выполняются во время вечерних или утренних сумерек, когда можно наблюдать и предмет и Полярную звезду. Для наблюдений следует:

1. Отрегулировать инструмент.
2. Установить инструмент в меридиан (по смыслу выполняемой

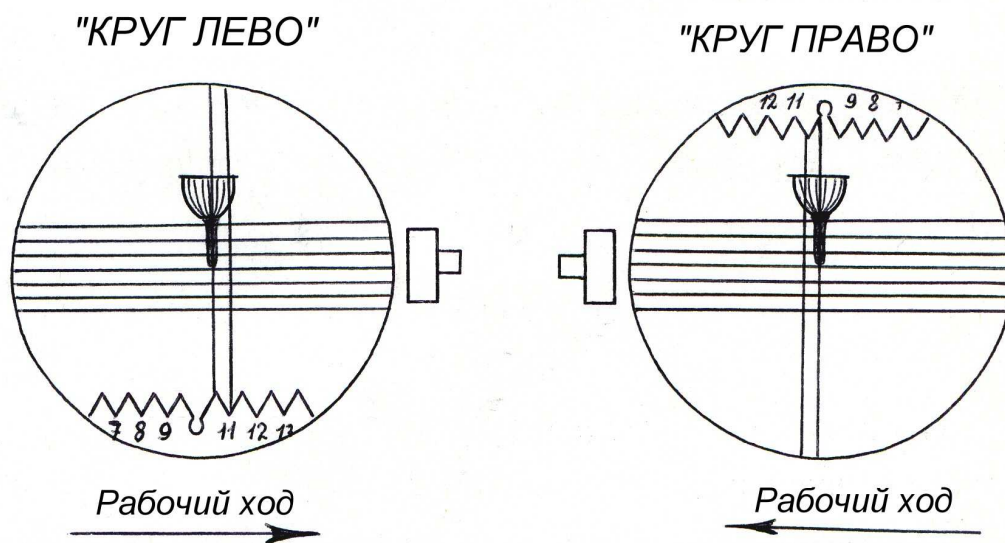


Рис. 4.13: Наведение рабочей нити на предмет

работы этот пункт не обязателен, однако близость места юга на круге к нулю облегчает наведение трубы на Полярную звезду).

3. Проверить горизонтальность нитей.

4. Выбрать одну из нитей биссектора окулярного микрометра в качестве рабочей и установить её в положении, при котором показание микрометра M составляет величину, приблизительно равную 10.3

5. Навести трубу на предмет так, чтобы изображения предмета и рабочей нити совместились. Закрепить стопорный винт горизонтального круга. Трубу по азимуту не перемещать. Снять показания микроскопов-микрометров А и Б горизонтального круга. Рабочим ходом окулярного микрометра произвести пять наведений на предмет (рис. 4.13)

6. Навести трубу на Полярную звезду так, чтобы изображение звезды было в центре поля зрения на рабочей нити. Закрепить стопорный винт горизонтального круга для избежания вращения инструмента вокруг вертикальной оси.

7. Снять отсчёты накладного уровня, находясь позади него и глядя в ту сторону, куда направлен объектив.

8. Снять отсчёты микроскопов-микрометров А и Б горизонтального круга.

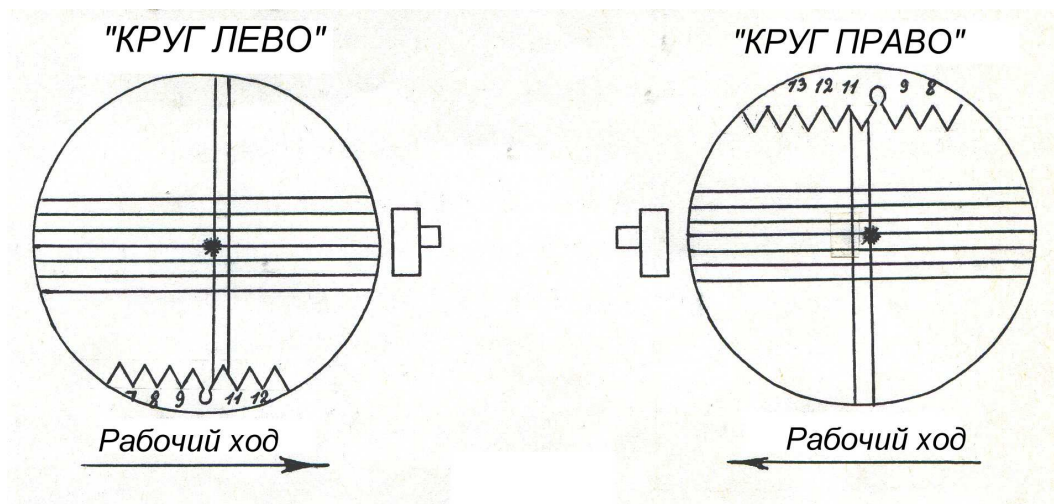


Рис. 4.14: Наведение рабочей нити на Полярную звезду

9. Сделать три наведения рабочей нити окулярного микрометра на Полярную звезду (рис. 4.14). Каждое наведение сопровождать отсчётом хронометра с точностью до 0.5 удара (0.25 с.).
 10. Сделать перекладку уровня и снять его отсчёты.
 11. Открепить стопорный винт горизонтального круга.
 12. Сделать ещё одно наведение на Полярную звезду. Для этого повторить задания пунктов 6-11.
 13. Повторить наведение на предмет (см. пункт 5).
- Задания пунктов 5-13 выполнить дважды в положениях инструмента "КРУГ ЛЕВО" и "КРУГ ПРАВО".

Журнал наблюдений Полярной звезды

Дата 28 сентября 1983 г. Азимут по Полярной Инструмент 112104 $\frac{\tau}{2} = 1''.574$
 Наблюдатель В.В. Витязев "КРУГ ЛЕВО" Хронометр 3555 $R = 155''.19$

Объект	Уровень (0-35)	Горизонтальный круг	Окулярный микрометр	Хронометр	Уровень после перекладки	Наклонность
Предмет		A = $325^{\circ}20'1^{\circ}61_{55}''$	10.340			
			10.340			
		B = $145^{\circ}20'1^{\circ}61_{31}''$	10.335			
			10.350			
		КЛ ₁ = $325^{\circ}26'42''.75$	10.349			
			$M' - 10 = 0.343$			
αUMi	л=25.7	A = $181^{\circ}30'0^{\circ}61_{16}''$	10.298	$19^h 25^m 10^s + 7.0$	л=8.6	$b_{1L} = -0''.55$
	п=8.2	B = $1^{\circ}30'0^{\circ}61_{03}''$	10.304	$25^m 35^s + 8.0$	п=26.0	$b = \frac{i_1+i_2}{2} \frac{\tau}{2}$
	$i_1 = -1.1$	КЛ' ₁ = $181^{\circ}31'09''.75$	10.334	$27^m 45^s + 3.8$	$i_2 = 0.4$	
			$M' - 10 = 0.312$	$T_{1L} = 19^h 26^m 13^s.133$		
αUMi	л=8.5	A = $181^{\circ}30'0^{\circ}61_{47}''$	10.370	$19^h 35^m 45^s + 6.0$	л=25.8	
	п=25.9	B = $1^{\circ}30'0^{\circ}61_{33}''$	10.380	$36^m 15^s + 8.0$	п=8.3	$b_{2L} = -0''.24$
	$i_1 = 0.6$	КЛ' ₂ = $181^{\circ}31'40''.00$	10.405	$37^m 55^s + 9.5$	$i_2 = -0.9$	
			$M' - 10 = 0.385$	$T_{2L} = 19^h 36^m 42^s.250$		
Предмет		A = $325^{\circ}20'1^{\circ}61_{51}''$	10.359			
			10.355			
		B = $145^{\circ}20'1^{\circ}61_{28}''$	10.365			
			10.355			
		КЛ ₁ = $325^{\circ}26'39''.25$	10.351			
			$M' - 10 = 0.357$			

Журнал наблюдений Полярной звезды (продолжение)

Дата 28 сентября 1983 г.
Наблюдатель В.В. Витязев

Азимут по Полярной
"КРУГ ПРАВО"

Инструмент 112104
Хронометр 3555

$\frac{r}{2} = 1''.574$
 $R = 155''.19$

Объект	Уровень (0-35)	Горизонтальный круг	Окулярный микрометр	Хронометр	Уровень после перекладки	Наклонность
Предмет		A = $145^{\circ}30'0^{\circ}63_{60}^{\prime}59''$ B = $325^{\circ}30'0^{\circ}63_{50}^{\prime}51''$ КП ₁ = $145^{\circ}33'55''.00$	10.295 10.300 10.298 10.290 10.302 $M' - 10 = 0.297$			
αUMi	л=11.2 п=28.5 $i_1 = -4.7$	A = $1^{\circ}40'0^{\circ}62_{14}^{\prime}16''$ B = $181^{\circ}40'0^{\circ}61_{59}^{\prime}59''$ КП' ₁ = $1^{\circ}42'07''.00$	10.259 10.229 10.199 $M' - 10 = 0.229$	$19^h 00^m 55^s + 5.0$ $01^m 35^s + 7.0$ $03^m 00^s + 3.0$ $T_{1R} = 19^h 01^m 52^s.500$	л=24.0 п=6.5 $i_2 = -4.5$	$b_{1R} = -7''.24$
αUMi	л=24.1 п=6.6 $i_1 = -4.3$	A = $1^{\circ}40'0^{\circ}63_{54}^{\prime}55''$ B = $181^{\circ}40'0^{\circ}63_{35}^{\prime}36''$ КП' ₂ = $1^{\circ}43'45''.00$	10.298 10.276 10.252 $M' - 10 = 0.275$	$19^h 11^m 25^s + 7.0$ $12^m 15^s + 8.0$ $13^m 10^s + 5.0$ $T_{2R} = 19^h 12^m 19^s.999$	л=11.0 п=28.1 $i_2 = -4.1$	$b_{2R} = -6''.61$
Предмет		A = $145^{\circ}30'0^{\circ}64_{02}^{\prime}02''$ B = $325^{\circ}30'0^{\circ}63_{53}^{\prime}54''$ КП ₂ = $145^{\circ}33'57''.75$	10.290 10.290 10.292 10.300 10.295 $M' - 10 = 0.293$			

4.8 Обработка журнала наблюдений

1 столбец. Вычислить показания уровня:

$i_1 = m - (л+п)$, если нуль уровня слева,

$i_1 = (л+п) - m$, если нуль уровня справа.

5 столбец. Вычислить показания уровня:

$i_2 = m - (л+п)$, если нуль уровня слева,

$i_2 = (л+п) - m$, если нуль уровня справа.

6 столбец. Вычислить наклонность горизонтальной оси инструмента

$b = \frac{i_1+i_2}{2} \frac{\tau}{2}$, где τ - цена деления накладного уровня.

Так получают величины b_{1L} , b_{2L} , b_{1R} , b_{2R} .

2 столбец. Вычислить показания микроскопов-микрометров А и Б и образовать средние

$$\text{КЛ} = \frac{A+B}{2}; \quad \text{КП} = \frac{A+B}{2}.$$

(градусы берутся по микроскопу А)

3 столбец. Вычислить средние значения наведений окулярного микрометра.

4 столбец. Вычислить средние моменты наведения рабочей нити на Полярную звезду.

Общая схема обработки результатов наблюдения азимута по Полярной звезде. $U = 56^{\circ}.355$ от 28.09.1983 г.

N	Величины	КЛ		КП		Способ вычисления
		i=1	i=2	i=1	i=2	
1	T_{iL}, T_{iR}	$19^h 26^m 13^s.333$	$19^h 36^m 42^s.250$	$19^h 01^m 52^s.500$	$19^h 12^m 19^s.999$	Из ж.н. моменты наблюдения Полярной $\overline{T}_L = \frac{T_{1L} + T_{2L}}{2}$; $\overline{T}_R = \frac{T_{1R} + T_{2R}}{2}$ Из А.Е. $z = 90^\circ - (\varphi + f)$ f интерполируется по $\overline{T}_L + U$ и $\overline{T}_R + U$
2	$\overline{T}_{L,R}$	$19^h 31^m 27^s.791$		$19^h 07^m 06^s.250$		
3	z	$30^\circ 12'.98$		$30^\circ 17'.90$		
4	$\text{csc } z$	1.9870		1.9822		$p = \text{csc } z_L + \text{csc } z_R$ $q = \frac{1}{2}(\text{csc } z_L - \text{csc } z_R)$
5	ctgz	1.7171		1.7114		
6	p	3.9692				Из ж.н. отсчёты гор. круга для Полярной звезды $(M' - 10)$ - из ж.н. R - цена оборота барабана окулярного микрометра
7	q	0.0028				
8	$\text{КЛ}'_i, \text{КП}'_i$	$181^\circ 31' 09''.75$	$181^\circ 31' 40''.00$	$1^\circ 42' 07''.00$	$1^\circ 43' 45''.00$	$\Delta b = b \cdot \text{ctgz}$ $L'_i = \text{КЛ}'_i + (M' - 10)R \text{csc } z + \Delta b$ $R'_i = \text{КП}'_i + (M' - 10)R \text{csc } z + \Delta b$
9	$(M' - 10)R \text{csc } z$	$96''.21$	$118''.72$	$70''.44$	$84''.59$	
10	Δb	$-0''.94$	$-0''.41$	$-12''.38$	$-11''.31$	$S_{\text{cp}} = \frac{1}{2}(\overline{T}_L + \overline{T}_R) + U$ Интерполяция по А.Е. на S Интерполяция по А.Е. на S
11	L'_i, R'_i	$181^\circ 32' 45''.02$	$181^\circ 33' 38''.02$	$1^\circ 40' 44''.18$	$1^\circ 42' 09''.10$	
12	S_{cp}	$19^h 20^m 14^s.875$				$t_i = T_i + U - \alpha$
13	α	$2^h 16^m 02^s.519$				
14	δ	$89^\circ 11' 13''.59$				$m = \text{ctg } \delta \sec \varphi, \sec \varphi = 1.996522$
15	$T_i + U$	$19^h 27^m 09^s.688$	$19^h 37^m 38^s.605$	$19^h 02^m 48^s.855$	$19^h 13^m 16^s.354$	
16	$-\alpha$	$-2^h 16^m 02^s.519$				
17	t_i	$17^h 11^m 07^s.169$	$17^h 21^m 36^s.086$	$16^h 46^m 46^s.336$	$16^h 57^m 13^s.835$	
18	$\sin t_i$	-0.977341	-0.985996	-0.949386	-0.962727	
19	$\cos t_i$	-0.211672	-0.166766	-0.314111	-0.270476	
20	m	0.028331				

N	Величины	КЛ		КП		Способ вычисления
		i=1	i=2	i=1	i=2	
21	n	0.0245209				$n = \text{ctg}\delta \text{tg}\varphi$, $\text{tg}\varphi = 1.728034$
22	$\text{tg}A_i$	0.0275458	0.0278202	0.0266912	0.0270951	$\text{tg}A_i = -\frac{m \sin t_i}{1 - n \cos t_i}$
23	$A_{iL}; A_{iR}$	181°34'40".30	181°35'36".86	1°31'44".16	1°33'07".40	Азимуты астрономические
24	$L'_i; R'_i$	181°32'45".02	181°33'38".31	1°40'44".18	1°42'09".10	
25	$M_{iL}; M_{iR}$	-1'55".28	-1'58".55	+9'00".02	9'01".70	$M_{iL} = L'_i - A_{iL}; M_{iR} = R'_i - A_{iR}$
26	$M_L; M_R$	-1'56".91		9'00".86		$M_L = \frac{1}{2}(M_{1L} + M_{2L}); M_R = \frac{1}{2}(M_{1R} + M_{2R})$
27	КЛ _i ; КП _i	325°26'42".75	325°26'39".25	145°33'55".00	145°33'57".75	Из ж.н. отсчёты гор. круга для предмета
28	$(M - 10)R$	53".23	55".40	46".09	45".57	
29	$L_i; R_i$	325°27'35".98	325°27'34".65	145°33'08".91	145°33'12".28	$L_i = \text{КЛ}_i + (M - 10)R;$ $R_i = \text{КП}_i - (M - 10)R$
30	$L; R$	325°27'35".32		145°33'10".60		$L = \frac{1}{2}(L_1 + L_2); R = \frac{1}{2}(R_1 + R_2)$
31	c_1	-2'47".64				$c_1 = \frac{L - (R \pm 180^\circ)}{2}$
32	c_2	-2'45".72				$c_2 = \frac{M_L - M_R}{p} - 0''.64 \frac{q \cos \varphi}{p}$
33	c	-2'46".68		$\Delta c = -1''.92$		$c = \frac{1}{2}(c_1 + c_2); \Delta c = c_1 - c_2$
34	M_S	3'32".12				$M_S = \frac{M_L + M_R}{2} - qc - 0''.16p \cos \varphi$
35	a	325°26'50".84				$a = \frac{L + [R \pm 180^\circ]}{2} - M_S$

4.9 Инструкция по наблюдениям Солнца

Наблюдения следует производить утром или вечером, когда Солнце находится невысоко над горизонтом.

=====

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ:

Наблюдать Солнце можно только через светофильтр!

=====

Полезно защитить от прямых лучей Солнца накладной уровень экраном из листа бумаги.

Для наблюдений следует:

1. Отрегулировать инструмент.
2. Установить инструмент в меридиан (по смыслу выполняемой работы этот пункт не обязателен, однако при обработке это обеспечит близость наблюдаемых и вычисляемых азимутов Солнца).
3. Проверить горизонтальность нитей.
4. Установить биссектор или вертикальную нить окулярного микрометра в "десятку" (рис. 4.15).

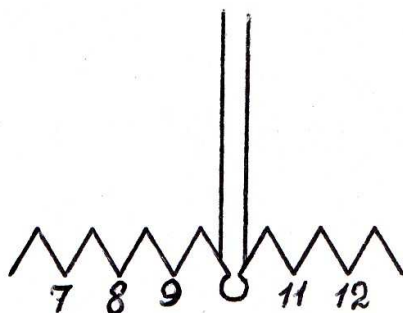


Рис. 4.15: Установка биссектора в "десятку"

5. Навести трубу на предмет так, чтобы изображение предмета находилось вблизи биссектора или вертикальной нити (рис. 4.16). Закрепить стопорный винт горизонтального круга. Микрометрическим винтом горизонтального круга ввести изображение предмета в биссектор (навести на нить). Снять показания микроскопов-микрометров А и Б горизонтального круга.

6. Навести трубу на Солнце. Это можно сделать, проектируя его изображение на экран. Надев светофильтр на окуляр, оценить направление перемещения Солнца и установить его изоб-

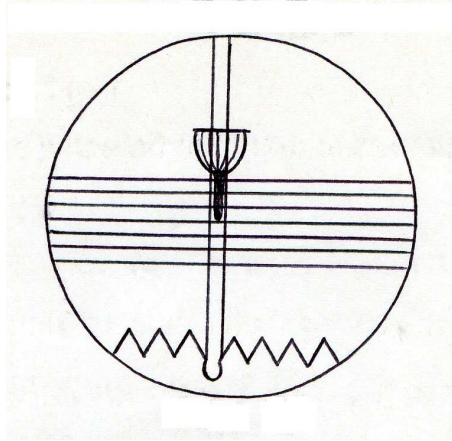


Рис. 4.16: Наведение биссектора на предмет

ражение в такое положение относительно биссектора, чтобы его прохождение через биссектор можно было наблюдать, не изменяя зенитного расстояния трубы (рис. 4.17). Закрепить стопорный винт горизонтального круга.

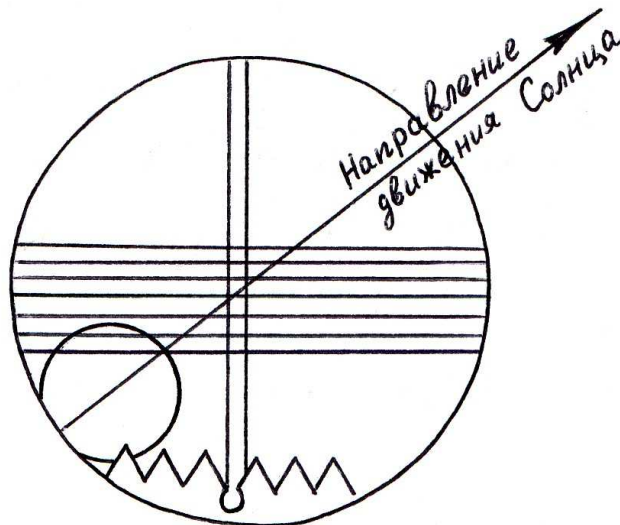


Рис. 4.17: Исходная позиция для наблюдения Солнца

7. Пока изображение Солнца не коснулось биссектора, снять отсчёты накладного уровня, находясь позади него и глядя в ту сторону, куда направлен объектив.
8. Засечь по хронометру с точностью до 0.5 удара (0.25 с.) моменты T_1 и T_2 касания обоих краёв диска Солнца нитей биссектора

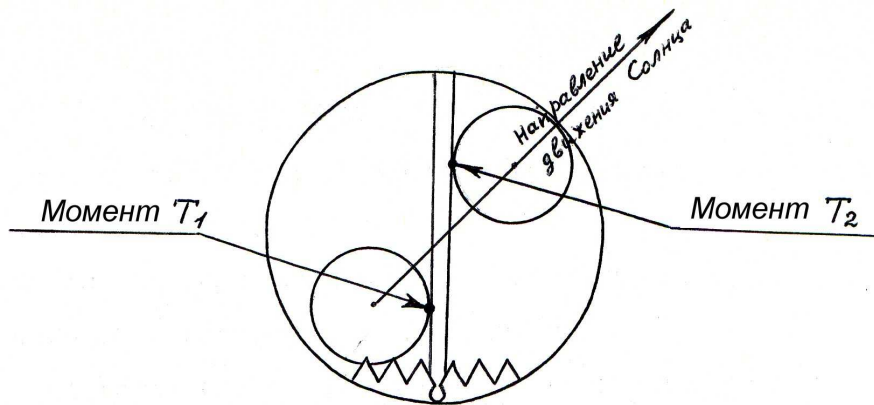


Рис. 4.18: Наблюдение Солнца

(рис. 4.18).

9. Снять отсчёты микроскопов-микрометров А и Б горизонтального круга.
 10. Сделать перекладку накладного уровня и снять его отсчёты.
 11. Открепить стопорный винт горизонтального круга.
 12. Сделать ещё одно наведение на Солнце. Для этого повторить задания пунктов 6-11.
 13. Повторить наведение на предмет (см. пункт 5).
- Задания пунктов 5-13 выполнить дважды в положениях инструмента "КРУГ ЛЕВО" и "КРУГ ПРАВО".

Журнал наблюдений (Азимут по Солнцу)

Дата 13 сентября 1983 г. Азимут по Солнцу Инструмент 112104 $\frac{\tau}{2} = 1''.574$
 Наблюдатель В.В. Витязев "КРУГ ЛЕВО" Хронометр 3555

Объект	Накладной уровень	Хронометр	Горизонтальный круг	Уровень после перекладки	Наклонность
Предмет			A = 325° 20' 1 ⁰⁶ 1' ³⁹ / ₄₁ " B = 145° 20' 1 ⁰⁶ 1' ¹⁹ / ₁₈ " КЛ ₁ = 325° 26' 29''.25		
Солнце	л=10.9 п=21.9 i ₁ = 2.2	13 ^h 26 ^m 30 ^s + 7.0 13 ^h 28 ^m 50 ^s + 3.5 T _{1L} = 13 ^h 27 ^m 42 ^s .62	A = 36° 20' 0 ⁰⁶ 1' ¹⁰ / ₀₈ " B = 216° 20' 0 ⁰⁶ 0' ⁵⁶ / ₅₇ " КЛ' ₁ = 36° 21' 02''.75	л=18.5 п=7.6 i ₂ = -8.9	b _{1L} = -5.27
Солнце	л=20.4 п=9.3 i ₁ = -5.3	13 ^h 32 ^m 55 ^s + 5.5 13 ^h 35 ^m 15 ^s + 3.5 T _{2L} = 13 ^h 34 ^m 07 ^s .25	A = 38° 00' 1 ⁰⁶ 0' ⁰⁷ / ₀₈ " B = 218° 00' 0 ⁰⁶ 4' ⁵⁶ / ₅₄ " КЛ' ₂ = 38° 05' 01''.25	л=10.1 п=21.2 i ₂ = 3.7	b _{2L} = -1.26
Предмет			A = 325° 20' 1 ⁰⁶ 1' ³⁹ / ₃₉ " B = 145° 20' 1 ⁰⁶ 1' ²⁰ / ₂₀ " КЛ ₂ = 325° 26' 29''.50		

"КРУГ ПРАВО"

Объект	Накладной уровень	Хронометр	Горизонтальный круг	Уровень после перекладки	Наклонность
Предмет			A = 145° 30' 0 ⁰⁶ 3' ⁴⁹ / ₄₈ " B = 325° 30' 0 ⁰⁶ 3' ³⁵ / ₃₄ " КП ₁ = 145° 33' 41''.50		
Солнце	л=7.4 п=18.9 i ₁ = 8.7	13 ^h 48 ^m 05 ^s + 7.5 13 ^h 50 ^m 25 ^s + 7.5 T _{1R} = 13 ^h 49 ^m 18 ^s .75	A = 222° 10' 1 ⁰⁶ 1' ¹⁹ / ₁₉ " B = 42° 10' 1 ⁰⁶ 0' ⁶⁰ / ₅₈ " КП' ₁ = 222° 16' 09''.00	л=18.5 п=7.1 i ₂ = -9.4	b _{1R} = -0''.55
Солнце	л=18.3 п=6.9 i ₁ = -9.8	13 ^h 54 ^m 40 ^s + 6.5 13 ^h 57 ^m 00 ^s + 8.5 T _{1R} = 13 ^h 55 ^m 53 ^s .75	A = 224° 00' 0 ⁰⁶ 0' ⁰¹ / ₀₀ " B = 43° 50' 1 ⁰⁶ 4' ⁴¹ / ₃₈ " КП' ₂ = 223° 59' 50''.00	л=6.1 п=17.6 i ₂ = 11.3	b _{2R} = 1''.18
Предмет			A = 145° 30' 0 ⁰⁶ 3' ⁴⁵ / ₄₆ " B = 325° 30' 0 ⁰⁶ 3' ³⁵ / ₃₃ " КП ₂ = 145° 33' 39''.75		

4.10 Обработка журнала наблюдений

1 столбец. Вычислить показания уровня:

$$i_1 = m - (л+п), \text{ если нуль уровня слева,}$$
$$i_1 = (л+п) - m, \text{ если нуль уровня справа.}$$

4 столбец. Вычислить показания уровня:

$$i_2 = m - (л+п), \text{ если нуль уровня слева,}$$
$$i_2 = (л+п) - m, \text{ если нуль уровня справа.}$$

5 столбец. Вычислить наклонность горизонтальной оси инструмента

$$b = \frac{i_1+i_2}{2} \tau, \text{ где } \tau - \text{ цена деления накладного уровня.}$$

Получить наклоны $b_{1L}, b_{2L}, b_{1R}, b_{2R}$.

2 столбец. Вычислить моменты контактов лимба Солнца с нитью или нитями биссектора и найти их средние значения. Таким способом получить моменты

$$T_{1L}, T_{2L}, T_{1R}, T_{1R}$$

прохождения центра Солнца через нить или середину биссектора.

3 столбец. Вычислить отсчёты

$$\text{КЛ} = \frac{1}{2}(A+B); \quad \text{КП} = \frac{1}{2}(A+B)$$

(градусы брать по микроскопу А)

Таким способом получить отсчёты $\text{КЛ}_1, \text{КЛ}_2, \text{КП}_1, \text{КП}_2$ - для предмета

$$\text{КЛ}'_1, \text{КЛ}'_2, \text{КП}'_1, \text{КП}'_2 - \text{ для Солнца.}$$

4.11 Видимые координаты центра Солнца

В "Астрономическом Ежегоднике" экваториальные координаты α и δ центра Солнца даются на 0^h земного времени на каждый день года. Помимо координат здесь же приводятся часовые изменения склонения и часовые изменения уравнения времени $\vartheta(E)$,

с помощью которого часовые изменения прямого восхождения $\vartheta(\alpha)$ вычисляются по формуле

$$\vartheta(\alpha) = 9^s.856 - \vartheta(E). \quad (4.61)$$

Обозначим через S гринвичское звёздное время, соответствующее моменту наблюдения Солнца. Аргументом интерполирования координат на момент S является величина

$$M^* = S - S_0 - \nu(S - S_0) + \Delta T, \quad (4.62)$$

где

$$S = T + U - \lambda,$$

T – момент наблюдения по рабочему звёздному хронометру с поправкой U ,

λ – долгота места наблюдения;

S_0 – звёздное время на 0^h всемирного времени (приводится в "Астрономическом Ежегоднике");

$\nu = 0.0027304336$ – множитель перевода звёздного времени в среднее;

ΔT – поправка, с помощью которой всемирное время переводится в земное время.

Экстраполированное значение ΔT на текущий год приводится в "Астрономическом Ежегоднике". После 1986 года оно обозначается там как $\Delta T(A)$.

Интерполирование прямого восхождения центра Солнца выполняется по формуле

$$\alpha_{M^*} = \alpha_0 + M^{*h} \left[\vartheta'_0 + \frac{M^{*h}}{48} (\vartheta_0 - \vartheta_1) \right]. \quad (4.63)$$

В этой формуле:

M^{*h} – значение, вычисленное по формуле (4.62), в часах;

ϑ_0, ϑ_1 – часовые изменения уравнения времени на начало текущих и следующих суток.

$$\vartheta'_0 = 9^s.856 - \vartheta_0;$$

α – прямое восхождение на начало суток.

Интерполирование склонения центра Солнца осуществляется по аналогичной формуле

$$\delta_{M^*} = \delta_0 + M^{*h} \left[\vartheta_0 + \frac{M^{*h}}{48} (\vartheta_1 - \vartheta_0) \right], \quad (4.64)$$

где ϑ_0, ϑ_1 – часовые изменения склонения на начало текущих суток и следующих суток;

δ - склонение на начало суток

Пример. Определить видимые координаты Солнца 24 июня 1981 года в Ленинграде ($\lambda = 2^h 01^m 10^s.771$), соответствующие показанию звёздного хронометра $T = 7^h 19^m 26^s.5$ с поправкой $U = -32^s.004$.

Из "Астрономического Ежегодника" на 1981 год имеем:

Июнь	часовые изменения уравнения времени
24	$\alpha_0 = 6^h 10^m 26^s.19$ $\vartheta_0 = -0^s.536$
25	$\alpha_1 = 6^h 14^m 35^s.56$ $\vartheta_1 = -0^s.532$

Июнь	часовые изменения склонения
24	$\delta_0 = 23^\circ 25' 06''.2$ $\vartheta_0 = -2''.59$
25	$\delta_1 = 23^\circ 23' 51''.6$ $\vartheta_1 = -3''.62$

$$S_0 = 18^h 08^m 14^s.266$$

Вычисление интерполяционного множителя M^{*h} :

T	$7^h 19^m 26^s.5$
U	- $32^s.004$
S_λ	$7^h 18^m 54^s.496$
λ	$2^h 01^m 10^s.771$
S	$5^h 17^m 43^s.725$
S_0	$18^h 08^m 14^s.266$
$S - S_0$	$11^h 09^m 29^s.459$
$\nu(S - S_0)$	- $1^m 49^s.679$
M	$11^h 07^m 39^s.780$
ΔT	51^s
M^*	$11^h 08^m 30^s.780$
M^{*h}	$11^h.142$

Видимое прямое восхождение

$$\begin{aligned}\vartheta'_0 &= 9^s.856 - \vartheta_0 = 9^s.856 + 0^s.536 = 10^s.392 \\ \vartheta_0 - \vartheta_1 &= -0^s.536 + 0^s.532 = -0^s.004 \\ \alpha_{M^*} - \alpha_0 &= 11.142[10^s.392 - \frac{11.142}{48} \times 0^s.004] = \\ &= 11.142 \times 10^s.391 = 115^s.78 = 1^m 55^s.78 \\ \alpha_{M^*} &= 6^h 10^m 26^s.19 + 1^m 55^s.78 = 6^h 12^m 21^s.97\end{aligned}$$

Видимое склонение

$$\begin{aligned}\vartheta_1 - \vartheta_0 &= -3''.62 + 2''.59 = -1''.03 \\ \delta_{M^*} - \delta_0 &= 11.142[-2''.59 - \frac{11.142}{48} \times 1''.03] = \\ &= -11.142 \times 2''.83 = -31''.52 \\ \delta_{M^*} &= 23^\circ 25' 06''.2 - 31''.5 = 23^\circ 24' 34''.7\end{aligned}$$

Замечание. При выполнении азимутальных работ координаты Солнца можно интерполировать по "Астрономическому Ежегоднику" на моменты

$$S_1 = T_{1L} + U - \lambda, \quad S_4 = T_{2R} + U - \lambda.$$

С помощью этих координат линейной интерполяцией по шкале местного звёздного времени получают координаты на моменты

$$S_2 = T_{2L} + U - \lambda, \quad S_3 = T_{1R} + U - \lambda$$

по формулам

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{T_{2L} - T_{1L}}{T_{2R} - T_{1L}}(\alpha_4 - \alpha_1); \quad (4.65)$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{T_{2L} - T_{1L}}{T_{2R} - T_{1L}}(\delta_4 - \delta_1);$$

$$\alpha_3 = \alpha_1 + \frac{T_{1R} - T_{1L}}{T_{2R} - T_{1L}}(\alpha_4 - \alpha_1); \quad (4.66)$$

$$\delta_3 = \delta_1 + \frac{T_{1R} - T_{1L}}{T_{2R} - T_{1L}}(\delta_4 - \delta_1).$$

Схема вычисления азимута по Солнцу.

N	Величины	КЛ		КП		Способ вычисления
		i=1	i=2	i=1	i=2	
1	T_{iL}, T_{iR}	$13^h 27^m 42^s .62$	$13^h 34^m 07^s .25$	$13^h 49^m 18^s .75$	$13^h 55^m 53^s .75$	Из ж.н. моменты прохождения центра Солнца через биссектор хронометра на средний момент наблюдения
2	U	$1^m 10^s .421$	$1^m 10^s .421$	$1^m 10^s .421$	$1^m 10^s .421$	
3	S_i	$13^h 28^m 53^s .041$	$13^h 35^m 17^s .671$	$13^h 50^m 29^s .171$	$13^h 57^m 04^s .171$	$S_i = T_i + U$
4	α_i	$11^h 23^m 43^s .67$	$11^h 23^m 44^s .63$	$11^h 23^m 46^s .90$	$11^h 23^m 47^s .88$	Видимые координаты центра Солнца на моменты наблюдений
5	δ_i	$3^\circ 54' 34'' .5$	$3^\circ 54' 28'' .4$	$3^\circ 54' 13'' .9$	$3^\circ 54' 07'' .6$	
6	t_i	$2^h 05^m 09^s .371$	$2^h 11^m 33^s .041$	$2^h 26^m 42^s .271$	$2^h 33^m 16^s .291$	$t_i = S_i - \alpha_i$
7	$\sin t_i$	0.519355	0.542993	0.597290	0.620023	$m_i = \operatorname{ctg} \delta_i \operatorname{sec} \varphi; \operatorname{sec} \varphi = 1.996522$
8	$\cos t_i$	0.854558	0.839736	0.802024	0.784583	
9	m_i	29.21408	29.22702	29.25719	29.27014	$n_i = \operatorname{ctg} \delta_i \operatorname{tg} \varphi; \operatorname{tg} \varphi = 1.728034$
10	n_i	25.28543	25.29664	25.32275	25.33396	
11	$\operatorname{tg} A_i$	0.736247	0.783997	0.904999	0.961411	$\operatorname{tg} A_i = -\frac{m_i \sin t_i}{1 - n_i \cos t_i}$
12	A_i	$36^\circ 21' 44'' .20$	$38^\circ 05' 46'' .95$	$42^\circ 08' 42'' .55$	$43^\circ 52' 22'' .58$	
13	$\sin A_i$	0.592936	0.617036	0.671053	0.693102	Азимуты астрономические. Выбор четверти по формулам (10)-(11)
14	$\cos \delta_i$	0.997672	0.997675	0.997679	0.997681	
15	$\sin z_i$	0.873944	0.878037	0.888080	0.892550	$\sin z_i = \frac{\sin t_i}{\sin A_i} \cos \delta_i$
16	z_i	$60^\circ 55''$	$60^\circ 24''$	$60^\circ 38''$	$60^\circ 12''$	
17	$z_L; z_R$	$61^\circ 09' .5$		$62^\circ 55' .0$		$z_L = \frac{1}{2}(z_{1L} + z_{2L}); \quad z_R = \frac{1}{2}(z_{1R} + z_{2R})$
18	$\operatorname{csc} z_L; \operatorname{csc} z_R$	1.1416		1.1232		
19	p	2.2648				$p = \operatorname{csc} z_L + \operatorname{csc} z_R$
20	q	0.0092				$q = \frac{1}{2}(\operatorname{csc} z_L - \operatorname{csc} z_R)$

Схема вычисления азимута по Солнцу (продолжение).

N	Величины	КЛ		КП		Способ вычисления
		i=1	i=2	i=1	i=2	
21	$КЛ'_i; КП'_i$	$36^\circ 21' 02''.75$	$38^\circ 05' 01''.25$	$222^\circ 16' 09''.00$	$223^\circ 59' 50''.00$	Из ж.н. отсчёты горизонтального круга при наблюдении Солнца
22	b_i	$-5''.27$	$-1''.26$	$-0''.55$	$1''.18$	Из ж.н.
23	Δb_i	$-2''.93$	$-0''.68$	$-0''.28$	$0''.60$	$\Delta b_i = b_i \operatorname{ctg} z_i$
24	$L'_i; R'_i$	$36^\circ 20' 59''.82$	$38^\circ 05' 00''.57$	$222^\circ 16' 08''.72$	$223^\circ 59' 50''.60$	$L'_i = КЛ' + \Delta b_i; R'_i = КП' + \Delta b_i$
25	A_i	$36^\circ 21' 44''.20$	$38^\circ 05' 46''.95$	$42^\circ 08' 42''.55$	$43^\circ 52' 22''.58$	переписать
26	$M_{iL}; M_{iR}$	$-44''.38$	$-46''.38$	$7' 26''.17$	$7' 28''.02$	$M_{iL} = L'_i - A_{iL}; M_{iR} = R'_i - A_{iR}$
27	$M_L; M_R$	$-45''.38$		$7' 27''.10$		
28	$КЛ_i; КП_i$	$325^\circ 26' 29''.25$	$325^\circ 26' 29''.50$	$145^\circ 33' 41''.50$	$145^\circ 33' 39''.75$	Из ж.н. отсчёты горизонтального круга
29	L, R	$325^\circ 26' 29''.38$		$145^\circ 33' 40''.63$		при наведении на предмет $L = \frac{1}{2}(1 + 2); R = \frac{1}{2}(1 + 2)$
30	c_1	$-3' 35''.62$				$c_1 = \frac{L - (R \pm 180^\circ)}{2}$
31	c_2	$-3' 37''.44$				$c_2 = \frac{M_L - M_R}{p}$
32	c	$-3' 36''.53$		$\Delta c = 1''.82$		$c = \frac{1}{2}(c_1 + c_2); \Delta c = c_1 - c_2$
33	M_S	$3' 22'.85$				$M_S = \frac{M_L + M_R}{2} - qc$
34	a	$325^\circ 26' 42''.16$				$a = \frac{L + [R \pm 180^\circ]}{2} - M_S$

Глава 5

Определение поправки часов и долготы места наблюдения по методу Цингера



5.1 Общий принцип определения долготы

Пусть одному и тому же физическому моменту времени соответствует момент S звёздного времени в Гринвиче и S_λ – момент местного звёздного времени. В этом случае для долготы λ места наблюдения имеем

$$\lambda = S_\lambda - S. \quad (5.1)$$

В формуле (5.1)

$$S_\lambda = T + U, \quad (5.2)$$

где T – показание рабочего хронометра, U – его поправка.

Из формул (5.1) и (5.2) следует, что для вычисления долготы нужно решить две задачи: определить момент S по шкале гринвичского звёздного времени и найти поправку U местных часов. Первая из этих задач решается с помощью приёма радиосигналов точного времени, а вторая - посредством астрономических наблюдений. Одним из наиболее распространённых методов определения поправки часов из наблюдений является метод соответственных высот, предложенный Н.Я.Цингером¹.

5.2 Принцип равных высот

Предположим, что две звезды с координатами α_1, δ_1 и α_2, δ_2 можно наблюдать на одинаковом зенитном расстоянии z в моменты T_1 и T_2 по рабочему хронометру. Из соответствующих параллактических треугольников (рис.5.1) имеем

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos t_1 \cos \delta_1, \quad (5.3)$$

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos t_2 \cos \delta_2, \quad (5.4)$$

где φ - широта места наблюдения (считается известной);

$$t_1 = T_1 + U - \alpha_1, \quad (5.5)$$

¹Николай Яковлевич Цингер (1842-1918) - русский астроном, геодезист и картограф, член-корреспондент Петербургской АН (1900). Окончил в 1863 г. Артиллерийскую академию, в 1870 г. - Академию Генерального штаба. В 1872-1883 гг.работал в Пулковской обсерватории, с 1884 г. - профессор Академии Генерального штаба и профессор Морской Николаевской академии. В 1874 г. предложил способ определения поправки часов из наблюдений двух звёзд на равных высотах, который получил название "метод пар Цингера".

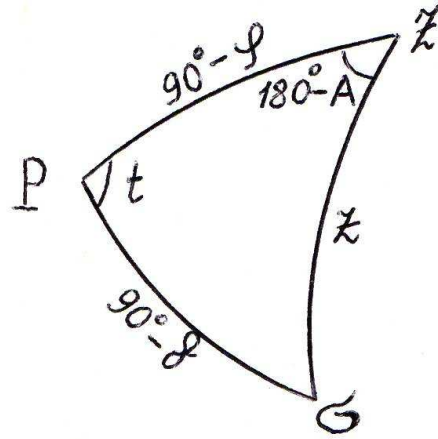


Рис. 5.1: Параллактический треугольник

$$t_2 = T_2 + U - \alpha_2, \quad (5.6)$$

U – поправка хронометра.

Из выражений (5.3) и (5.4) находим уравнение

$$\sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos t_1 = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos t_2, \quad (5.7)$$

решая которое можно получить искомую поправку U . При том допускается предположение, что за интервал времени между наблюдениями двух звёзд поправка хронометра U не меняется.

5.3 Наилучшие условия наблюдений

Выясним, как нужно производить наблюдения, чтобы ошибки моментов регистрации ΔT_1 и ΔT_2 прохождения звёзд через один и тот же альмукуантарат, а также ошибка $\Delta \varphi$ принятого значения широты наименьшим образом сказались на определении поправки часов U . С этой целью, считая координаты звёзд заведомо точными, продифференцируем выражения (5.3) и (5.4) по φ , t_1 и t_2 . Заменяя дифференциалы конечными приращениями, получим

$$\begin{aligned} & (\cos \varphi \sin \delta_1 - \sin \varphi \cos \delta_1 \cos t_1) \Delta \varphi - \cos \varphi \cos \delta_1 \sin t_1 \Delta t_1 = \\ & = (\cos \varphi \sin \delta_2 - \sin \varphi \cos \delta_2 \cos t_2) \Delta \varphi - \cos \varphi \cos \delta_2 \sin t_2 \Delta t_2. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Из параллактического треугольника (рис. 5.1) имеем

$$-\sin z \cos A = \sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos t, \quad (5.9)$$

$$\sin z \cos A = \cos \delta \sin t. \quad (5.10)$$

Кроме того, из (5.5) и (5.6) следует:

$$\Delta t_1 = \Delta T_1 + \Delta U, \quad (5.11)$$

$$\Delta t_2 = \Delta T_2 + \Delta U, \quad (5.12)$$

где ΔU – ошибка определения поправки часов. Из равенства (5.8) при учёте (5.9)-(5.12) получаем:

$$\begin{aligned} (\cos A_1 - \cos A_2)\Delta\varphi + (\sin A_1 - \sin A_2) \cos \varphi \Delta U = \\ = (\sin A_2 \Delta T_2 - \sin A_1 \Delta T_1) \cos \varphi, \end{aligned} \quad (5.13)$$

откуда

$$\Delta U = \frac{\sin A_2 \Delta T_2 - \sin A_1 \Delta T_1}{\sin A_1 - \sin A_2} + \frac{\cos A_2 - \cos A_1}{\sin A_1 - \sin A_2} \sec \varphi \Delta \varphi. \quad (5.14)$$

Из этой формулы видно, что ошибка ΔU будет минимальна, если выполняется условие

$$A_1 = 360^\circ - A_2. \quad (5.15)$$

При этом ошибка ΔU не зависит от $\Delta\varphi$ и определяется выражением

$$\Delta U = -\frac{1}{2}(\Delta T_1 + \Delta T_2). \quad (5.16)$$

Необходимо отметить, что наложенные условия $A_1 = 360^\circ - A_2$ и $z_1 = z_2$ приводят к тому, что склонения двух звёзд должны быть одинаковыми. Действительно, из соответствующих параллактических треугольников имеем

$$\cos \delta_1 \sin t_1 = \sin z_1 \sin A_1, \quad (5.17)$$

$$\cos \delta_2 \sin t_2 = \sin z_2 \sin A_2. \quad (5.18)$$

Так как из условия (5.15) следует равенство

$$t_1 = 360^\circ - t_2, \quad (5.19)$$

то, разделив (5.17) на (5.18), находим

$$\frac{\cos \delta_1}{\cos \delta_2} = \frac{\sin A_1}{\sin(360^\circ - A_1)} \cdot \frac{\sin t_2}{\sin(360^\circ - t_2)} = 1, \quad (5.20)$$

откуда получаем

$$\delta_1 = \delta_2. \quad (5.21)$$

Полученные условия для наилучших наблюдений на практике реализовать весьма трудно, поскольку ярких звёзд, которые имели бы равные склонения не очень много. Поэтому приходится подбирать звёзды с приблизительно равными склонениями.

Выводы:

1. Для определения поправки хронометра (определения местного звёздного времени) необходимо наблюдать прохождение двух звёзд с приблизительно равными склонениями через один и тот же альмукантарат в восточной и западной сторонах неба.
2. Так как ΔT_1 и ΔT_2 в формуле (5.16) есть случайные ошибки регистрации моментов прохождения звёзд через один альмукантарат, то для увеличения точности следует производить наблюдения на нескольких альмукантаратах, то есть на нескольких горизонтальных нитях, после чего приводить их к одному кругу высоты, вычисляя средний момент из всех прохождений через горизонтальные нити.

Для производства наблюдений подобраны специальные пары звёзд (пары Цингера) и составлены их эфемериды. В этих эфемеридах указываются:

1. N - номер пары;
2. S - среднее время наблюдения звёзд пары (наблюдения каждой звезды производится в моменты $S \pm 2^m 5$);
3. z - зенитное расстояние, соответствующее альмукантарату средней горизонтальной линии инструмента;
4. A_W, A_E - азимуты западной и восточной звёзд в моменты их прохождения через общий круг высоты.

5.4 Вычисление поправки часов

В дальнейшем будем снабжать индексами W и E (West и East) все данные для звёзд, пересекающих круг равных высот соответственно в западной и восточной частях неба. Запишем следующие выражения для часовых углов:

$$t_W = T_W + U - \alpha_W, \quad (5.22)$$

$$t_E = \alpha_E - (T_E + U). \quad (5.23)$$

Вычитая (5.23) из (5.22), получаем

$$t_W - t_E = T_W + T_E - (\alpha_W + \alpha_E) + 2U, \quad (5.24)$$

откуда

$$U = \frac{1}{2}(\alpha_W + \alpha_E) - \frac{1}{2}(T_W + T_E) + \frac{1}{2}(t_W - t_E). \quad (5.25)$$

Введём обозначения:

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_W + \alpha_E); \quad \delta = \frac{1}{2}(\delta_W + \delta_E); \quad (5.26)$$

$$t = \frac{1}{2}(t_W + t_E); \quad r = \frac{1}{2}(t_W - t_E), \quad (5.27)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\delta_W - \delta_E); \quad \beta = \frac{1}{2}(\alpha_E - \alpha_W). \quad (5.28)$$

С учётом этих обозначений перепишем (5.25) в следующем виде:

$$U = \alpha - \frac{1}{2}(T_W + T_E) + r. \quad (5.29)$$

Очевидно, что $r = 0$ при $\delta_W = \delta_E$. Эта величина называется приведением. Она возникает из-за различия склонений звёзд пары. Получим формулу для её вычисления. Для этого перепишем основное уравнение (5.7) принципа равных высот в следующем виде:

$$\sin \varphi \sin \delta_E + \cos \varphi \cos \delta_E \cos t_E = \sin \varphi \sin \delta_W + \cos \varphi \cos \delta_W \cos t_W. \quad (5.30)$$

Проведя необходимые преобразования, имеем

$$2 \sin \varphi \cos \delta \sin \epsilon + \cos \varphi (\cos \delta_W \cos t_W - \cos \delta_E \cos t_E) = 0. \quad (5.31)$$

Из равенств (5.26)-(5.28) получаем

$$t_W = t + r; \quad t_E = t - r; \quad (5.32)$$

$$\delta_W = \delta + \epsilon; \quad \delta_E = \delta - \epsilon. \quad (5.33)$$

Подстановка (5.32), (5.33) в (5.31) даёт

$$\begin{aligned} & \sin \varphi \cos \delta \sin \epsilon - \\ & - \cos \varphi (\cos \delta \cos \epsilon \sin t \sin r + \sin \delta \sin \epsilon \cos t \cos r) = 0 \end{aligned} \quad (5.34)$$

или

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \epsilon}{\sin t} - \sin r - \frac{\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \epsilon}{\operatorname{tg} t} \cos r = 0. \quad (5.35)$$

Пусть

$$\frac{\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \epsilon}{\operatorname{tg} t} = \operatorname{tg} m, \quad (5.36)$$

тогда из (5.35) получаем

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \epsilon}{\sin t} \cos m = \sin r \cos m + \cos r \sin m = \sin(r + m). \quad (5.37)$$

Отсюда, полагая

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \epsilon}{\sin t} \cos m = \sin n, \quad (5.38)$$

найдём

$$\sin n = \sin(r + m). \quad (5.39)$$

Теперь для искомой величины имеем

$$r = n - m. \quad (5.40)$$

Таким образом, величина приведения r вычисляется по формуле (5.40), где вспомогательные параметры m и n определяются уравнениями (5.36) и (5.38).

5.5 Суточная аберрация и изменение наклона трубы

В формулу (5.29) для вычисления поправки часов нужно ввести ещё поправки, учитывающие явления суточной аберрации и изменение наклона трубы при переводе инструмента с одного азимута на другой. Поскольку обе эти причины связаны с изменением видимого зенитного расстояния звёзд, получим сначала формулу, связывающую продолжительность ΔT прохождения

звёздой дуги Δz вертикала. С этой целью для параллактического треугольника $Pz\sigma$ (рис.5.1) напишем следующие выражения:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (5.41)$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t, \quad (5.42)$$

где

$$t = T + U - \alpha. \quad (5.43)$$

Продифференцируем (5.41) по z и T , считая все остальные параметры постоянными, и заменим дифференциалы dz и dT конечными приращениями Δz и ΔT :

$$-\sin z \Delta z = -\cos \varphi \cos \delta \sin t \Delta T. \quad (5.44)$$

С учётом (5.42) имеем

$$\sin z \Delta z = \cos \varphi \sin z \sin A \Delta T, \quad (5.45)$$

откуда для интересующей нас величины ΔT получаем:

$$\Delta T = \frac{\Delta z}{\cos \varphi \sin A}. \quad (5.46)$$

5.5.1 Поправка за суточную абберацию

Известно, что суточная абберация отклоняет истинное место светила σ на величину

$$\sigma\sigma' = 0.''32 \cos \varphi \sin \sigma E \quad (5.47)$$

вдоль большого круга σE по направлению к точке востока.

На рис. 5.2 изображены положения, соответствующие наблюдению звёзд в западной и восточной половинах небесной сферы. При этом σ – истинное положение звёзд, σ' – положения, смещённые абберацией, а σ'' – проекции положений σ' на соответствующие вертикалы, так что изменения зенитного расстояния, обусловленные абберацией, равны дугам $\sigma\sigma''$. Очевидно, что эти изменения можно представить в виде

$$\Delta z = z - z', \quad (5.48)$$

где z – истинное зенитное расстояние, а z' – зенитное расстояние, искажённое абберацией. Для западной звезды $\Delta z > 0$, а для

восточной $\Delta z < 0$. Считая прямоугольный треугольник $\sigma\sigma''\sigma'$ плоским, имеем

$$\Delta z = z - z' = \sigma\sigma' \cos z\sigma\sigma' = 0.''32 \cos \varphi \sin \sigma E \cos z\sigma\sigma'. \quad (5.49)$$

Из треугольника $z\sigma E$ находим

$$\sin \sigma E \cos z\sigma E = \cos zE \sin \sigma z - \sin zE \cos \sigma z \cos \sigma zE. \quad (5.50)$$

Так как $zE = 90^\circ$ и $\sigma zE = 90^\circ + A$, то

$$\sin \sigma E \cos z\sigma E = \cos z \sin A. \quad (5.51)$$

Поэтому

$$\Delta z = 0.''32 \cos \varphi \cos z \sin A. \quad (5.52)$$

С учётом (5.52) вместо формулы (5.46) получаем

$$\Delta T = 0.''32 \cos z = 0.^s021 \cos z. \quad (5.53)$$

Аналогично, из прямоугольного треугольника $\sigma\sigma''\sigma'$ следует

$$z - z' = -\Delta z = \sigma\sigma' \sin \sigma''\sigma\sigma' \quad (5.54)$$

или

$$\Delta z = 0.''32 \cos \varphi \sin \sigma E \cos z\sigma E. \quad (5.55)$$

Из сферического треугольника σzE имеем

$$\sin \sigma E \cos z\sigma E = \cos z \sin A. \quad (5.56)$$

Из выражений (5.55), (5.56) и (5.46) вновь получается формула (5.53).

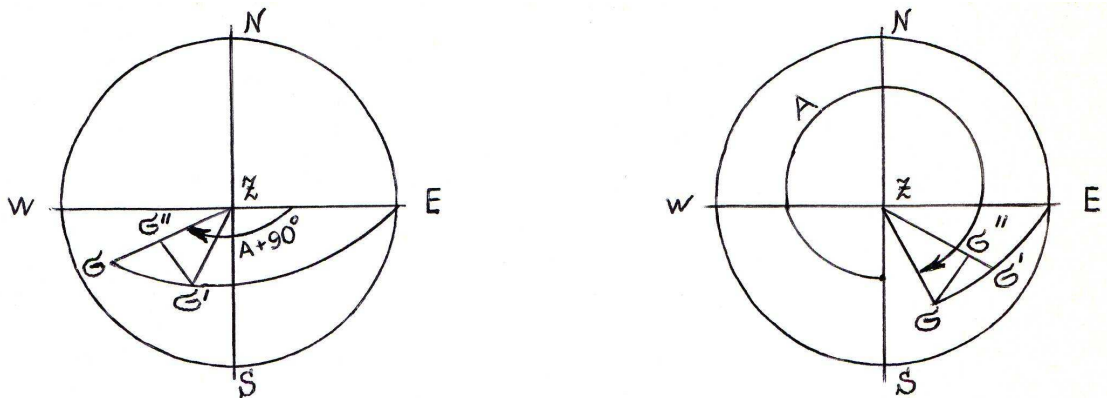


Рис. 5.2: Суточная абберация

Нетрудно убедиться в том, что и в западной и в восточной частях неба смещённая абберацией звезда достигнет наблюдаемого зенитного расстояния позже, чем в том случае, если бы абберации не существовало. Следовательно, наблюдаемые моменты T_W и T_E следует уменьшить на величину ΔT , задаваемую формулой (5.53). Поэтому с поправкой за абберацию формула (5.29) принимает следующий вид

$$U = \alpha - \frac{1}{2}(T_W + T_E) + r + \delta\alpha, \quad (5.57)$$

где

$$\delta\alpha = 0.^\circ 021 \cos z. \quad (5.58)$$

5.5.2 Поправка за изменение наклона трубы

Практика показывает, что установленное зенитное расстояние трубы для наблюдения первой звезды пары Цингера изменяется при повороте инструмента в положение для наблюдения второй звезды. Эти изменения фиксируются талькоттовским уровнем, который жёстко скрепляется с горизонтальной осью трубы. Регистрируемые уровнем изменения зенитного расстояния трубы вычисляются по формуле

$$\Delta z = \Delta i \frac{\tau}{2}, \quad (5.59)$$

где τ - цена деления талькоттовского уровня, а наклонность уровня вычисляется по формуле

$$\Delta i = \pm[(л + п)_W - (л + п)_E]. \quad (5.60)$$

В этом выражении через $л + п$ обозначены суммы отсчётов левого и правого концов пузырька уровня для западной и восточной звезды. Пусть первой в паре наблюдается западная звезда, которая проходит малый круг $z = z_W$ в момент T_W . После поворота инструмента труба займёт положение z_E . Пусть прохождение восточной звезды через круг $z = z_E$ произойдёт в момент T_E . Для редукации этого момента к кругу $z = z_W$ момент T_E надо исправить отрицательной поправкой ΔT , если $\Delta z = z_E - z_W < 0$ и положительной поправкой в противоположном случае (рис. 5.3).

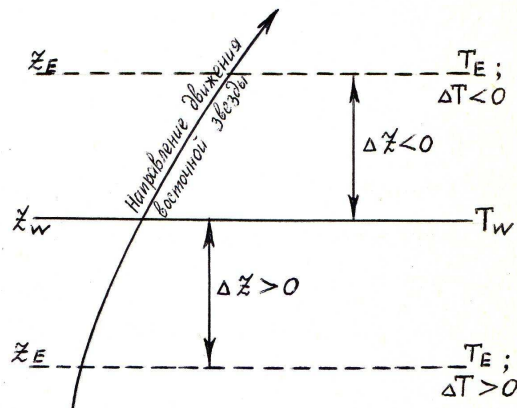


Рис. 5.3: Порядок наблюдений W - E

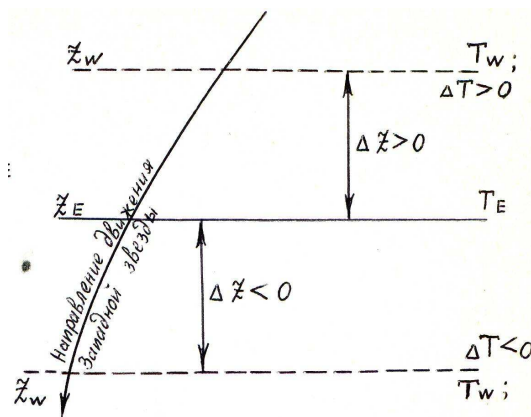


Рис. 5.4: Порядок наблюдений E - W

Аналогично, пусть первой звездой в паре наблюдается восточная звезда, которая проходит альмукантарат $z = z_E$ в момент T_E . После поворота инструмента труба примет положение z_W , а вторая звезда пересечёт круг $z = z_W$ в момент T_W . Для редукции этого момента к альмукантарату $z = z_E$ момент T_W следует исправить положительной поправкой ΔT , если $\Delta z = z_E - z_W > 0$ и отрицательной поправкой, если $\Delta z < 0$ (рис. 5.4) Значение поправки ΔT в каждом из рассмотренных случаев можно получить с помощью формулы (5.46). Действительно, подставляя в неё выражение (5.59) и учитывая условие (5.15), получаем

$$\Delta T^s = \frac{\Delta i \tau''}{30 \cos \varphi \sin A_W}. \quad (5.61)$$

Вводя поправку ΔT^s в одно из слагаемых T_W или T_E формулы (5.57), находим выражение для поправки хронометра в оконча-

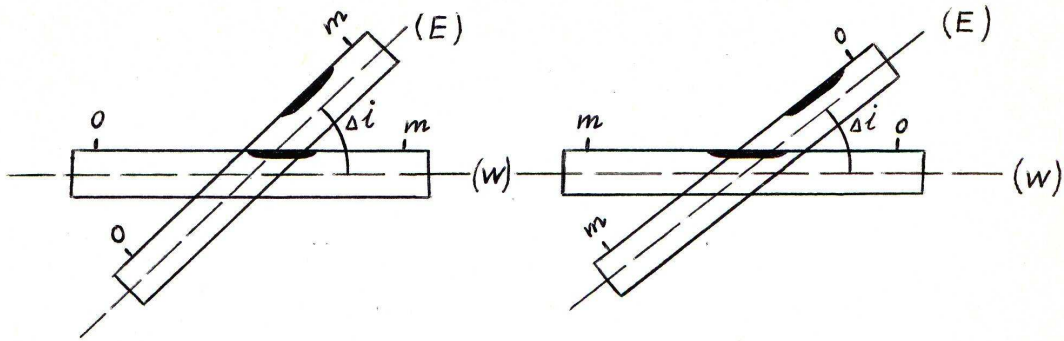


Рис. 5.5: Различные положения нуля уровня относительно объекта инструмента

тельном виде:

$$U = \alpha - \frac{1}{2}(T_W + T_E) + r + \delta\alpha + \delta U, \quad (5.62)$$

где δU - поправка за изменение наклонности трубы,

$$\delta U = \Delta i k^s \csc A_W, \quad (5.63)$$

$$k^s = \frac{\tau'' \sec \varphi}{60}. \quad (5.64)$$

Чтобы вывести правило знаков при вычислении Δi по формуле (5.65), рассмотрим ситуацию, изображённую на рис.5.3. В том случае, когда $\Delta z < 0$, правый конец уровня после поворота инструмента окажется выше левого. При этом для вычисления поправки ΔT^s по формуле (5.61) имеем (рис. 5.5):

- $\Delta i = (\text{л} + \text{п})_W - (\text{л} + \text{п})_E < 0$, если старшее деление уровня находится справа, то есть там, куда направлен объектив;
- $\Delta i = (\text{л} + \text{п})_E - (\text{л} + \text{п})_W < 0$, если нуль уровня справа, то есть там, куда направлен объектив.

Это же правило сохраняется и при всех других ситуациях, изображённых на рис. 5.3 и 5.4. Учитывая то, что знак поправки δU в формуле (5.62) противоположен знаку поправки ΔT^s , получаем, что величина Δi вычисляется по формуле

$$\Delta i = \pm[(\text{л} + \text{п})_W - (\text{л} + \text{п})_E], \quad (5.65)$$

где знак “+” берется в том случае если объектив трубы направлен в сторону нуля уровня, а знак “-”, если объектив направлен в сторону старшего деления уровня.

5.6 Вычисление долготы

Обработка результатов приёма радиосигналов позволяет получить для момента S по шкале гринвичского звездного времени опорный момент T по рабочим часам обсерватории. Постулируя отсутствие хода рабочих часов, можно вычислить местное звездное время

$$S_\lambda = T + U, \quad (5.66)$$

где через U обозначена поправка, полученная путем осреднения поправок u_k по наблюдениям звезд пар Цингера,

$$U = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_k. \quad (5.67)$$

Следовательно, наблюденное значение долготы теперь можно вычислить по формуле

$$\lambda_{\text{obs}} = S_\lambda - S. \quad (5.68)$$

Отличие наблюденной долготы от принятого для данного места эталонного значения λ_0

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_{\text{obs}} \quad (5.69)$$

называется личной разностью. Эта величина является систематической ошибкой наблюдателя.

5.7 Наблюдение звёзд пар Цингера

Работа по определению поправки часов долготы состоит из следующих этапов:

- I. Приём радиосигналов (получение на момент гринвичского звездного времени S отсчета T по рабочим часам обсерватории;
- II. Наблюдение звёзд пар Цингера (6-10 пар);
- III. Обработка журнала наблюдений;
- IV. Вычисление поправки часов по каждой паре и получение окончательного результата.

5.7.1 Инструкция для наблюдений звёзд пар Цингера

Для производства астрономических наблюдений необходимо выполнить следующую последовательность операций:

- Отрегулировать инструмент. Качество регулировки проверить талькоттовским уровнем. В разных азимутах уход пузырька не должен быть больше 2-3 делений.
- Установить инструмент в плоскости меридиана (точность 1') по Полярной звезде или по азимуту предмета.
- Проверить горизонтальность нитей.
- Выполнить наблюдения 6-10 пар Цингера. Наблюдение каждой пары провести с помощью описанной ниже последовательности действий:
 1. в положении инструмента “КРУГ ЛЕВО” установить на вертикальном круге зенитное расстояние, данное в эфемериде.
 2. установить азимут той звезды в паре, которая наблюдается первой.
 3. закрепить талькоттовский уровень и вывести его пузырёк на середину. Во время наблюдения пары талькоттовский уровень трогать нельзя.
Замечание: пункты 1), 2), 3) нужно выполнить за 3-5 минут до эфемеридного значения (среднего момента наблюдения звёзд пары) S .
 4. при появлении звезды в поле зрения снять показания талькоттовского уровня и микрометренным винтом горизонтального круга привести звезду в биссектор.
 5. удерживая звезду микрометренным винтом горизонтального круга в биссекторе, засечь по хронометру с точностью 0.2 удара ($0^s.1$) моменты прохождения звезды через каждую нить (рис. 5.6). Поскольку звезда пересекает нити с интервалом $15 - 25^s$, в журнале наблюдений удаётся записывать только секунды. Часы и минуты обязательно должны быть записаны для первой и последней нити.

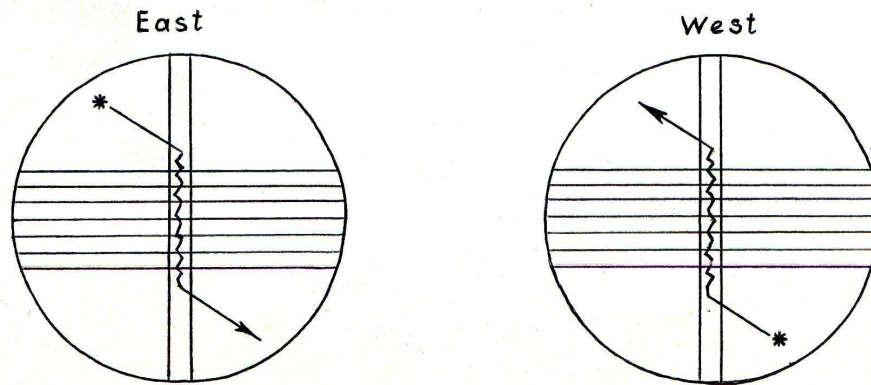


Рис. 5.6: Пары звезд Цингера в поле зрения инструмента

6. после прохождения звезды через все нити записать показание талькоттовского уровня.
7. установить азимут второй звезды в паре. Талькоттовский уровень не трогать.
8. наблюдение второй звезды провести так же, как и первой (пункты 4-8). Следует помнить, что вторая звезда в паре появляется в том месте поля зрения, куда ушла первая, и движется в противоположном направлении. Поэтому запись в журнале моментов прохождения второй звезды через нити следует делать снизу вверх.
9. открепить талькоттовский уровень.

На этом наблюдение одной пары заканчивается. Можно приступить к наблюдению следующей пары.

Замечание: если наблюдатель не успеет отметить момент прохождения через какую-нибудь нить, то в журнале наблюдений ставится черта и наблюдение на этой нити другой звезды в дальнейшем не используется.

5.7.2 Обработка журнала наблюдений

1) Вычисляются значения $л + п$ до и после наблюдений. Образуют средние и получают $(л+п)_W$ и $(л+п)_E$. Затем вычисляют величину Δi по формуле

$$\Delta i = \pm[(л+п)_W - (л+п)_E]. \quad (5.70)$$

Знак выбирается в соответствии с правилом (5.65), символически представленным на рис. 5.7.

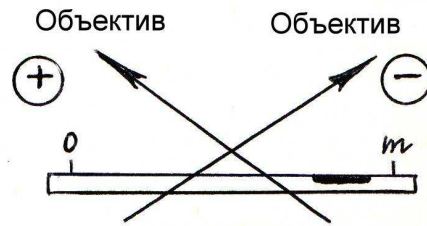


Рис. 5.7: Правило определения знака в формуле 5.70

2) Переводят удары в секунды и получают для каждой нити величины

$$\frac{1}{2}(T_W + T_E)_i; \quad \frac{1}{2}(T_W - T_E)_i. \quad (5.71)$$

3) Вычисляют средние значения моментов

$$T_W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_W^i; \quad T_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_E^i. \quad (5.72)$$

4) Вычисляют средние значения полусумм и полуразностей моментов

$$A_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(T_W + T_E)_i; \quad A_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(T_W - T_E)_i. \quad (5.73)$$

5) Осуществляют контроль вычислений:

$$\frac{1}{2}(T_W + T_E) = A_1; \quad \frac{1}{2}(T_W - T_E) = A_2. \quad (5.74)$$

Журнал наблюдений пар Цингера

Пара 431 $Z_0 = 24^\circ 01' S = 20^h 56^m .4$ $A_E = 251^\circ 13' (2^m .4)$ $A_W = 103^\circ 20' (3^m .9)$

Уровень	Нити	Хронометр	T_E^i	Уровень	Нити	Хронометр	T_W^i	$\frac{1}{2}(T_W + T_E)$	$\frac{1}{2}(T_W - T_E)$
67.3-84.9				68.3-85.8					
	1	$20^h 52^m 25^s + 6.6$	$20^h 52^m 28^s .30$		1	$20^h 59^m 35^s + 8.2$	$20^h 59^m 39^s .10$	$20^h 56^m 03^s .700$	$3^m 35^s .400$
	2	$45 + 2.2$	$46^s .10$		2	$20^s + 4.3$	$22^s .15$	$04^s .125$	$18^s .025$
	3	$00 + 3.5$	$01^s .75$		3	$05 + 3.5$	$06^s .75$	$04^s .250$	$02^s .500$
	4	$15 + 7.3$	$18^s .65$		4	$50 + 0.4$	$50^s .20$	$04^s .425$	$2^m 45^s .775$
	5	$35 + 0.5$	$35^s .25$		5	$30 + 8.2$	$34^s .10$	$04^s .675$	$29^s .425$
	6	$50 + 4.6$	$52^s .30$		6	$15 + 5.4$	$17^s .70$	$05^s .000$	$12^s .700$
	7	$05 + 6.5$	$08^s .25$		7	$00 + 4.8$	$02^s .40$	$05^s .325$	$1^m 57^s .075$
	8	$20 + 9.8$	$24^s .92$		8	$45 + 2.3$	$46^s .15$	$05^s .525$	$40^s .625$
66.8-84.1	9	$20^h 54^m 40^s + 3.4$	$20^h 54^m 41^s .70$	68.2-85.7	9	$20^h 57^m 25^s + 9.5$	$20^h 57^m 29^s .75$	$20^h 56^m 05^s .575$	$24^s .025$
$(\pi + \Pi)_E$			T_E	$(\pi + \Pi)_W$			T_W	A_1	A_2
151.70			$20^h 53^m 35^s .244$	154.00			$20^h 58^m 34^s .256$	$20^h 56^m 04^s .750$	$2^m 29^s .506$
$\Delta i = 2.30$; $\frac{1}{2}(T_W + T_E) = 20^h 56^m 04^s .750$; $\frac{1}{2}(T_W - T_E) = 2^m 29^s .506$									

Общая схема обработки пар Цингера. Величины α , β , δ , ϵ вычисляются предварительно.

№	Величины	Номера пар Цингера				Способ вычисления
		431	1443	...	446	
1	δ	57°58'11".99	37°47'16".87	...	36°23'43".67	$\delta = \frac{1}{2}(\delta_W + \delta_E)$
2	ϵ	-1°05'24".78	-37'24".03	...	51'39".18	$\epsilon = \frac{1}{2}(\delta_W - \delta_E)$
3	β	3 ^h 07 ^m 32. ^s 701	3 ^h 46 ^m 22. ^s 585	...	3 ^h 36 ^m 34. ^s 365	$\beta = \frac{1}{2}(\alpha_W - \alpha_E)$
4	A_2	2 ^m 29. ^s 506	-1 ^m 57. ^s 861	...	3 ^m 03. ^s 378	$A_2 = \frac{1}{2}(T_W - T_E)$ из ж. н.
5	t	3 ^h 10 ^m 02. ^s 207	3 ^h 44 ^m 24. ^s 724	...	3 ^h 39 ^m 37. ^s 743	$t = \beta + A_2$
6	$\text{tg } \delta$	1.598468	0.775344	...	0.737140	
7	$\text{tg } \epsilon$	-0.0190301	-0.0108798	...	0.0150264	
8	$\text{tg } t$	1.091658	1.488323	...	1.423237	
9	$\text{tg } m$	-0.0278650	-0.00566784	...	0.00778264	$\text{tg } m = \frac{\text{tg } \delta \text{ tg } \epsilon}{\text{tg } t}$
10	m''	-5746".083	-1169".064	...	1605".25	
11	$\cos m$	0.9996120	0.9999839	...	0.9999697	
12	$\text{tg } \varphi$	1.728030				$\varphi = 59^\circ 56' 32''.5$
13	$\sin t$	0.737385	0.830041	...	0.818222	
14	$\sin n$	-0.0445790	-0.0226499	...	0.0317337	$\sin n = \frac{\text{tg } \epsilon \text{ tg } \varphi}{\sin t} \cos m$
15	n''	-9198".128	-4672".271	...	6546".656	

Общая схема обработки пар Цингера. Продолжение 1

№	Величины	Номера пар Цингера				Способ вычисления
		431	1443	...	446	
16	r^s	$-230.^s136$	$-233.^s547$	...	$329.^s427$	$r^s = (n'' - m'')/15$
17	Δi	2.30	4.10	...	4.10	из ж. н.
18	$\sec \varphi$	1.996519				$\varphi = 59^\circ 56' 32''.5$
19	$\frac{\tau''}{2}$	$1''.434$				цена полуделения талькоттовского уровня
20	k^s	0.095409				$k^s = \frac{\tau'' \sec \varphi}{60}$; $\sec \varphi = 1/996519$
21	A_W	$103^\circ 20'$	$81^\circ 58'$	...	$83^\circ 08'$	Из эфемерид
22	$\csc A_W$	1.027701	1.009910	...	1.007224	
23	δ_u	$0.^s255$	$0.^s395$	...	$0.^s394$	$\delta_u = k^s \Delta i \csc A_W$
24	z	$24^\circ 01'$	$41^\circ 16'$	...	$41^\circ 46'$	Из эфемерид
25	$\cos z$	0.913427	0.751648	...	0.745864	
26	δ_α	$0.^s019$	$0.^s015$	...	$0.^s015$	$\delta_\alpha = 0.^s021 \cos z$
27	$\delta_u + \delta_\alpha$	$0.^s244$	$0.^s410$	...	$0.^s409$	

Общая схема обработки пар Цингера. Продолжение 2

№	Величины	Номера пар Цингера				Способ вычисления
		431	1443	...	446	
28	A_1	$20^h 56^m 04.^s 750$	$21^h 04^m 43.^s 383$	...	$21^h 36^m 52.^s 961$	$A_1 = \frac{1}{2}(T_W + T_E)$ Из ж. н.
29	α	$21^h 00^m 46.^s 564$	$21^h 09^m 28.^s 546$	...	$21^h 32^m 14.^s 967$	$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_W + \alpha_E)$ ЭВМ
30	u_k	$51.^s 922$	$52.^s 026$	...	$51.^s 842$	$u_k = \alpha - A_1 + r + \delta_u + \delta_\alpha$
34	U	$51.^s 938$				$U = \frac{1}{n} \sum u_k(X)$
35	T	$20^h 46^m 47.^s 515$				Опорный момент приема радиосигнала
36	S_λ	$20^h 47^m 39.^s 453$				
37	S	$18^h 46^m 28.^s 856$				Гринвичское время в момент T
38	λ_{obs}	$2^h 01^m 10.^s 597$				$\lambda_{obs} = S_\lambda - S$
39	λ_0	$2^h 01^m 10.^s 771$				
40	$\Delta\lambda$	$0.^s 174$				$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_{obs}$

Глава 6

Определение широты места наблюдения методом Певцова

М.В. Певцов
(1843-1902)



6.1 Идея метода

Пусть две звезды с координатами α_1, δ_1 и α_2, δ_2 наблюдаются на одинаковом зенитном расстоянии z в моменты T_1 и T_2 по рабочему хронометру. Из параллактического треугольника для каждой звезды (рис. 6.1) имеем

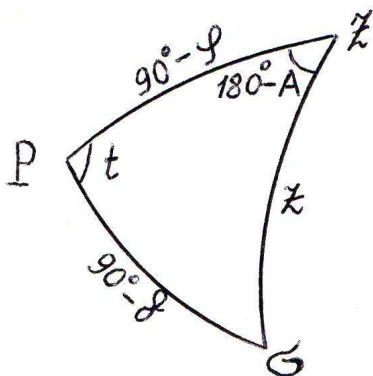


Рис. 6.1: Параллактический треугольник

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos t_1, \quad (6.1)$$

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos t_2. \quad (6.2)$$

В этих выражениях:

φ - искомая широта места наблюдения;

t_1, t_2 - часовые углы обеих звёзд в момент их прохождения через круг равных высот:

$$t_1 = T_1 + U - \alpha_1, \quad (6.3)$$

$$t_2 = T_2 + U - \alpha_2, \quad (6.4)$$

U - известная поправка хронометра. Из выражений (6.1) и (6.2) получаем уравнение

$$\sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos t_1 = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos t_2, \quad (6.5)$$

решая которое, можно получить широту φ (метод Певцова¹).

¹Михаил Васильевич Певцов (1843-1902) - военный топограф (генерал-майор), путешественник, ученый. Разработал метод определения географической широты, получивший применение в геодезии.

Выясним, как нужно производить наблюдения, чтобы ошибки моментов регистрации ΔT_1 и ΔT_2 прохождения звёзд через один и тот же альмукуантарат, а также ошибка ΔU поправки хронометра наименьшим образом сказались на ошибке определения широты $\Delta\varphi$. Для этого, считая координаты звёзд постоянными величинами, продифференцируем выражения (6.1) и (6.2) по φ , t_1 и t_2 . Выполнив дифференцирование и заменив дифференциалы конечными приращениями, получим

$$\begin{aligned} & (\cos \varphi \sin \delta_1 - \sin \varphi \cos \delta_1 \cos t_1) \Delta\varphi - \cos \varphi \cos \delta_1 \sin t_1 \Delta t_1 = \\ & = (\cos \varphi \sin \delta_2 - \sin \varphi \cos \delta_2 \cos t_2) \Delta\varphi - \cos \varphi \cos \delta_2 \sin t_2 \Delta t_2. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Из параллактического треугольника $Pz\delta$ (рис. 6.1) имеем

$$-\sin z \cos A = \sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos t, \quad (6.7)$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t. \quad (6.8)$$

Кроме того, из (6.3) и (6.4) следует

$$\Delta t_1 = \Delta T_1 + \Delta U, \quad (6.9)$$

$$\Delta t_2 = \Delta T_2 + \Delta U. \quad (6.10)$$

Из равенства (6.6) при учете (6.7) - (6.10) получаем

$$\begin{aligned} & (\cos A_1 - \cos A_2) \Delta\varphi + (\sin A_1 - \sin A_2) \cos \varphi \Delta U = \\ & = (\sin A_2 \Delta T_2 - \sin A_1 \Delta T_1) \cos \varphi, \end{aligned} \quad (6.11)$$

откуда

$$\begin{aligned} \Delta\varphi & = \frac{\cos \varphi (\sin A_2 \Delta T_2 - \sin A_1 \Delta T_1)}{\cos A_1 - \cos A_2} + \\ & + \frac{\cos \varphi (\sin A_2 - \sin A_1)}{\cos A_1 - \cos A_2} \Delta U. \end{aligned} \quad (6.12)$$

Из формулы (6.12) следует, что при выполнении условия

$$A_1 = 180^\circ - A_2 \quad (6.13)$$

влияние ΔU на ошибку определения широты $\Delta\varphi$ устраняется. Кроме того, действие ошибок ΔT_1 и ΔT_2 тем меньше, чем ближе к меридиану наблюдаются обе звезды. Однако вблизи меридиана высоты звёзд меняются очень медленно, в силу чего нельзя с достаточной точностью определить моменты их прохождения

через горизонтальную нить инструмента. Поэтому целесообразно наблюдать звёзды в зоне $15^\circ \leq z \leq 60^\circ$ при удалении от меридиана в пределах $6^\circ \div 40^\circ$ по азимуту.

Для производства наблюдений подобраны специальные пары звёзд (пары Певцова) и составлены их эфемериды. В эфемеридах указываются:

N - номер пары, названия звёзд и их звёздные величины;

S_N и S_S - моменты прохождения северной и южной звёзд через первую горизонтальную нить;

z - общее зенитное расстояние двух звёзд;

A_N и A_S - азимуты обеих звёзд в момент их прохождения через круг равных высот.

6.2 Вычисление широты

Как было выяснено выше, для получения широты места наблюдения по методу Певцова наблюдают на одной высоте две звезды вблизи меридиана, одну к югу, другую к северу от зенита. Обозначим через T_S и T_N моменты прохождения через горизонтальную нить инструмента соответственно южной и северной звезды с координатами α_S, δ_S и α_N, δ_N . Перепишем теперь основное уравнение принципа равных высот (6.5) с учётом введённых обозначений:

$$\sin \varphi \sin \delta_N + \cos \varphi \cos \delta_N \cos t_N = \sin \varphi \sin \delta_S + \cos \varphi \cos \delta_S \cos t_S. \quad (6.14)$$

В этом уравнении для часовых углов t_S и t_N имеем

$$t_S = T_S + U - \alpha_S = T_S - (\alpha_S - U), \quad (6.15)$$

$$t_N = T_N + U - \alpha_N = T_N - (\alpha_N - U). \quad (6.16)$$

Из уравнения (6.14) получаем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\cos \delta_S \cos t_S - \cos \delta_N \cos t_N}{\sin \delta_N - \sin \delta_S}. \quad (6.17)$$

Введём обозначения

$$D = \frac{1}{\sin \delta_N - \sin \delta_S}, \quad (6.18)$$

$$d_S = D \cos \delta_S; \quad d_N = D \cos \delta_N. \quad (6.19)$$

С учётом этих обозначений основную формулу (6.17) метода Певцова перепишем в виде

$$tg\varphi = d_S \cos t_S - d_N \cos t_N. \quad (6.20)$$

Практика показывает, что при переводе инструмента с одного азимута на другой первоначально установленное зенитное расстояние трубы изменяется. Эти изменения фиксируются с помощью талькоттовского уровня, который жестко скрепляется с горизонтальной осью вращения трубы. Изменение зенитного расстояния на величину

$$\Delta z = \Delta i \frac{\tau}{2}, \quad (6.21)$$

где τ - цена деления талькоттовского уровня, а Δi - изменение наклона уровня, выраженное в делениях уровня, вызовет задержку или опережение момента наблюдения звезды по сравнению с моментом его прохождения через первоначально заданный круг высоты. Получим аналитическую связь между поправкой наблюденного момента ΔT и значением изменения зенитного расстояния Δz . Для этого применительно к параллактическому треугольнику $Pz\sigma$ (рис.6.1) выпишем следующие выражения

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (6.22)$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t, \quad (6.23)$$

$$t = T + U - \alpha. \quad (6.24)$$

Продифференцируем (6.22) по z и T , считая все остальные параметры постоянными. Заменяя дифференциалы конечными приращениями, имеем

$$\sin z \Delta z = \cos \varphi \cos \delta \sin t \Delta T. \quad (6.25)$$

С учётом (6.23) получаем

$$\sin z \Delta z = \cos \varphi \sin z \sin A \Delta T, \quad (6.26)$$

откуда для интересующей нас величины ΔT находим:

$$\Delta T = \frac{\Delta z}{\cos \varphi \sin A}. \quad (6.27)$$

Будем вводить поправку ΔT в моменты наблюдения северной звезды. В этом случае, подставляя (6.21) в (6.27), получаем:

$$\Delta T_N = \frac{\Delta i}{\cos \varphi \sin A_N} \cdot \frac{\tau}{2}. \quad (6.28)$$

Знак этой поправки определяется знаком изменения наклонности уровня Δi . На рис. 6.2 через T_S и T_N обозначены моменты прохождения звёзд через альмукутантараты $z = z_S$ и $z = z_N$.

В том случае когда обе звезды наблюдаются к западу от меридиана, поправка $\Delta T_N > 0$, если $\Delta z = z_S - z_N > 0$ и $\Delta T_N < 0$, если $\Delta z < 0$. Если обе звезды наблюдаются к востоку от меридиана, то поправка $\Delta T_N < 0$, если $\Delta z > 0$ и $\Delta T_N > 0$, если $\Delta z < 0$.

Для получения правила вычисления наклонности Δi рассмотрим ситуацию, изображенную на рисунке и соответствующую $\Delta z > 0$. Очевидно, что при переходе от азимута южной звезды к азимуту северной правый конец талькоттовского уровня (совпадающий с направлением объектива трубы) должен приподняться (рис. 6.3).

Изменение наклонности будем вычислять по формуле

$$\Delta i = \pm[(\lambda + \pi)_S - (\lambda + \pi)_N], \quad (6.29)$$

где через λ и π обозначены соответственно отсчёты левого и правого концов пузырька уровня.

В формуле (6.29) следует взять знак "−" для положения уровня, изображенного на рис. 6.2 слева, и знак "+" для положения, показанного справа. Просматривая аналогичным образом все оставшиеся ситуации и учитывая, что при наблюдении обеих звёзд к востоку от меридиана $\sin A_N < 0$, приходим к общему правилу:

Знак "+" в формуле (6.29) берется в том случае, когда нуль уровня направлен в сторону объектива трубы;

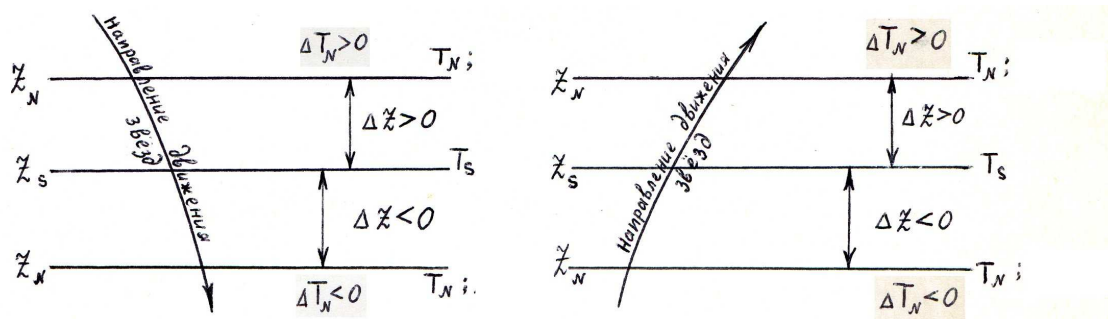


Рис. 6.2: Наблюдения к западу (слева) и к востоку (справа) от меридиана

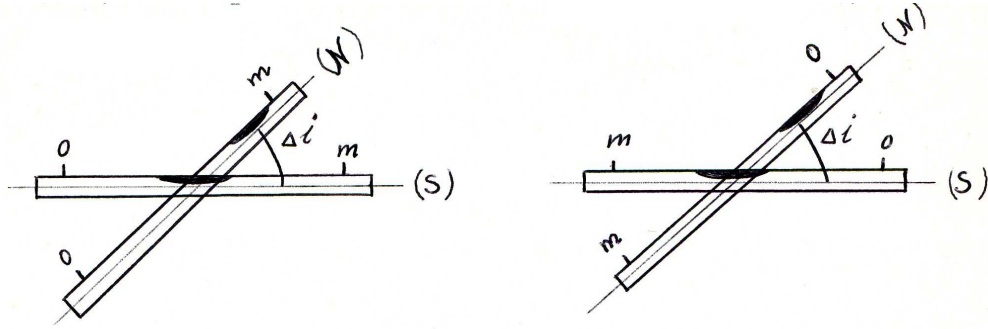


Рис. 6.3: Различные положения нуля уровня относительно объектива

Знак “-” в формуле (6.29) берется в том случае, когда в сторону объектива трубы направлено старшее деление уровня.

Свяжем теперь поправку ΔT_N с поправкой $\Delta \varphi$, которую нужно прибавить к значению широты, полученному по формуле (6.20). Для этого продифференцируем (6.20) по φ и T_N , считая все остальные переменные постоянными. Заменяя дифференциалы конечными приращениями, находим

$$\frac{\Delta \varphi}{\cos^2 \varphi} = d_N \sin t_N \Delta T_N. \quad (6.30)$$

Отсюда с учётом (6.19) имеем

$$\Delta \varphi = D \cos \delta_N \sin t_N \cos^2 \varphi \Delta T_N. \quad (6.31)$$

Из параллактического треугольника $Pz\sigma$ (см. рис. 6.1) следует

$$\sin t_N \cos \delta_N = \sin z \sin A_N, \quad (6.32)$$

Поэтому с учётом (6.28) из (6.32) получаем

$$\Delta \varphi = D \Delta i \frac{\tau}{2} \sin z \cos \varphi. \quad (6.33)$$

Эту формулу можно упростить для случая, когда обе звезды наблюдаются на одинаковом угловом удалении от меридиана, то есть

$$A_S = 180^\circ - A_N. \quad (6.34)$$

Отметим, что это требование вытекает из принципа наилучших условий для наблюдения пар Певцова и что пары звёзд Певцова

составлены с соблюдением этого условия. Поэтому из параллактического треугольника $Pz\sigma$ имеем

$$\sin \delta_N = \sin \varphi \cos z + \cos \varphi \sin z \cos A_S, \quad (6.35)$$

$$\sin \delta_S = \sin \varphi \cos z - \cos \varphi \sin z \cos A_S. \quad (6.36)$$

Вычитая (6.36) из (6.35) с учётом (6.18) находим:

$$\sin \delta_N - \sin \delta_S = \frac{1}{D} = 2 \cos \varphi \sin z \cos A_S. \quad (6.37)$$

Подставляя значение D , следующее из (6.37), в (6.33), для поправки $\Delta\varphi$ имеем окончательно:

$$\Delta\varphi = \Delta i \frac{\tau}{4} \sec A_S. \quad (6.38)$$

Таким образом, к значению широты φ , полученному по формуле (6.20), нужно прибавить поправку $\Delta\varphi$, обусловленную изменением наклона трубы. Величина Δi вычисляется по показаниям талькоттовского уровня с помощью формулы (6.29).

6.3 Порядок наблюдения пар Певцова

1. Выписать из эфемерид пар Певцова номер пары, названия обеих звёзд, общее зенитное расстояние z , азимуты наблюдения A_S и A_N , а также моменты прохождения s_S и s_N звёзд через первую горизонтальную нить инструмента.
2. Произвести регулировку инструмента и установить его точно в меридиане.
3. Проверить горизонтальность нитей.
4. Выставить трубу по зенитному расстоянию и азимуту первой звезды пары. Инструмент поставить в положение “КРУГ ЛЕВО”.
5. Скрепить с трубой талькоттовский уровень. Вывести его пузырёк на середину.
6. После появления в поле зрения звезды микрометренным винтом горизонтального круга привести звезду в биссектор (рис. 6.4). Сделать отсчёт момента прохождения звезды через первую нить (точность 0.2 удара) и снять показания талькоттовского уровня. Снова привести звезду в биссектор, сделать отсчёт момента прохождения через вторую нить, снять показания уровня и т. д.

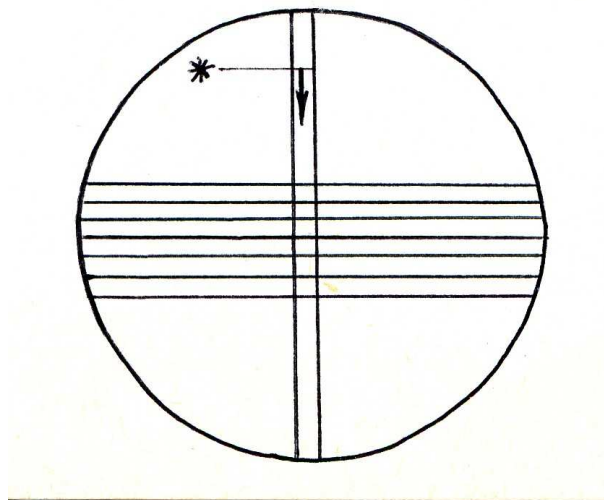


Рис. 6.4: Прохождение звезды в поле зрения игструмента

7. Открепить зажимной винт горизонтального круга и, не меняя установку трубы по зенитному расстоянию, установить инструмент по азимуту второй звезды. Талькоттовский уровень трогать нельзя.

8. После появления в поле зрения второй звезды пары произвести те же действия, что и в пункте 6.

Замечание: в отличие от пар Цингера обе звезды в парах Певцова проходят поле зрения трубы в одном направлении. Поэтому для обеих звёзд записи в журнале наблюдения производятся сверху вниз.

Журнал наблюдения пар Певцова

Дата 2/3 сент. 1983
года

Наблюдатель В. В.
Витязев

Северная звезда $z = 29^{\circ}47'.9$
 $A_N = 148^{\circ}12'$ $S_N =$
 $19^h 51^m .6$ ($2^m .2$)

Номер пары 283

Инструмент 112104, Хронометр 3555

Южная звезда
 $A_S = 30^{\circ}41'$ $S_S = 20^h 09^m .7$ ($3^m .3$)

№	Хронометр		Отсчёты уровня	(л+п) _n	Хронометр		Отсчёты уровня	(л+п) _s	Δi
	2	3			6	7				8	9	10
1	$19^h 48^m 55^s + 5.5$	57 ^s .75	67.0 - 82.0	149.0	$20^h 08^m 35^s + 10.5$	40 ^s .25	71.0 - 86.0	157.0	8.0
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	$49^m 55^s + 4.5$	57.25	67.0-82.0	149.0	$09^m 35^s + 9.0$	39.75	71.0 - 86.0	157.0	8.0
4	$50^m 25^s + 2.5$	26.25	67.0-82.1	149.1	$10^m 05^s + 6.5$	08.25	71.1 -86.0	157.1	8.0
5	$50^m 55^s + 2.5$	56.25	67.0-82.0	149.0	$10^m 35^s + 6.5$	38.25	71.0 -86.1	157.1	8.1
6	$51^m 25^s + 2.5$	26.25	67.1-82.0	149.1	$11^m 05^s + 5.5$	07.75	71.0 -86.1	157.2	8.1
7	$51^m 55^s + 2.5$	56.25	67.0-82.0	149.0	$11^m 35^s + 4.5$	37.25	71.1 -86.1	157.2	8.2
8	$52^m 25^s + 0.5$	25.25	67.0-82.0	149.0	$12^m 05^s + 2.5$	06.25	71.1 -86.2	157.3	8.3
9	$19^h 52^m 55^s + 1.5$	55.75	67.0-82.0	149.0	$12^m 35^s + 1.5$	35.75	71.2 -86.2	157.4	8.4

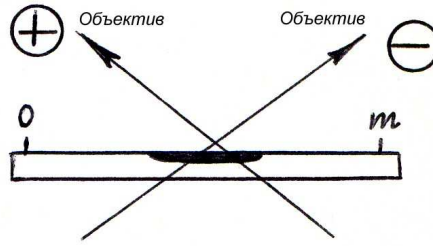


Рис. 6.5: Правило выбора знака в формуле (6.29)

6.4 Обработка результатов наблюдений

1. Обработать журнал наблюдений:

Столбцы 1 и 4 - перевести удары в секунды;

Столбцы 3 и 6 - посчитать значения $(\lambda + \pi)_S$ и $(\lambda + \pi)_N$;

Столбец 9 - вычислить для каждой нити величины Δi по формуле (6.29). Знак выбрать в соответствии с правилом, которое символически показано на рис. 6.5.

2. Вычислить видимые координаты α_N, δ_N и α_S, δ_S звёзд на средний момент их наблюдения.

3. Вычислить с семью знаками величины постоянные для обеих звёзд пары

$$D = \frac{1}{\sin \delta_N - \sin \delta_S};$$

$$d_S = D \cos \delta_S; \quad d_N = D \cos \delta_N.$$

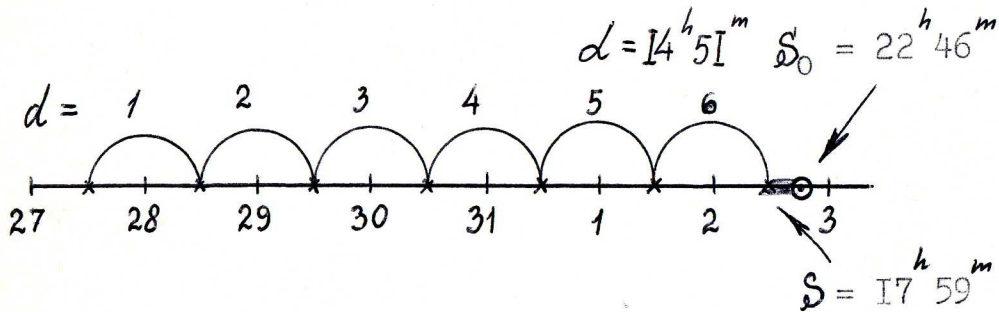
4. Продолжить вычисления широты по каждой нити, пользуясь расчетной схемой.

Видимые места

360(N)

авг. 27.7 $14^h 50^m 43^s.196_{-711}$ $74^\circ 13' 43''.05_{-184}$

сент. 6.7 $14^h 50^m 42^s.485$ $74^\circ 13' 41''.21$



$$n = \frac{1}{10} \left[6 + \frac{17^h 59^m - 14^h 51^m}{24} \right] = 0.613$$

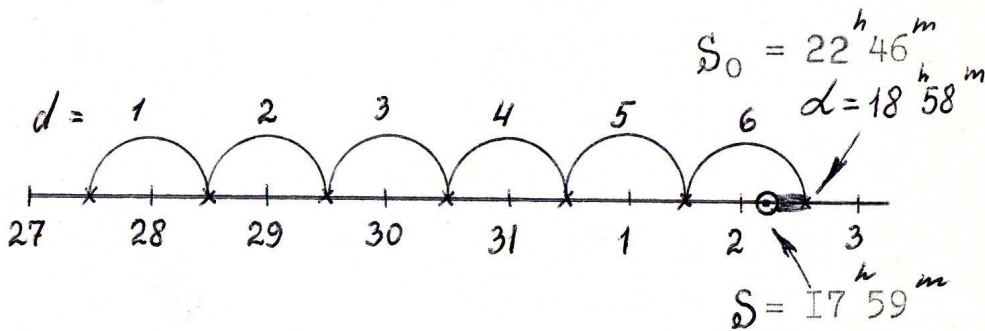
$$\alpha_N = 14^h 50^m 43^s.196 - 0^s.711 \cdot 0.613 = 14^h 50^m 42^s.760$$

$$\delta_N = 74^\circ 13' 43''.05 - 1''.84 \cdot 0.613 = 74^\circ 13' 41''.92$$

461(S)

авг. 27.9 $18^h 58^m 20^s.106_{-178}$ $32^\circ 39' 69''.72_{137}$

сент. 6.9 $18^h 58^m 19^s.928$ $32^\circ 39' 71''.09$



$$n = \frac{1}{10} \left[6 - \frac{18^h 58^m - 17^h 59^m}{24} \right] = 0.596$$

$$\alpha_S = 18^h 58^m 20^s.106 - 0^s.178 \cdot 0.596 = 18^h 58^m 20^s.000$$

$$\delta_S = 32^\circ 39' 69''.72 - 1''.37 \cdot 0.596 = 32^\circ 40' 10''.92$$

Обработка наблюдений пар Певцова

$$\alpha_S = 18^h 58^m 20^s .106 \quad \delta_S = 32^\circ 40' 10'' .54 \quad \alpha_N = 14^h 50^m 42^s .760 \quad \delta_N = 74^\circ 13' 41'' .92$$

$$D = 2.366535 \quad \frac{\pi}{4} \sec A_S = 0'' .834 \quad d_S = 1.992143 \quad d_N = 0.643235$$

Величины	1-я нить	2-я нить	3-я нить	4-я нить	...	8-я нить	Способ вычисления
T_S	20 ^h 08 ^m 40 ^s .25	20 ^h 09 ^m 39 ^s .75	20 ^h 10 ^m 08 ^s .25	20 ^h 10 ^m 38 ^s .25	...	20 ^h 12 ^m 35 ^s .75	Из ж. н.
$\alpha_S - U$	18 ^h 56 ^m 59 ^s .456						
t_S	1 ^h 11 ^m 40 ^s .794	1 ^h 12 ^m 40 ^s .294	1 ^h 13 ^m 08 ^s .794	1 ^h 13 ^m 38 ^s .794	...	1 ^h 15 ^m 36 ^s .294	$t_S = T_S - (\alpha_S - U)$
T_N	19 ^h 48 ^m 57 ^s .75	19 ^h 49 ^m 57 ^s .25	19 ^h 50 ^m 26 ^s .25	19 ^h 50 ^m 56 ^s .25	...	19 ^h 52 ^m 55 ^s .75	Из ж.н.
$\alpha_N - U$	14 ^h 49 ^m 22 ^s .216						
t_N	4 ^h 59 ^m 35 ^s .534	5 ^h 00 ^m 35 ^s .034	5 ^h 01 ^m 04 ^s .034	5 ^h 01 ^m 34 ^s .034	...	5 ^h 03 ^m 33 ^s .534	$t_N = T_N - (\alpha_N - U)$
$\cos t_S$	0.9514878	0.9501469	0.9494987	0.9488119	...	0.9460784	
$\cos t_N$	0.2605372	0.2563573	0.2543182	0.2522077	...	0.2437889	
$tg \varphi$	1.727912	1.727930	1.727950	1.727940	...	1.7279097	$tg \varphi_0 = d_S \cos t_S - d_N \cos t_N$
φ_0	59°56'26''.17	27''.14	28''.18	27''.63	...	26''.07	
Δi	8.0	8.0	8.0	8.1	...	8.4	Из ж. н.
$\Delta \varphi$	6''.67	6''.67	6''.67	6''.76	...	7''.01	$\Delta \varphi = \Delta i \frac{\pi}{4} \sec A_S$
φ	59°56'32''.84	33''.81	34''.85	34''.39	...	33''.08	$\varphi = \varphi_0 + \Delta \varphi$
$\varphi_{\text{ср}}$	59°56'33''.86						$\varphi_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum \varphi$
$\varphi - \varphi_{\text{ср}}$	-1''.02	-0''.05	+0''.99	+0''.53	...	-0''.78	
$\sum (\varphi - \varphi_{\text{ср}})^2$	4.9384						
σ_φ	±0''.30						$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{\sum (\varphi - \varphi_{\text{ср}})^2}{n(n-1)}}$

Глава 7

Определение широты пункта методом Талькотта



7.1 Описание метода

Если пронаблюдать две звезды, одну к югу, а другую к северу от зенита в верхней кульминации, то можно записать

$$z_S = \varphi - \delta_S, \quad (7.1)$$

$$z_N = \delta_N - \varphi, \quad (7.2)$$

где z_S , δ_S - зенитное расстояние и склонение для звезды, кульминирующей к югу от зенита, а z_N , δ_N - аналогичные величины для звезды, кульминирующей к северу от зенита. Из выражений (7.1) и (7.2) получаем

$$\varphi = \frac{1}{2}(\delta_S + \delta_N) + \frac{1}{2}(z_S - z_N). \quad (7.3)$$

Если северная звезда наблюдается в нижней кульминации, то имеем

$$z_N = 180^\circ - (\varphi + \delta_N). \quad (7.4)$$

Из выражений (7.1) и (7.4) находим

$$\varphi = 90^\circ + \frac{1}{2}(\delta_S - \delta_N) + \frac{1}{2}(z_S - z_N). \quad (7.5)$$

Метод определения широты, основанный на использовании формул (7.3) и (7.5), называется методом Талькотта¹. Характерной особенностью этого метода является то, что измерению подлежат не зенитные расстояния z_S и z_N , а непосредственно их разность. Это достигается за счёт наблюдения специально подобранных звёзд (пар Талькотта). Звёзды в парах Талькотта подобраны так, что разность $z_S - z_N$ оказывается меньше диаметра поля зрения трубы. Это позволяет измерять разность зенитных расстояний окулярным микрометром, не прибегая к отсчетам вертикального круга. Указанное обстоятельство делает способ Талькотта одним из самых точных методов определения широты в классической астрометрии. Он являлся основным методом в работе Международной службы широты и Международной службы движения полюса.

¹Предложен датским астрономом П. Хорребоу в 1740 г., практически разработан американским геодезистом А. Талькоттом (А. Talcott) в 1857 г. и назван его именем.

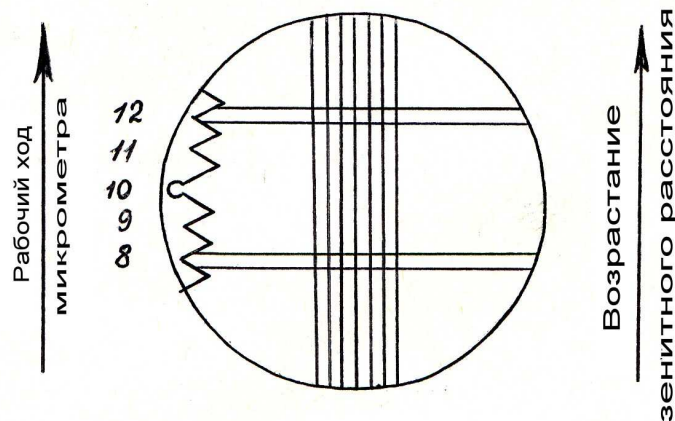


Рис. 7.1: Рабочий ход микрометра

7.2 Рабочие формулы

Для определения широты по методу Талькотта необходимо выразить полуразность зенитных расстояний $\frac{1}{2}(z_S - z_N)$, входящую в формулы (7.3) и (7.5), через отсчеты микрометра, а также учесть влияние рефракции и наклонности на сделанные отсчеты. При наблюдениях инструмент выставляется точно в меридиан, однако для повышения точности производят измерения не только на центральной, но и на боковой нитях. Поэтому в формулы для вычисления широты необходимо ввести ещё так называемую поправку за кривизну параллели, учитывающую редукцию зенитного расстояния с боковых нитей на центральную. Коробка окулярного микрометра должна быть повернута таким образом, чтобы неподвижные нити стали вертикальными, а биссектор перемещался бы, измеряя зенитные расстояния вдоль вертикала. Предположим, что рабочий ход микрометра (вращение барабана в сторону возрастания оцифровки) соответствует перемещению биссектора по направлению возрастания зенитного расстояния (рис. 7.1).

Введем следующие обозначения:

τ - цена деления Талькоттовского уровня;

i - наклонность оси уровня, выраженная в делениях уровня;

R - цена одного оборота окулярного микрометра;

M - отсчет микрометра в момент кульминации;

m - отсчёт микрометра, соответствующий пересечению звездой боковой нити;

m_0 - отсчёт микрометра, соответствующий нуль-пункту гребёнки (обычно $m_0 = 10$);

z_0 - отсчёт вертикального круга, соответствующий нуль-пункту гребёнки m_0 ;

ρ - влияние рефракции.

На рис. 7.2 используются следующие обозначения: PZ - меридиан, P - полюс, Z - зенит. Сплошной линией показан путь звезды $E(\alpha, \delta)$, прерывистой - проекция подвижной нити биссектора на небесную сферу. Отрезки k_N и k_S представляют собой поправки за кривизну параллели. Из рисунка видно, что если обе звезды наблюдаются в верхней кульминации, то

$$M_S R = m_S R + k_S, \tag{7.6}$$

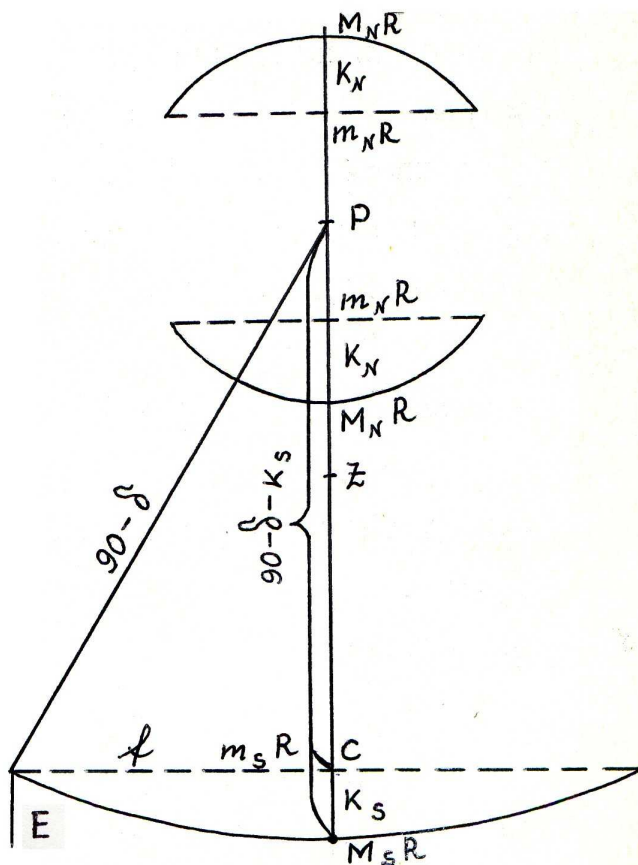


Рис. 7.2: К теории метода Талькотта

$$M_N R = m_N R - k_N. \quad (7.7)$$

Если же северная звезда наблюдается в нижней кульминации, то

$$M_N R = m_N R + k_N. \quad (7.8)$$

Для определения величины k_S из прямоугольного треугольника ERC имеем по формуле косинусов:

$$\cos(90^\circ - \delta) = \cos f \cos(90^\circ - (\delta + k_S)), \quad (7.9)$$

где через f обозначено расстояние боковой нити от центральной. Из этого равенства находим:

$$\sin \delta = \left(1 - 2 \sin^2 \frac{f}{2}\right) \sin(\delta + k_S). \quad (7.10)$$

Преобразуем это выражение:

$$2 \sin^2 \frac{f}{2} \sin(\delta + k_S) = \sin(\delta + k_S) - \sin \delta = 2 \cos \left(\delta + \frac{k_S}{2}\right) \sin \frac{k_S}{2}. \quad (7.11)$$

Пренебрегая величинами k_S и $\frac{k_S}{2}$ по сравнению с δ получим

$$\sin^2 \frac{f}{2} \operatorname{tg} \delta = \sin \frac{k_S}{2}, \quad (7.12)$$

откуда для интересующей нас величины k_S находим

$$k_S = \frac{f^2}{2} \sin 1'' \operatorname{tg} \delta. \quad (7.13)$$

Можно показать, что эта же формула служит и для определения поправок k_N .

Запишем теперь выражения для зенитных расстояний южной и северной звёзд, наблюдаемых на j -й боковой нити

$$z_S^{(j)} = z_0 + (m_S^{(j)} - m_0)R + i_S \frac{\tau}{2} + \rho_S + k_S^{(j)}, \quad (7.14)$$

$$z_N^{(j)} = z_0 + (m_N^{(j)} - m_0)R + i_N \frac{\tau}{2} + \rho_N + k_N^{(j)}, \quad (7.15)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Усредняя каждое из выражений (7.14) и (7.15) по всем нитям (включая центральную) и вычитая средние значения z_S и z_N ,

получим в окончательном виде формулу для вычисления полуразности зенитных расстояний

$$\frac{1}{2}(z_S - z_N) = (M_S - M_N)\frac{R}{2} + \frac{\tau}{4}(i_S - i_N) + \Delta\rho + k. \quad (7.16)$$

В этой формуле общая поправка за кривизну параллели вычисляется следующим образом:

$$k = \frac{1}{2}(k_S \pm k_N) = F_S \operatorname{tg} \delta_S \pm F_N \operatorname{tg} \delta_N, \quad (7.17)$$

$$F_S = \frac{\sin 1''}{4(n+1)} \sum_{j=1}^n F_j^2; \quad F_N = \frac{\sin 1''}{4(n+1)} \sum_{j=1}^n f_j^2, \quad (7.18)$$

где через F_S и F_N обозначены расстояния боковых нитей от центральной в случае наблюдения южной и северной звёзд соответственно. Расстояния боковых нитей от центральной считаются известными. В формулах (7.15) и (7.17) нижний знак соответствует случаю наблюдения северной звезды в нижней кульминации.

Получим теперь выражение для вычисления рефракционной поправки

$$\Delta\rho = \frac{1}{2}(\rho_S - \rho_N) \quad (7.19)$$

в формуле (7.16). Эта поправка учитывает различие рефракции при наблюдении южной и северной звёзд и является функцией разности зенитных расстояний.

$$\Delta z = (M_S - M_N)R. \quad (7.20)$$

Зенитные расстояния при наблюдениях звёзд по методу Талькотта не превышают 60° , а их разности Δz не превышают $50'$. Поэтому для вычисления поправки $\Delta\rho$ можно пренебречь зависимостью рефракции от температуры и давления воздуха и воспользоваться приближённой формулой для вычисления средней рефракции

$$\rho = 58''.3 \operatorname{tg} z_0. \quad (7.21)$$

Из этой формулы получаем, продифференцировав (7.21) по z ,

$$\rho_S - \rho_N = \frac{58''.3 \Delta z}{\cos^2 z_0} \sin 1''. \quad (7.22)$$

Подставляя это значение в (7.19) при учете (7.20), имеем

$$\begin{aligned}\Delta\rho'' &= \frac{58''.3}{2 \cdot 206265''} \frac{(M_S - M_N)R''}{\cos^2 z_0} \\ &= 2.826 \cdot 10^{-4} (M_S - M_N) \frac{R''}{2} \sec^2 z_0.\end{aligned}\quad (7.23)$$

Входящая в формулу (7.16) поправка за уровень $\frac{\tau}{4}(i_S - i_N)$ учитывает изменение наклона трубы при наблюдении южной и северной звёзд. Величина $i_S - i_N$ вычисляется по формуле

$$i_S - i_N = \pm[(\text{л}+\text{п})_S - (\text{л}+\text{п})_N], \quad (7.24)$$

причём знак “плюс” выбирается если:

а) объектив инструмента направлен в сторону младшего деления уровня, а отсчёты микрометра возрастают с увеличением зенитного расстояния;

б) объектив инструмента направлен в сторону старшего деления уровня, а отсчёты микроскопа убывают с увеличением зенитного расстояния.

В формуле (7.24) знак “минус” перед квадратной скобкой берётся в тех случаях, когда:

в) объектив инструмента направлен в сторону старшего деления уровня, а отсчёты микрометра возрастают с увеличением зенитного расстояния;

г) объектив инструмента направлен в сторону младшего деления уровня, а отсчёты микрометра убывают с увеличением зенитного расстояния.

7.3 Вычисление видимых мест

Видимые координаты звёзд, использующихся в программе Талькотта, обычно в "Астрономическом Ежегоднике" не публикуются. Поэтому их получают не интерполированием, а посредством вычислений с помощью редуционных величин. В 1948 году ИТА АН СССР выпустил “Каталог 1967 звёзд программы способа Талькотта на эпоху 1950 года”, в котором приводятся средние места звёзд на равноденствие каталога 1950.0 и собственные движения по склонению μ' . Перевод координат на любую эпоху

B делается по формулам:

$$\alpha_B = \alpha_{1950.0} + (B - 1950.0)AnVar, \quad (7.25)$$

$$\delta_B = \delta_{1950.0} + (B - 1950.0)AnVar + \frac{(B - 1950.0)^2}{200}SecVar, \quad (7.26)$$

где $\alpha_{1950.0}$, $\delta_{1950.0}$ - средние координаты, взятые из каталога, а коэффициенты $AnVar$ (Annual Variation) и $SecVar$ (Secular Variation) учитывают изменение координат за счёт прецессии и собственных движений. Начиная с 1986 года средние места звезд вычисляются на середину текущего юлианского года.

Вычисление видимого склонения, соответствующего моменту наблюдения, производится по формуле

$$\delta_{vis} = \delta_B + (A + A')a' + (B + B')b' + Cc' + Dd' + \mu'\tau, \quad (7.27)$$

где $(A + A')a' + (B + B')b'$ - учет прецессии и долгопериодической нутации за дробную часть года, $Cc' + Dd'$ - учёт годичной абберации, $\mu'\tau$ - собственного движения, τ - дробная часть юлианского года от даты наблюдения до середины текущего юлианского года. В этой же формуле a' , b' , c' , d' - редуцированные постоянные, зависящие от средних мест звёзд:

$$a' = \cos \alpha_B; \quad b' = -\sin \alpha_B;$$

$$c' = \operatorname{tg} \epsilon \cos \delta_B - \sin \delta_B \sin \alpha_B; \quad d' = \sin \delta_B \cos \alpha_B, \quad (7.28)$$

где ϵ - наклон эклиптики к экватору на середину текущего года (публикуется в "Астрономическом Ежегоднике"). Редуцированные постоянные a' , b' , c' , d' , а также склонения звёзд пар δ_B^S и δ_B^N вычисляются для каждого года по специальной программе.

Редуцированные величины $A + A'$, $B + B'$, C , D , зависящие от даты наблюдения, а также величину τ интерполируют по "Астрономическому Ежегоднику" по аргументу "звёздное время" с интерполяционным множителем

$$n = \frac{[S_\lambda - \lambda]^h}{24^h}, \quad (7.29)$$

где S_λ - средний момент наблюдения звёзд пары Талькотта, λ - долгота места.

В соответствии с формулами (7.3) и (7.5) можно сказать, что искомая широта всегда определяется выражением

$$\varphi = \delta + \frac{1}{2}(z_S - z_N). \quad (7.30)$$

В случае двух верхних кульминаций значение δ вычисляется по формулам:

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta_0, \quad (7.31)$$

где

$$\delta_0 = \frac{1}{2}(\delta_B^{(S)} + \delta_B^{(N)}); \quad (7.32)$$

$$\Delta\delta_0 = (A + A')a'_0 + (B + B')b'_0 + Cc'_0 + Dd'_0 + \tau\mu'_0. \quad (7.33)$$

$$\begin{aligned} a'_0 &= \frac{1}{2}(a'_S + a'_N); & b'_0 &= \frac{1}{2}(b'_S + b'_N); \\ c'_0 &= \frac{1}{2}(c'_S + c'_N); & d'_0 &= \frac{1}{2}(d'_S + d'_N); \end{aligned} \quad (7.34)$$

$$\mu'_0 = \frac{1}{2}(\mu'_S + \mu'_N).$$

Если же северная звезда пары наблюдается в нижней кульминации (порядковый номер таких звёзд по “Каталогу 1967 звёзд” меньше 1000), то входящая в формулу (7.30) величина δ вычисляется теперь по иным формулам:

$$\delta = \bar{\delta}_0 + \Delta\bar{\delta}, \quad (7.35)$$

где

$$\bar{\delta}_0 = 90^\circ + \frac{1}{2}(\delta_B^{(S)} - \delta_B^{(N)}), \quad (7.36)$$

$$\Delta\bar{\delta} = (A + A')\bar{a}'_0 + (B + B')\bar{b}'_0 + C\bar{c}'_0 + D\bar{d}'_0 + \tau\bar{\mu}'_0. \quad (7.37)$$

$$\begin{aligned} \bar{a}'_0 &= \frac{1}{2}(a'_S - a'_N); & \bar{b}'_0 &= \frac{1}{2}(b'_S - b'_N); \\ \bar{c}'_0 &= \frac{1}{2}(c'_S - c'_N); & \bar{d}'_0 &= \frac{1}{2}(d'_S - d'_N); \\ & & \bar{\mu}'_0 &= \frac{1}{2}(\mu'_S - \mu'_N). \end{aligned} \quad (7.38)$$

7.4 Инструкция по наблюдению пар Талькотта

1. Отрегулировать инструмент и установить его точно в меридиане (ошибка в азимуте $3'$ с учётом коллимации, место зенита - $0^{\circ}0'$).

2. Повернуть коробку окулярного микрометра в такое положение, чтобы подвижная нить микрометра была горизонтальной. Горизонтальность проверить по Полярной звезде. Выяснить, возрастает или убывает зенитное расстояние в направлении рабочего хода окулярного микрометра.

3. Установить трубу на отсчёт z_0 - среднее зенитное расстояние пары.

4. Установить трубу по азимуту на отсчёт 0° или 180° соответственно для южной и северной звёзд.

5. Скрепить с трубой талькоттовский уровень, вывести его пузырьк на середину. Сделать отсчёты уровня.

6. После появления звезды в поле зрения трубы навести на неё нить микрометра в то время, когда она пересекает вертикальные нити. При каждом таком наведении производить отсчёт окулярного микрометра. Южные звёзды обычно наблюдаются на нитях 1, 2, 4, 6, 7, а северные - на нитях 2, 3, 4, 5, 6 (если в инструменте семь вертикальных нитей). Если же количество нитей равно девяти, то южные звёзды наблюдаются на нитях 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, а северные - на нитях 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (рис. 7.3).

7. После прохождения звездой всех нитей снимают показания уровня.

8. Не открепляя талькоттовский уровень, поворачивают инструмент на 180° вокруг вертикальной оси.

9. После появления в поле второй звезды пары делают отсчёты уровня.

10. Проводят наблюдения второй звезды пары так же, как это описано в пункте 6.

11. После прохождения второй звезды делают отсчёт уровня.

Пример оформления журнала наблюдений прилагается.

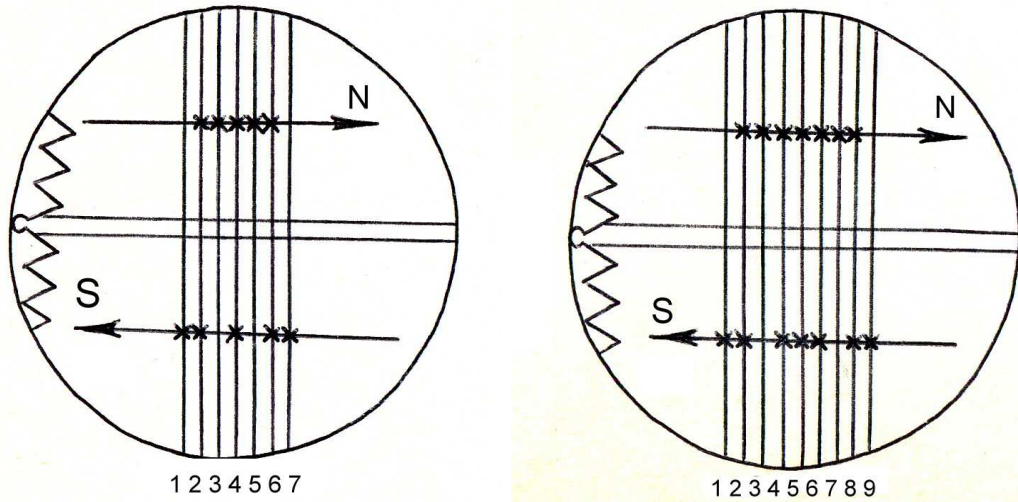


Рис. 7.3: Наблюдения звезд Талькотта

7.5 Обработка журнала наблюдений

1. Вычислить средние значения отсчетов микрометра M_S и M_N , а также величину $\frac{R}{2}(M_S - M_N)$, где R - цена одного оборота окулярного микрометра (эталонное значение).

2. Вычислить суммы отсчетов уровня л+п до и после наблюдения каждой звезды, образовать средние и получить таким образом значения $(л+п)_S$ и $(л+п)_N$. Вычислить поправку за уровень $(i_S - i_N)\frac{\tau}{4}$, где τ - цена деления талькоттовского уровня. Величина $i_S - i_N$ вычисляется по формуле (7.24) в соответствии с правилом определения знака на стр 147.

3. Вычислить рефракционную поправку по формуле

$$\Delta\rho = 2.826 \cdot 10^{-4}(M_S - M_N)\frac{R}{2} \sec^2 z.$$

4. По известным расстояниям F_j и f_j боковых нитей от центральной определить величины

$$F_S = \frac{1}{825060(n+1)} \sum_{j=1}^n F_j^2, \quad F_N = \frac{1}{825060(n+1)} \sum_{j=1}^n f_j^2,$$

где n - количество нитей, на которых сделаны отсчеты микрометра.

5. Вычислить величину $\frac{1}{2}(z_S - z_N)$ по формуле

$$\frac{1}{2}(z_S - z_N) = (M_S - M_N) \frac{R}{2} + \frac{\tau}{4}(i_S - i_N) + \Delta\rho + (F_S \operatorname{tg} \delta_S \pm F_N \operatorname{tg} \delta_N).$$

Знак “минус” берётся в том случае, когда северная звезда наблюдается в нижней кульминации.

Продолжить обработку, пользуясь сводной таблицей:

Таблица вычисления широты по методу Талькотта

Величины	N 24a 16/17 09.83	N 25a 16/17 09.83	N 26 16/17 09.83	Метод вычисления
S_S	19 ^h 36 ^m .0	20 ^h 00 ^m .9	20 ^h 44 ^m .9	Из ж. н.
S_N	19 ^h 32 ^m .4	19 ^h 48 ^m .2	20 ^h 29 ^m .3	
S_λ	19 ^h 34 ^m .20	19 ^h 54 ^m .55	20 ^h 37 ^m .10	
λ	2 ^h 01 ^m .18	2 ^h 01 ^m .18	2 ^h 01 ^m .18	
$S_\lambda - \lambda$	17 ^h 33 ^m .02	17 ^h 53 ^m .37	18 ^h 35 ^m .92	
n	0.731	0.745	0.775		$n = \frac{(S_\lambda - \lambda)^h}{24^h}$
τ	-0.2913	-0.2913	-0.2912	Интерполируется по АЕ на дату наблюдения с интерполяционным множителем n
$A + A'$	-12.447	-12.446	-12.444	
$B + B'$	-2.130	-2.130	-2.131	
C	18.675	18.676	18.677	
D	-0.372	-2.367	-2.358	
$\mu'_0(\overline{\mu'_0})$	-0.7445	0.0230	-0.1225	Полусуммы или полуразности редуцированных величин. Формулы (7.34) или (7.38).
$a'_0(\overline{a'_0})$	0.39954	0.47916	0.63279	
$b'_0(\overline{b'_0})$	0.91668	0.87728	0.77356	
$c'_0(\overline{c'_0})$	0.99628	0.96278	0.88628	
$d'_0(\overline{d'_0})$	0.34012	0.40732	0.54805	
δ_0	59°54'31".49	60°08'36".57	60°13'51".90	(7.32) или (7.36)
$\Delta\delta(\overline{\Delta\delta})$	11".09	9".18	5".77	(7.33) или (7.37)
δ	59°54'42".58	60°08'45".75	60°13'57".67	$\delta = \delta_0 + \Delta\delta$
$\frac{1}{2}(z_S - z_N)$	1'49".88	-12'13".75	-17'24".45	Из ж. н.
φ	59°56'32".46	59°56'32".00	59°56'33".22	$\varphi = \delta + \frac{1}{2}(z_S - z_N)$
$\varphi_{\text{ср.}}$	59°56'32".56			

Журнал наблюдений. Пара Талькотта 25а

Дата 16/17 сентября 1983 года

Наблюдатель В. В. Витязев

Северная звезда 1568 ($4^m.0$)

$\delta_N = 70^\circ 13'.3$

$\text{tg}\delta_N = 2.781$

$S_N = 19^h 48^m.2$

$F_N = 0''.07$

$z_0 = 10^\circ 05'.1$

$\text{sec}^2 z_0 = 1.032$

$\delta_S = 50^\circ 03'.2$

$\text{tg}\delta_S = 1.194$

$S_S = 20^h 00^m.9$

$F_S = 0''.12$

Инструмент 112104

$R = 155''.19$

$\frac{\tau}{2} = 1''.434$

Южная звезда 1598 ($5^m.3$)

- 153 -

Уровень	Нити	Микрометр	Уровень	Нити	Микрометр	$\frac{R}{2}(M_S - M_N) = -736''.92$ $\frac{\tau}{4}(i_S - i_N) = 3''.05$ $\Delta\rho = -0''.21$ $F_S \text{tg}\delta_S = 0''.14$ $F_N \text{tg}\delta_N = 0''.19$ $\frac{1}{2}(z_S - z_N) = -733''.75 = -12'13''.75$
69.0 - 83.6			71.2-85.8			
	2	15.055		1	5.525	
	3	.040		2	.550	
	4	.010		4	.500	
	5	.015		5	.530	
	6	.040		6	.550	
	7	.022		8	.530	
	8	.025		9	.549	
69.0 - 83.5			71.0-85.5			
$i_N = 152.55$		$M_N = 15.030$	$i_S = 156.8$		$M_S = 5.533$	

Глава 8

Определение разности шкал времени $UT_0 - UTC$ с помощью наблюдений на пассажном инструменте



8.1 Пассажный инструмент

Развитие методов практической астрономии в течение нескольких столетий способствовало появлению ряда астрометрических инструментов, ставших классическими. Они использовались для определения абсолютных и дифференциальных координат и собственных движений звезд, тригонометрических параллаксов, параметров орбит больших и малых планет, некоторых астрономических постоянных, параметров ориентировки оси вращения Земли, для формирования шкалы Всемирного времени, связанной с вращением Земли. Инструменты изменялись, совершенствовались, появлялись более точные системы регистрации.

С появлением компьютеров и ПЗС-устройств автоматизировался сам процесс наблюдений и их обработки – неизменным оставалось одно: классический принцип ориентировки подавляющего большинства астрометрических инструментов в горизонтальной системе координат и связанные с ним методы обработки наблюдений. Отметим, что такие современные методы как радиоастрометрические наблюдения со сверхдлинной базой – РСДБ-наблюдения – используют классическую методику определений координат радиоисточников.

Среди основных классических астрометрических инструментов, работающих в горизонтальной системе координат, можно назвать следующие: пассажный инструмент, меридианный круг, вертикальный круг, зенит-телескоп и др.

Пассажный инструмент (*passage* – прохождение, франц.) – астрометрический инструмент, служащий для определения моментов прохождения небесных светил через плоскость некоторого вертикала при их видимом суточном движении. Пассажный инструмент (ПИ) изобретён и построен в 1689 году датским астрономом, профессором Копенгагенского университета Оле Кристиансенем Рёмером. Обычно ПИ устанавливается на опоры так, чтобы плоскость, описываемая его визирной линией, совпадала с плоскостью меридиана – в этом случае можно определять прямые восхождения и время. Иногда инструмент устанавливается в первом вертикале – для определения склонений звёзд и широты места наблюдения.

Стационарный ПИ имеет астрономическую трубу (диаметр объектива 15-20 см, фокусное расстояние 2.0-2.5 м), горизонтальную ось вращения (длина 1.0 - 1.5 м), которая опирается на массивные фундаменты (рис. 8.1). В фокальной плоскости объектива располагается окулярный микрометр с сеткой вертикальных и горизонтальных нитей. Моменты пересечения изображением звезды соответствующих нитей фиксируются с помощью регистрирующего устройства. До середины XIX века регистрация производилась методом "глаз-ухо", то есть наблюдатель фиксировал глазом факт пересечения и, слушая щелчки хронометра и считая секунды, отмечал соответствующий момент времени.

С середины XIX века (с появлением электричества) регистрация производилась с помощью клавиши, на которую наблюдатель нажимал в соответствующий момент. При визуальных наблюдениях долгое время использовался регистрирующий микрометр, изобретённый в конце XIX века немецким механиком А. Репсольдом. Такой микрометр позволяет фиксировать моменты времени для некоторых положений нити микрометра, движущейся в поле зрения астрономической трубы. У хороших мик-

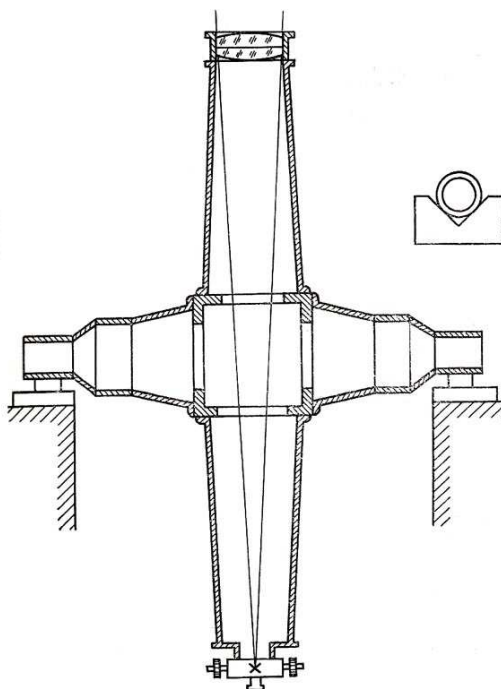


Рис. 8.1: Оптическая схема пассажного инструмента

рометров ходовые ошибки не превышают 0.002-0.003 оборота винта, а точность отсчёта составляет несколько десятых секунды дуги.

Идея пассажного инструмента достаточно проста и заключается в следующем. Астрономическая труба с сеткой нитей, расположенной в фокальной плоскости объектива, скреплена с горизонтальной осью инструмента так, чтобы визирная линия трубы была всегда перпендикулярна к оси. Тогда при вращении трубы продолжение визирной линии будет описывать на небесной сфере большой круг, а вертикальная нить окулярного микрометра, проходящая через центр сетки, будет "находиться" в плоскости этого круга. Следовательно, момент пересечения изображением звезды этой нити и будет моментом пересечения светилом данного вертикального круга. Если ПИ установлен точно в меридиане и хорошо отрегулирован, то визирная линия трубы будет располагаться в плоскости небесного меридиана – это даёт возможность определить момент прохождения звездой плоскости меридиана.

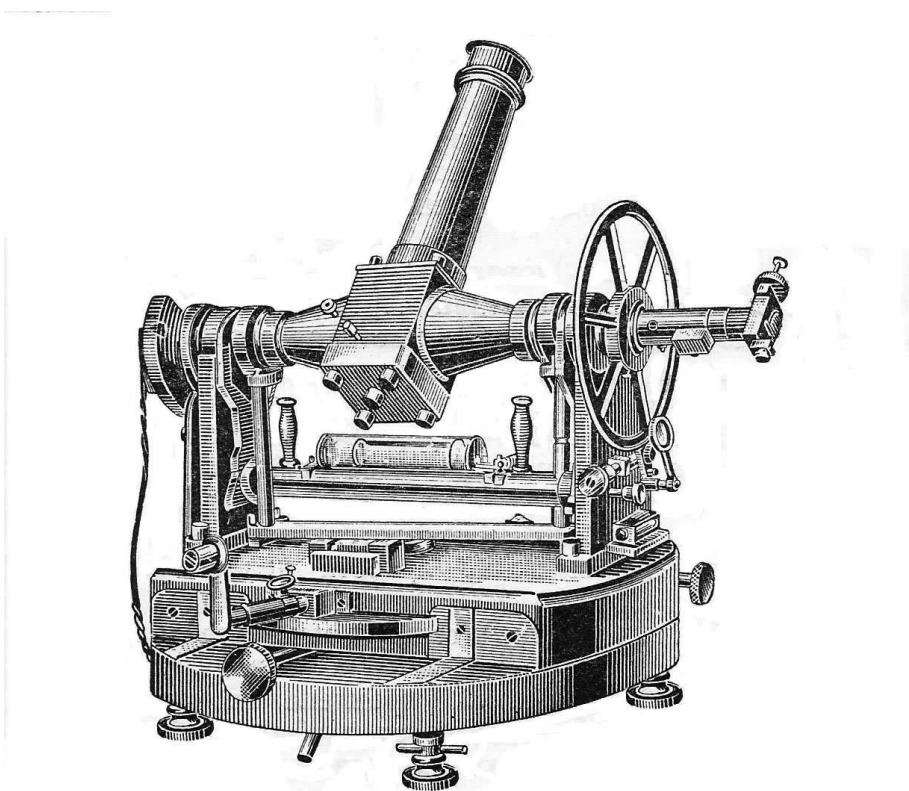


Рис. 8.2: Пассажный инструмент с ломаной трубой

В службах времени, основной задачей которых является формирование шкалы Всемирного времени (разности шкал $UT0-UTC$) из астрономических наблюдений, применялись меньшие инструменты переносного типа с ломаной трубой, горизонтальные оси которых переключаются при наблюдении каждой звезды (рис. 8.2).

Принципиально важным этапом в совершенствовании наблюдений в астрооптической службе времени явился разработанный в 1938 году пулковским астрономом Н.Н. Павловым фотоэлектрический метод регистрации звездных прохождений, который в дальнейшем постоянно совершенствовался самим Н.Н. Павловым, а также В.Э. Брандтом из ГАИШ (МГУ, Москва) и А.А. Язевым из Иркутского отделения ВНИИФТРИ.

Сетка нитей окулярного микрометра была заменена зеркальной решёткой (аналогом сетки нитей), в которой зеркальные штрихи чередовались с прозрачными участками ("щелями") с некоторым постоянным шагом. Решётка располагалась в фокальной плоскости инструмента под углом 45° к визирной линии, штрихи ориентированы параллельно плоскости меридиана. Была применена двухканальная схема регистрации на фотоэлектрических умножителях (ФЭУ): изображение звезды, проходящей в поле зрения, фотометрировалось на границе зеркального и прозрачного участков решётки. Когда величины фототока от обоих участков решётки сравнивались, вырабатывался логический импульс-момент T_i . Звезду наблюдали на нескольких щелях до и после меридиана, при этом регистрирующее устройство фиксировало серию моментов времени $T_i, 1, \dots, n$, по которым производили редукцию на меридиан с получением момента T_0 .

Способ фотоэлектрической регистрации прохождений звёзд заметно повысил точность определения поправок часов службами времени и практически освободил наблюдения на пассажном инструменте от влияния личной ошибки наблюдателя. Точность одного определения прямого восхождения звезды на большом стационарном инструменте с регистрирующим микрометром составляла $\pm(0,015 - 0,20)$ с., а точность одной поправки часов фотоэлектрическим методом, определённой на малом инструменте, составляет около $\pm 0,005$ с.

8.2 Определение поправки часов с помощью пассажного инструмента

Будем говорить о наблюдениях, выполненных на переключиваемом пассажном инструменте (рис.8.2), предназначенном для определения времени по наблюдениям прохождений звезд через меридиан места наблюдения. Для обработки наблюдений и вычисления поправки часов используем известную формулу для определения звездного времени

$$S = T + u = \alpha + t, \quad (8.1)$$

где T – момент времени прохождения изображения звезды через нить окулярного микрометра инструмента, отмеченный по рабочим часам, u – поправка этих часов, t – часовой угол звезды, α – прямое восхождение звезды, взятое из опорного каталога.

В момент верхней или нижней кульминации звезды (т.е. в момент прохождения звезды через истинный меридиан) её часовой угол $t = 0$ и, следовательно, искомую поправку часов можно найти по формуле

$$u = \alpha - T. \quad (8.2)$$

Чтобы воспользоваться этой простой формулой нужно установить пассажный инструмент точно в меридиане, что практически невозможно! В реальном случае с помощью пассажного инструмента получают момент прохождения звезды T через "инструментальный" меридиан, отличающийся от истинного момента T_0 на некоторую величину ΔT , возникающую по причине влияния на результаты наблюдений ряда ошибок:

- горизонтальная ось инструмента не лежит точно в плоскости первого вертикала, а удалена от него на некоторый угол a , называемый азимутом инструмента;
- горизонтальная ось инструмента не параллельна плоскости горизонта, а наклонена по отношению к ней на некоторый угол i , называемый наклоном горизонтальной оси;
- визирная линия не перпендикулярна к горизонтальной оси на некоторую величину c , называемую коллимацией.

С учетом этих ошибок ориентации пассажного инструмента вместо формулы (8.2) имеем

$$u = \alpha - (T_0 + aA + iI + cC), \quad (8.3)$$

где $A = \sin z \sec \delta$, $I = \cos z \sec \delta$, $C = \sec \delta$.

Формула (8.3) называется формулой Майера по имени немецкого астронома Т.Майера, впервые получившего её. Подробный вывод формулы можно найти в любом учебнике по практической астрономии.

Формула Майера используется для определения прямых восхождений звёзд и времени как на больших пассажных инструментах, так и на малых, перекладывающихся во время наблюдения каждой звезды. В последнем случае влияние коллимационной ошибки исключается, так как при вычислении средних моментов прохождения изображения звезды через нити окулярного микрометра до и после перекладки горизонтальной оси соответствующие коллимационные поправки входят в формулу Майера с противоположными знаками и взаимно компенсируются.

8.3 Каталог служб времени СССР

Для получения шкалы Всемирного времени из наблюдений на пассажном инструменте в соответствии с формулой Майера необходимо иметь опорный каталог прямых восхождений наблюдаемых звезд. В принципе, таким каталогом может служить любой фундаментальный каталог, принятый в качестве стандарта в то или иное время, – FK3, FK4, FK5 и др. Тем не менее, в целях регулярного определения Всемирного времени (разности шкал $UT0 - UTC$) в рамках деятельности Службы времени СССР было сочтено целесообразным составить специализированный список звезд, получивший название "Каталог служб времени СССР" (КСВ). Этот каталог, содержащий высокоточные прямые восхождения звёзд, был создан в 1971 году сотрудниками Пулковской обсерватории под руководством Н.Н.Павлова и использовался всеми службами Советского Союза. Каталог содержал яркие звёзды до 7-й звёздной величины, спектральных классов от В до М.

Так как КСВ создавался для фотоэлектрических наблюдений на пассажном инструменте с зеркальной визирной решёткой, был произведён тщательный отбор звёзд, чтобы исключить попадание в список ярких визуально-двойных звёзд. Одновременное прохождение двух или нескольких изображений звёзд через щели визирной решётки могло существенно исказить результат – именно поэтому и была произведена тщательная яркостная селекция звёзд при составлении каталога КСВ. Рабочий список для наблюдений составляется на базе КСВ таким образом, чтобы между наблюдениями звёзд хватало времени для контроля состояния инструмента, производства необходимых записей в журнал наблюдений и установки следующего зенитного расстояния.

Процедура вычисления видимых мест звёзд с использованием каталога КСВ является стандартной. Во время проведения летней астрометрической практики видимые места звёзд, необходимые для обработки наблюдений, выполненных на пассажном инструменте, вычисляются преподавателем для нужного списка звёзд и передаются студентам для дальнейшей работы.

8.4 Метод Н.Н.Павлова вычисления поправки часов

Наблюдение прохождения звезды через "меридиан" инструмента даёт несколько значений моментов времени T_i , когда изображение звезды поочередно пересекает неподвижные нити окулярного микрометра (при визуальных наблюдениях) или щели визирной решётки (при наблюдениях фотоэлектрических). Моменты T_i по нитям усредняются и получается некоторый средний момент $T_{\text{ср}}$. Этот момент отличается от истинного момента T_0 на значение суммарной ошибки, вызванной наличием азимута и наклонности горизонтальной оси, а также влиянием коллимации.

Выше было сказано, что при наблюдениях на малом пассажном инструменте с перекладкой горизонтальной оси во время наблюдения каждой звезды влияние коллимации с исключается. Кроме того, наклонность горизонтальной оси i определяется из отсчётов накладного (подвесного) уровня также при наблюдении каждой звезды, и соответствующие поправки вводятся в значения наблюдаемых моментов $T_{\text{ср}}$. Получаем исправленные моменты времени

T' .

Таким образом, формулу Майера можно переписать в очень простом виде:

$$u = \alpha_i - (T'_i + aA_i), \quad (8.4)$$

где a – азимут пассажного инструмента, а $A_i = \sin z_i \sec \delta_i$ – азимутальный коэффициент формулы Майера.

Получаем уравнение, в котором содержатся два неизвестных – поправка часов u и азимут a . Решение такого уравнения методом наименьших квадратов не представляет особого труда – наблюдение нескольких звёзд позволяет получить избыточную систему уравнений, которая простым усреднением приводится к нормальному виду. Решение системы даёт значения двух искомым неизвестных.

Заметим, однако, что такой алгоритм был бы применим без всяких ограничений в том случае, если бы все уравнения, входящие в избыточную систему, имели одинаковый вес и определяемые физические параметры – поправка часов и азимут инструмента – сохранялись бы неизменными в течение вечера наблюдений. В реальном случае это не так.

Во-первых, звёзды, наблюдающиеся на разных зенитных расстояниях, обладают разной скоростью прохождения через нити окулярного микрометра, и поэтому ошибка регистрации момента T_i пропорциональна $\sec \delta_i$.

Во-вторых, азимут инструмента не сохраняется постоянным во время наблюдений – он может изменяться нелинейным образом в силу различных причин (изменение температуры инструмента, скорости ветра, действия наблюдателя и т.п.). Вследствие этого значение азимута, входящее согласно формуле Майера в момент наблюдений каждой звезды с весом, равным значению азимутального коэффициента, по-разному влияет на наблюдения звёзд разных зенитных расстояний.

Всё это приводит к тому, что решение нормальной системы уравнений может быть искажено существенными ошибками регистраций моментов T_i и ошибками определения азимута a . В связи с этим в большинстве служб времени СССР для вычисления поправок часов был принят метод средней зенитной звезды,

разработанный Н.Н.Павловым.

Суть метода проста и основывается на том, что зенитное расстояние звезд по разные стороны от зенита имеет разные знаки. А поскольку азимутальный коэффициент формулы Майера $A = \sin z \sec \delta$ зависит от зенитного расстояния звезды z и функция $\sin z$ является нечётной функцией, то звезды, которые наблюдаются по разные стороны от зенита, имеют азимутальные коэффициенты с разными знаками. Усреднение моментов $(\alpha - T)_i$ таких подобранных "зенитных" звёзд позволяет практически исключить влияние ошибок азимута, так как усреднённый азимутальный коэффициент \overline{A}_z очень близок к нулю.

Таким образом, приходим к следующему алгоритму обработки наблюдений, выполненных на пассажном инструменте:

1) для каждого момента времени T' , включающего поправку за наклонность горизонтальной оси, записываем уравнение Майера:

$$u = (\alpha - T')_i - aA_i \quad (8.5)$$

2) из списка наблюденных звезд выбираем так называемые "зенитные" звёзды по следующему признаку: $-0.500 < A < 0.300$, и для этих звёзд усредняем значения $(\alpha - T')$ и азимутальные коэффициенты A . Получаем "фиктивную" зенитную звезду, у которой

$$\overline{(\alpha - T')}_z = \frac{1}{k} \sum_{r=1}^k (\alpha - T')_r, \quad \overline{A}_z = \frac{1}{k} \sum_{r=1}^k A_r, \quad (8.6)$$

где k – количество зенитных звёзд;

3) из списка наблюденных звезд выбираем так называемые "азимутальные" звёзды по следующему признаку: $A > 0.580$, и для каждой из этих звёзд находим значение азимута по формуле

$$a_j = \frac{\overline{(\alpha - T')}_z - (\alpha - T')_j}{\overline{A}_z - A_j}; \quad (8.7)$$

4) находим среднее значение азимута инструмента \overline{a} :

$$\overline{a} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m a_j, \quad (8.8)$$

где m – количество азимутальных звёзд;

5) подставляем найденное среднее значение азимута \bar{a} в уравнение Майера (8.5) для каждой отнаблюдённой звезды, вычисляем индивидуальные поправки часов u_i по каждой звезде, после чего, усредняя эти значения, находим среднюю за вечер поправку часов \bar{u} :

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i, \quad (8.9)$$

где n – количество всех отнаблюдённых звёзд;

6) для оценки точности полученных значений поправки часов \bar{u} и азимута \bar{a} вычисляем по известным формулам математической статистики среднюю квадратичную ошибку одного значения найденного параметра $\sigma_{u,a}$ (дисперсию) и среднюю квадратичную ошибку результата $\epsilon_{u,a}$.

8.5 Устройство для регистрации прохождений звёзд через меридиан

Выше было сказано, что шкала Всемирного времени (разность шкал $UT0 - UTC$) определяется из наблюдений прохождений звёзд через "местный" меридиан с помощью малого перекладывающегося пассажного инструмента. Наблюдатель фиксирует соответствующие моменты времени с помощью регистрирующих устройств. При визуальных наблюдениях для этого часто используется специальное электромеханическое цифропечатающее устройство – хронограф.

Хронограф – это прибор, хранящий шкалу времени рабочих часов в своей системе, которая задаётся специальным синхронным двигателем и вращением массивных металлических дисков. Хронограф предназначен для регистрации моментов электрических импульсов в шкале самого хронографа с погрешностью 0,002 с. Сигналы от часов или от наблюдателя регистрируются непосредственно на бумажной ленте, проходящей через цифропечатающее устройство хронографа. Общий вид хронографа представлен

на рис.8.3.

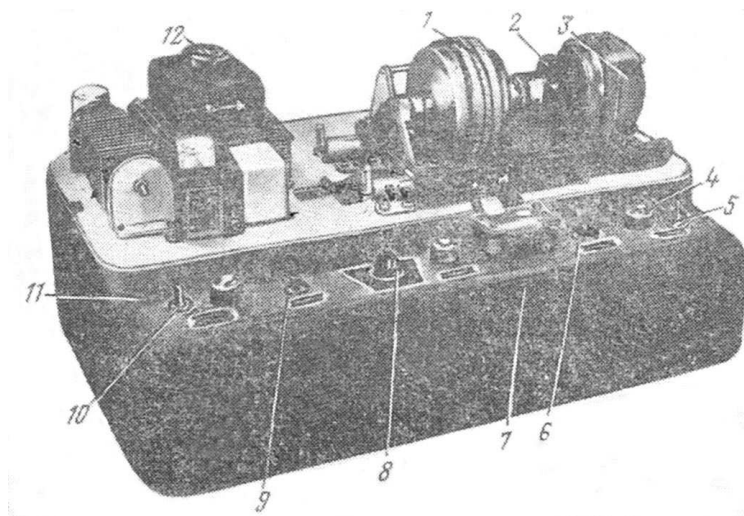


Рис. 8.3: Общий вид печатающего хронографа

Для печати показаний хронографа используется система согласованно вращающихся дисков с выпуклыми цифровыми знаками на торцевой стороне. Вращение печатных дисков осуществляется синхронным двигателем, питаемым током стабильной частоты. Электромеханическая часть хронографа содержит: блок, состоящий из трёх дисков 1, редуктор 2, синхронный двигатель 3, импульсную схему печатающего и лентопротяжного электромагнитов, механические системы протяжки бумажной и красящей ленты, блок питания 12 и пульт управления 7.

На пульте управления хронографа расположены выключатель 10 и сигнальная лампа 11 блока питания хронографа, выключатель 5 и сигнальная лампа 4 питания синхронного двигателя, переключатель вида работы 8, кнопка подачи ленты 6, кнопка контроля печати 9. К хронографу прилагается выносной пульт для дистанционного управления впечатыванием показаний часов и сигналов от наблюдателя.

Печатающие диски регистрируют минуты от 0 до 59, секунды от 0 до 59, сотые доли секунды от 0 до 99. Сигналы времени от рабочих часов и моменты прохождений звёзд впечатываются на бумажную ленту шириной 27 мм с помощью ударной силы магнитной системы через красящую ленту шириной 13 мм. На ленту впечатывается ряд цифр с тех частей дисков, которые

в момент подачи импульса тока находились над лентой. После каждого отпечатка следует протяжка ленты, чтобы отпечатки не смешивались. Впечатываемый неподвижный индекс позволяет снимать отсчеты с ленты путем интерполяции сотых долей секунды до 0,002 с. Пример регистрации моментов наблюдений на ленте хронографа показан на рис. 8.4.

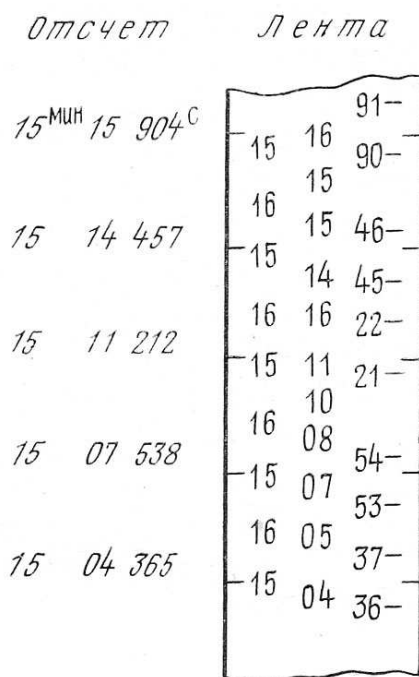


Рис. 8.4: Пример отпечатков моментов времени на ленте хронографа

Печатающие диски хронографа вращаются непрерывно и с различной скоростью. Поэтому цифры на ленте, представляющие показание хронографа в момент импульса, располагаются, как правило, не в одну линию. Тире по краям ленты представляют индексы, относительно которых производится отсчет. Тире, сопутствующие отпечаткам долей секунды, определяют положение сотых долей секунды относительно индекса и позволяют производить интерполяцию до тысячных долей секунды. После окончания наблюдений наблюдатель "расшифровывает" ленту хронографа, выписывая моменты прохождений звезд через нити окулярного микрометра.

8.6 Установка пассажного инструмента в меридиан

Перед началом наблюдений нужно отрегулировать пассажный инструмент и установить его как можно точнее в меридиан.

Необходимо проверить, насколько точно можно наводить трубу на нужное зенитное расстояние. Для этого поместим Полярную звезду в момент кульминации в центр поля зрения и сравним её зенитное расстояние, отсчитанное по кругу-искателю, с эфемеридным значением, взятым из опорного каталога.

С помощью накладного (подвесного) уровня проверяем горизонтальность оси инструмента.

Наиболее ответственная операция – установка инструмента максимально точно в меридиане. Для этого удобно использовать экваториальные звёзды с известными прямыми восхождениями. Вращая регулировочные азимутальные винты, добиваемся того, чтобы в момент $T \simeq \alpha$ звезда находилась в центре поля зрения (T – показание наших рабочих часов, α – прямое восхождение звезды).

8.7 Наблюдения прохождений звёзд и их обработка

Задача наблюдателя состоит в том, чтобы зарегистрировать моменты прохождения изображения звезды через шесть нитей окулярного микрометра пассажного инструмента при одном положении окуляра (окуляр "Ost") до кульминации и через эти же нити (окуляр "West") после кульминации (рис. 8.5).

Всего получается $6 + 6$ моментов времени, симметричных относительно момента кульминации. Для получения этих моментов выполняем следующие действия:

1. Перед началом наблюдений впечатываем отсчёт звёздных часов T_{01} на ленту печатающего хронографа. Так как хронограф "отбивает" секунды в следующем порядке: ..., 56, 57, 58, 59, ..., 01, 02, 03, ..., то на месте нулевой секунды на бумажной ленте стоит пропуск (нулевая секунда не "отбивается" хронографом) – в этот промежуток и нужно вписать показание звёздных часов T_{01} .

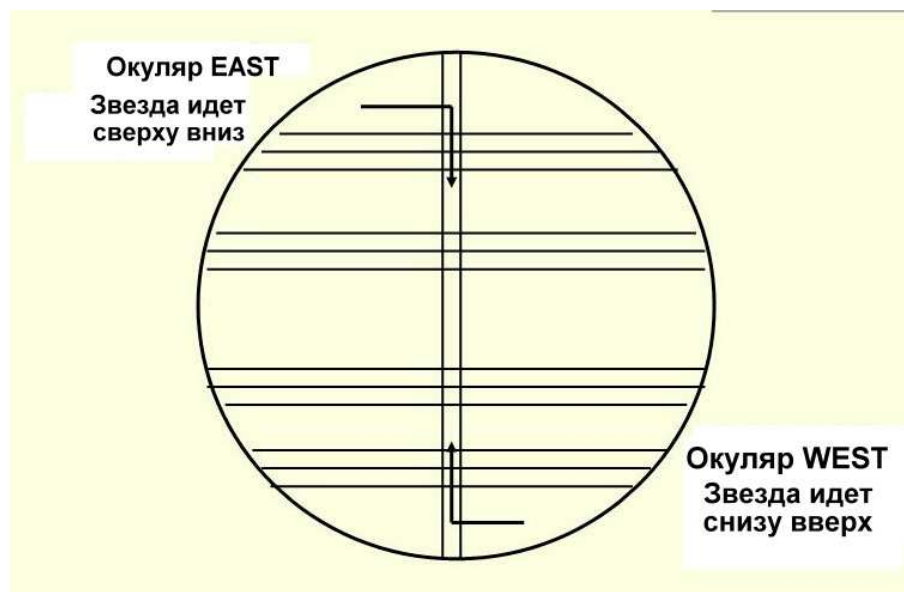


Рис. 8.5: Сетка нитей окулярного микрометра с изображением звезды

2. На установочном круге выставляем зенитное расстояние звезды z . Устанавливаем трубу на это зенитное расстояние и закрепляем её. После этого ставим на круге отсчёт ($360^\circ - z$), чтобы "встретить" звезду после перекладки горизонтальной оси.

3. Когда изображение звезды появляется в поле зрения, плавным движением микрометрического винта вводим его в биссектор.

4. Отсчитываем и записываем показания левого и правого краёв пузырька уровня.

5. Моменты прохождения звезды через первые 6 нитей (например, если окуляр находится в положении Ost, то звезда движется в поле зрения окуляра сверху вниз) регистрируем на ленте печатающего хронографа с помощью кнопочного устройства. Для этого нажимаем на кнопку в тот момент, когда изображение звезд пересекает нить (центр изображения находится на нити).

6. После прохождения изображением звезды 6-й нити плавным движением перекадываем горизонтальную ось пассажного инструмента в лагерах на 180° .

7. Устанавливаем трубу на зенитное расстояние $360^\circ - z$ и закрепляем её. Находим в поле зрения изображение звезды и плавным движением микрометрического винта вводим его в биссектор.

8. Регистрируем прохождение звезды через те же 6 нитей (звезда при этом движется снизу вверх).

9. После того как изображение звезды прошло все нити, отсчитываем и записываем показания левого и правого края пузырька уровня.

10. В журнале наблюдений записываем: номер звезды по каталогу КСВ, показания уровня до и после перекладки горизонтальной оси в лагерах и разные замечания – например, "пропущена нить № 6 после перекладки инструмента".

11. После окончания наблюдения звезды на установочном круге ставим зенитное расстояние следующей по каталогу звезды и повторяем действия из пп. 2 – 11.

12. После окончания сеанса наблюдений ещё раз впечатываем отсчёт звёздных часов T_{02} на ленту печатающего хронографа таким же образом, как указано в п. 1.

Пример записи номера звезды по каталогу КСВ и отсчётов уровня в журнале наблюдений:

№ 457 (КСВ)

Ost.	5.4 – 20.8
West.	20.6 – 5.2

Перед началом наблюдений и после их окончания наблюдатель впечатывает на ленту хронографа минутные импульсы рабочих часов – для связи шкалы часов и шкалы хронографа, а также для определения хода хронографа. Эти моменты, а также моменты времени прохождений звёзд через нити окулярного микрометра выписываются с ленты хронографа в журнал наблюдений. Цифры выписываются для каждой нити, симметрично относительно момента кульминации – сверху вниз (до перекладки) и снизу вверх (после перекладки). После этого моменты времени усредняют по нитям (по строчкам), а затем – по столбцу.

Ниже показано, как получают средний момент прохождения звезды PX_i^* через меридиан пассажного инструмента после расшифровки ленты:

1-я нить	32 ^m 35 ^s .882	34 ^m 53 ^s .243	33 ^m 44 ^s .562
2-я нить	41 ^s .845	47 ^s .026	44 ^s .435
3-я нить	48 ^s .178	40 ^s .889	44 ^s .533
4-я нить	33 ^m 00 ^s .388	29 ^s .195	44 ^s .791
5-я нить	05 ^s .341	24 ^s .456	44 ^s .898
6-я нить	33 ^m 11 ^s .046	34 ^m 18 ^s .264	33 ^m 44 ^s .655

$$\text{ПХ}_i^* = 33^m 44^s .646$$

Для связи шкалы рабочих часов и шкалы печатающего хронографа (ПХ) и для определения хода хронографа вычислим следующие разности:

$$\begin{array}{r} T_{01} = 23^h 48^m 00^s .000 \\ \text{ПХ}_{01} = 23^h 32^m 36^s .577 \\ \hline T_{01} - \text{ПХ}_{01} = 15^m 23^s .423 \\ T_{02} = 03^h 55^m 00^s .000 \\ \text{ПХ}_{02} = 03^h 39^m 36^s .579 \\ \hline T_{02} - \text{ПХ}_{02} = 15^m 23^s .421 \end{array}$$

Здесь моменты T_{01} и T_{02} вписаны наблюдателем на ленту хронографа перед началом и после окончания наблюдений. Моменты ПХ_{01} и ПХ_{02} , соответствующие моментам T_{01} и T_{02} , сняты с ленты хронографа. Таким образом, ход печатающего хронографа ω составил 0.002^s за 4 часа или, что то же самое, 0.0005^s за 1 час.

Таким образом, получаем среднее значение смещения нуля печатающего хронографа $(T_0 - \text{ПХ}) = 15^m 23^s .422$

В таблице показан порядок вычислений поправки часов с использованием формул (8.5-8.9) и определения разности шкал Всемирного и Координированного времени ($UT0 - UTC$). В нижней строке таблицы находится вычисленное значение поправки часов, полученной из наблюдений (разность шкал Всемирного времени и рабочих часов): $\bar{u} = UT0 - UT_{\lambda} = -1^s.749$.

Из сличений рабочих часов с Государственным эталоном была получена поправка рабочих часов относительно эталона (разность шкал рабочих часов и Координированного времени) $UT_{\lambda} - UTC = +1^s.004$.

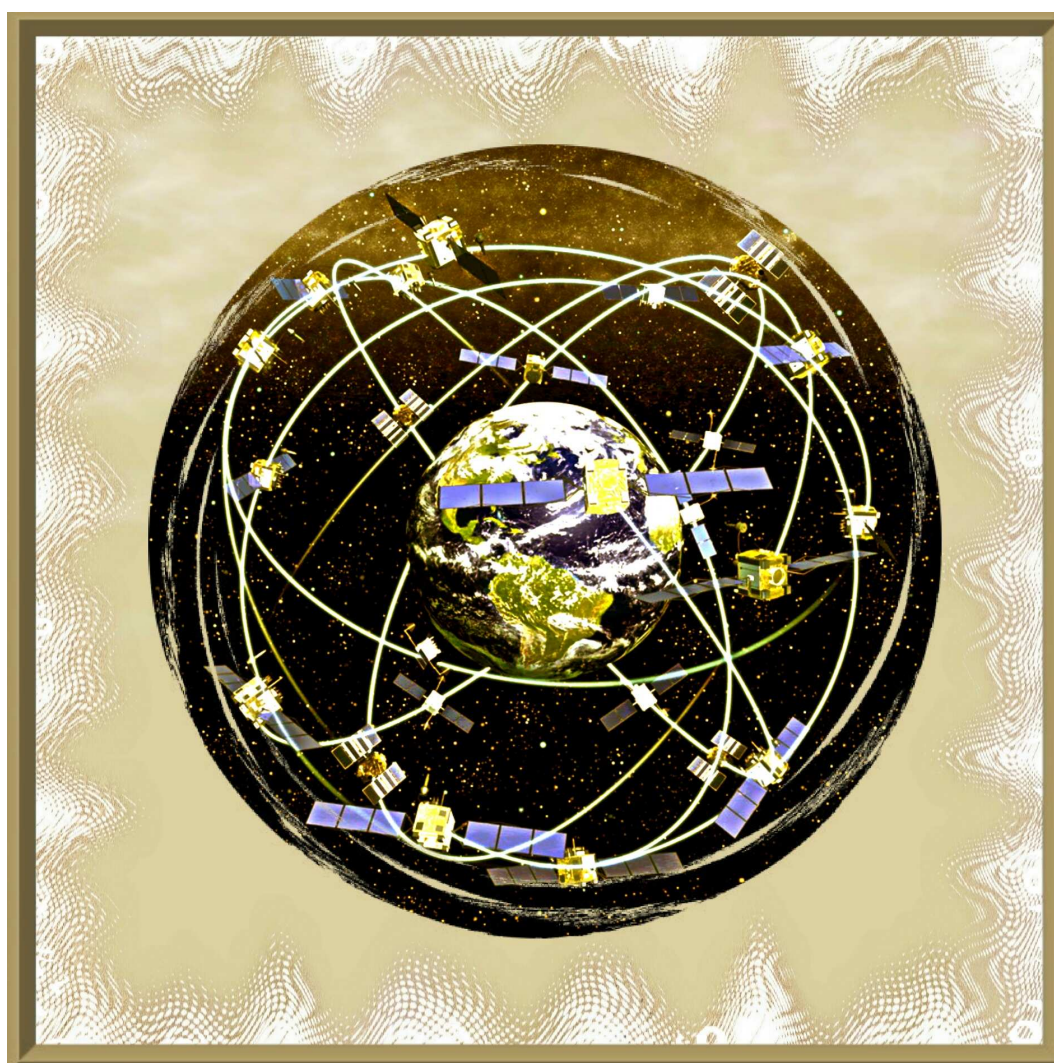
Искомая разность шкал Всемирного $UT0$ и Координированного времени UTC : $UT0 - UTC = -1^s.749 + 1^s.004 = -0^s.745$.

Определение разности шкал времени Всемирного и Координированного времени ($UT0 - UTC$)

	Параметры	№ КСВ 478 _z	№ КСВ 488 _s	Всего отнаблюдено 36 звёзд
1	A_i	-0.190	0.752	A_i, I_i – коэффициенты ф-лы Майера
2	I_i	2.325	0.697	
3	$ПХ_i^*$	23 ^h 46 ^m 36 ^s .927	00 ^h 11 ^m 05 ^s .705	– средний по нитям момент прохождения звезды
4	$T_0 - ПХ$	15 ^m 23 ^s .422	15 ^m 23 ^s .422	$(T_0 - ПХ)$ – величина смещения нуля шкалы ПХ (печатающего хронографа).
5	T_{0i}^*	00 ^h 02 ^m 00 ^s .349	00 ^h 26 ^m 29 ^s .127	$T_{0i}^* = ПХ_i^* + (T_0 - ПХ)$
6	$I \cdot i$	-0.254	-0.132	$i = \frac{(n+n)\omega - (n+n)\omega}{2} \tau/2$; $\tau/2 = 0^s.084$
7	$\omega \cdot \Delta T_i$	0	0	ω – ход печатающего хронографа $\Delta T_i = \bar{T}_0 - T_{0i}$
8	T'_i	00 ^h 02 ^m 00 ^s .095	00 ^h 26 ^m 28 ^s .995	$T'_i = T_{0i} + \omega \cdot \Delta T_i + I \cdot i$
9	α_i	20 ^h 02 ^m 03 ^s .633	20 ^h 26 ^m 24 ^s .298	α_i – видимое прямое восхождение
10	$\alpha_i - T'_i$	20 ^h 00 ^m 03 ^s .538	19 ^h 59 ^m 55 ^s .303	
11	a_i		-8 ^s .577	$a_i = \frac{(\alpha - T')_z - (\alpha - T')_{zi}}{A_z - A_{zi}}$
12	\bar{a}	-8 ^s .701	-8 ^s .701	\bar{a} – среднее значение азимута получено
13	$\bar{a} \cdot A_i$	1 ^s .653	-6 ^s .543	в данном примере по десяти экваториальным звёздам.
14	u_i	20 ^h 00 ^m 01 ^s .885	20 ^h 00 ^m 01 ^s .846	\bar{u} – среднее значение поправки часов получено в данном примере
15	\bar{u}	-1 ^s .749	$\pm 0^s.142$	по 36 звёздам

Глава 9

Определение координат пунктов и времени методом GPS



9.1 Введение

В середине 90-х годов прошлого века были запущены в эксплуатацию две глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), это американская система GPS (Global Positioning System) и российская ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система). Разрабатываемые главным образом для военного применения системы определения местоположения по радиосигналам специальных (навигационных) спутников оказались чрезвычайно полезными в различных областях человеческой деятельности, таких как транспорт, строительство, туризм, а также нашли важное применение во многих областях современной науки, в частности в астрометрии и геодезии.

Основной задачей астрометрии является построение и поддержка небесной, а геодезии – земной систем отсчета. На стыке этих наук находится определение связи между небесной и земной системами, параметризуемой с помощью параметров ориентации Земли. Методы ГНСС сейчас успешно применяются для решения всех этих трех задач.

В настоящей главе речь пойдет о решении классической задачи определения координат места и времени. Вот уже на протяжении многих столетий эта задача решается путем оптических наблюдений звезд или Солнца с помощью астрономических инструментов, таких как универсалы, теодолиты, пассажные инструменты и т.п. Системы ГНСС используют радиосигналы. Если оптические наблюдения весьма трудоемки и требуют определенных знаний и навыков, то решение той же задачи с помощью ГНСС полностью автоматизировано и сводится зачастую лишь к нажатию одной кнопки. С другой стороны, если для решения задачи традиционным оптическим методом нужен лишь самый простой теодолит, астрономический альманах и часы, то функционирование ГНСС обеспечивается целым рядом всевозможных технических средств в масштабах страны и даже всего мира. Если астрометрист с универсалом зависит лишь от ясной погоды, то успешное использование ГНСС для решения той же задачи зависит от множества факторов, как технических, так и, зачастую, политических. Так, доступность системы ГНСС может быть мгно-

венно ограничена органами государственной власти США или России, и такие случаи неоднократно имели место со стороны США. Кроме того, радиосигнал, излучаемый спутниками очень слабый, и любой радиолюбитель без труда может собрать устройство, подавляющее сигналы навигационных спутников в радиусе нескольких километров.

Кроме того, важно понимать, что координаты места, определяемые посредством ГНСС и оптических наблюдений, строго говоря, суть разные физические величины. Дело в том, что в оптических наблюдениях направление задается отвесной линией, а в спутниковых методах – нормалью к условной поверхности относимости. Оптическими методами определяются астрономические широта и долгота, относящиеся к отвесной линии, а радиометодами – геодезические широта и долгота, относящиеся к нормали к эллипсоиду относимости. Разности между астрономическими и геодезическими координатами, называемые отклонениями отвеса, определяют геоид – эквипотенциальную поверхность силы тяжести. Геоид является предметом изучения физической геодезии и имеет большое значение в геодезии, геофизике, небесной механике и даже в астрометрии, не говоря о множестве прикладных приложений, таких к примеру, как поиск полезных ископаемых.

В силу сказанного выше, говорить о том, что новые радиометоды, такие как ГНСС, полностью вытеснили традиционные (оптические) астрометрические и геодезические наблюдения, на наш взгляд, нельзя. Оптические методы до сих пор сохраняют и будут сохранять свою важность. Правильнее говорить о взаимном дополнении обоих методов.

9.2 Краткие сведения о GPS

В настоящей главе изложение материала представлено на примере американской системы GPS, но различия GPS и ГЛОНАСС весьма незначительны, и изложенный алгоритм с небольшими модификациями может быть применен к системе ГЛОНАСС.

Итак, система GPS состоит из трех сегментов, космического, управляющего и пользовательского.

Космический сегмент представляет собой созвездие из 24 на-

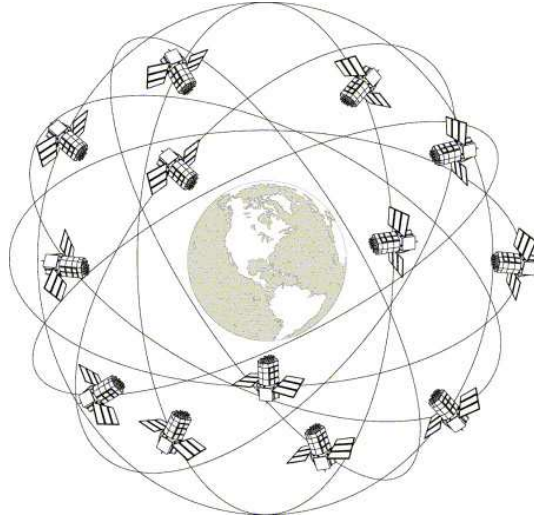


Рис. 9.1: Созвездие спутников GPS

навигационных спутников, размещенных на шести круговых орбитах наклоном 55° на высоте 20200 км над поверхностью Земли, что соответствует периоду обращения 11 часов 58 минут, равному половине звездных суток (рис. 9.1). Такая конфигурация спутников обеспечивают одновременную видимость из любой точки на поверхности Земли как минимум четырех спутников.

На борту навигационного спутника размещены атомный стандарт частоты, радиопередатчик, вычислительное устройство, а также вспомогательное оборудование – корректирующие двигатели и солнечные батареи. Каждый спутник излучает сигнал, позволяющий наблюдателю распознать его и определить расстояние (псевдодальность) до него. Термин псевдодальность отражает факт искажения истинного расстояния до спутника в силу таких причин, как всегда существующие ошибки часов приемника (главная причина) и ошибки часов спутника. Рассеяние сигнала в ионосфере и тропосфере, а также целый ряд других причин также искажают измеряемое расстояние.

Частота бортового тактового генератора составляет 10,23 МГц. На основе этой частоты формируются две несущие частоты излучения спутника L1 ($154 \times 10,23 = 1574,42$) МГц и L2 ($120 \times 10,23 = 1227,60$) МГц. Сигнал на несущих частотах модулируется так называемым псевдослучайным кодом P и C/A. P-код (точный, precise) имеет частоту 10,23 МГц и предназначен для точного

позиционирования, а С/А-код (грубый, coarse acquisition) имеет частоту 1,023 МГц и предназначен для позиционирования с меньшей точностью. Два кода введены для того, чтобы можно было ограничивать использование более точного кода гражданскими потребителями. Коды несут в себе сигнатуру спутника и временные метки, позволяющие приемнику определять время распространения сигнала и вычислять псевдодальность.

Помимо кодов спутниковый сигнал также модулируется навигационным сообщением длиной 1500 бит с частотой 50 Гц. Навигационное сообщение включает альманах – общую информацию о состоянии созвездия GPS, информацию о состоянии ионосферы и грубые эфемериды всех спутников системы, а также точные эфемериды и поправку часов для данного спутника.

Управляющий сегмент GPS состоит из контрольной станции и сети станций слежения. Задача управляющего сегмента – контроль за состоянием системы, отслеживание навигационных спутников и загрузка на борт эфемеридного обеспечения. Обновление бортовых эфемерид обычно выполняется один раз в сутки.

Пользовательский сегмент GPS охватывает всю приемную аппаратуру. GPS-приемник состоит из всенаправленной антенны, входного тракта - подсистемы, ответственной за прием сигнала и его преобразование к виду, пригодному для оцифровки, аналого-цифрового преобразователя, коррелятора и вычислительного модуля. Коррелятор представляет из себя специализированный вычислительный модуль, вычисляющий коррелограммы спутникового сигнала и его реплики, генерируемой приемником. На основании коррелограммы приемник определяет временной сдвиг между меткой спутникового сигнала и его репликой, таким образом определяется время распространения сигнала и, соответственно, псевдодальность.

Идея определения координат места по известным дальностям до спутников проста: если известны расстояния до двух спутников, то положение наблюдателя лежит на окружности – линии пересечения двух сфер с центрами в фазовых центрах антенн спутников и с радиусами, равными измеренным дальностям. При наличии третьего спутника – возможное положение наблюдателя сводится к двум точкам, одну из которых можно исключить как

заведомо лежащую далеко от поверхности Земли. В реальности эта схема нарушается тем, что часы приемника не синхронизированы со шкалой времени GPS. Это является главной причиной того, что измеренное расстояние до спутника (псевдодальность) весьма существенно (десятки километров) отличается от реальной дальности. Определить поправку часов приемника можно с помощью наблюдения четвертого спутника.

Цель практической работы, представленной в данной главе – изучить, как по измеренным псевдодальностям до четырех спутников определяются координаты места и поправка часов приемника. Работа заключается в выполнении измерений псевдодальностей до четырех спутников, вычислении координат этих спутников по бортовым эфемеридам на момент наблюдения и определении по этим данным координат места и поправки часов приемника.

9.3 Геодинамическая станция СПбГУ

Геодинамическая станция СПбГУ была введена в режим постоянной работы в 2006 году. В качестве приемника используется Javad Lехon GGD (рис. 9.2). Это прецизионный двухчастотный приемник, способный производить измерения для всех спутников в поле зрения, как системы GPS, так и системы ГЛОНАСС. Приемник работает как с системой GPS, так и с ГЛОНАСС, имеет 20 каналов. Точность в статическом режиме – 3 мм в плане и 5 мм по высоте.

В качестве антенны ГНСС-станции используется JNS Choke Ring фирмы Javad Navigation System (рис.9.3). Это всепогодная двухчастотная антенна, оснащенная специальным конусным покрытием для защиты от атмосферных осадков. Рабочие полосы частот: 1565-1620 МГц (L1) и 1215-1265 МГц (L2). Масса 3.7 кг. Антенна может работать при температуре от -50°C до $+73^{\circ}\text{C}$.

9.4 RINEX-формат данных для хранения GPS-измерений

Для записи данных измерений ГНСС используется текстовый формат RINEX (Receiver Independant Exchange).



Рис. 9.2: Приемник Javad Lexon GGD



Рис. 9.3: Антенна JNS Choke Ring

Любая информация, записанная в формате RINEX, будь то наблюдательные данные, навигационная информация или метеоданные, состоит из двух частей – заголовка и данных. Заголовок состоит из строк длиной 80 символов. Каждая строка поделена на две части длиной 60 и 20 символов соответственно. Во второй части, справа, пишутся названия параметров, а в первой – их значения в строго заданном формате. Список данных, которые могут быть описаны в заголовке файла с наблюдениями представлен в Приложении 1 (стр. 196). После заголовка начинается собственно блок данных, структура которого представлена в Приложении 2 (стр. 197).

Как и любые данные в формате RINEX, файл навигационных сообщений тоже состоит из заголовка и самих данных. Поля заголовка в RINEX-файле с навигационными сообщениями пишутся в том же формате, что и в RINEX-файле с наблюдениями (Приложение 3 на стр. 198).

Навигационная информация представляет из себя набор данных об орбите и состоянии отдельного спутника. Так как спутники периодически транслируют данные о своих орбитах и диагностические данные, то в одном файле могут встречаться несколько навигационных сообщений от одного спутника – на различные моменты времени. Структура блока данных RINEX-файла с навигационной информацией представлена в Приложении 4 (стр. 199).

9.5 Определение координат спутника по бортовым эфемеридам

Рассмотрим задачу вычисления координат спутника по бортовым эфемеридам.

Бортовые эфемериды:

Параметр	Описание
t_{oe}	Эпоха
WN	Неделя
e	Эксцентриситет орбиты
$A^{\frac{1}{2}}$	Квадратный корень из большей полуоси орбиты
Ω_0	Долгота восходящего узла плоскости орбиты на время эпохи
i_0	Наклонение орбиты на время эпохи
ω	Аргумент перигея
M_0	Средняя аномалия на начало эпохи
Δn	Отклонение значения среднего движения
$\dot{\Omega}$	Скорость изменения долготы восходящего узла плоскости орбиты
$IDOT$	Скорость изменения наклона орбиты
C_{uc}	Амплитуда квадратурной поправки аргумента широты
C_{us}	Амплитуда синфазной поправки аргумента широты
C_{rc}	Амплитуда квадратурной поправки радиуса орбиты
C_{rs}	Амплитуда синфазной поправки радиуса орбиты
C_{ic}	Амплитуда квадратурной поправки наклона орбиты
C_{is}	Амплитуда синфазной поправки наклона орбиты

Наблюдательные данные:

Данные	Описание
P	Псевдодальность до спутника
t_{obs}	Момент наблюдения

Фундаментальные постоянные:

Постоянная	Значение	Описание
μ	$3.986004418 * 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$	Геоцентрическая гравитационная постоянная
$\dot{\Omega}_e$	$7.2921151467 * 10^{-5} \text{ рад/с}$	Угловая скорость вращения Земли
c	299792458.0 м/с	Скорость света

Алгоритм вычисления координат:

1. Среднее движение (рад/с)

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}}. \quad (9.1)$$

2. Момент излучения сигнала спутником

$$t_{em} = t_{obs} - \frac{P}{c}. \quad (9.2)$$

3. Время от начала эпохи (значение берётся по модулю $604800/2$, то есть, если больше 302400 с, то из него вычитается 604800 с, а если меньше - 302400 с, то добавляется 604800 с)

$$t = t_{em} - t_{oe}. \quad (9.3)$$

4. Исправленное среднее движение

$$n = n_0 + \Delta n. \quad (9.4)$$

5. Средняя аномалия

$$M = M_0 + nt. \quad (9.5)$$

6. Эксцентрическая аномалия (находится из уравнения Кеплера методом итераций)

$$M = E - e \sin E. \quad (9.6)$$

7. Истинная аномалия

$$\operatorname{tg} \frac{\nu}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}, \quad (9.7)$$

где углы $\frac{\nu}{2}$ и $\frac{E}{2}$ принадлежат одной четверти полного угла 2π .

8. Аргумент широты

$$\phi = \nu + \omega. \quad (9.8)$$

9. Поправки аргумента широты, радиуса и наклона:

$$\delta u = C_{us} \sin 2\phi + C_{uc} \cos 2\phi, \quad (9.9)$$

$$\delta r = C_{rs} \sin 2\phi + C_{rc} \cos 2\phi, \quad (9.10)$$

$$\delta i = C_{is} \sin 2\phi + C_{ic} \cos 2\phi. \quad (9.11)$$

10. Исправленные значения аргумента широты, радиуса и наклона:

$$u = \phi + \delta u, \quad (9.12)$$

$$r = a(1 - e \cos E) + \delta r, \quad (9.13)$$

$$i = i_0 + \delta i + IDOTt. \quad (9.14)$$

11. Координаты спутника в орбитальной плоскости:

$$X^{orb} = r \cos u, \quad (9.15)$$

$$Y^{orb} = r \sin u. \quad (9.16)$$

12. Исправленная долгота восходящего узла

$$\Omega = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e)t - \dot{\Omega}_e t_{oe}. \quad (9.17)$$

13. Положение в земной системе координат:

$$X = X^{orb} \cos \Omega - Y^{orb} \cos i \sin \Omega, \quad (9.18)$$

$$Y = X^{orb} \sin \Omega + Y^{orb} \cos i \cos \Omega, \quad (9.19)$$

$$Z = Y^{orb} \sin i. \quad (9.20)$$

9.6 Определение координат места и поправки часов приемника

Пусть в моменты $t_i, i \in [1, 4]$ проведены наблюдения псевдодальностей P_i^0 до четырех спутников. Внося в P_i^0 коррекции за поправки Δt_i^s часов спутников, получим:

$$P_i = P_i^0 + c\Delta t_i^s, \quad i \in [1, 4]. \quad (9.21)$$

Обозначая через $\epsilon = c\Delta t$ поправку псевдодальности за счет того, что часы нашего приемника требуют поправку Δt по отношению к шкале времени GPS, запишем основные уравнения нашей задачи:

$$(P_1 + \epsilon)^2 = (X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + (Z_1 - Z)^2, \quad (9.22)$$

$$(P_2 + \epsilon)^2 = (X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + (Z_2 - Z)^2, \quad (9.23)$$

$$(P_3 + \epsilon)^2 = (X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2 + (Z_3 - Z)^2, \quad (9.24)$$

$$(P_4 + \epsilon)^2 = (X_4 - X)^2 + (Y_4 - Y)^2 + (Z_4 - Z)^2. \quad (9.25)$$

Эта система из четырех нелинейных уравнений содержит четыре неизвестных: X, Y, Z - координаты пункта и Δt - поправку часов приемника. Координаты $(X_i, Y_i, Z_i), i \in [1, 4]$ вычисляются по эфемеридам спутников.

Можно показать, что в том случае, когда $\Delta t = 0$, достаточно пронаблюдать только 3 спутника. Эта информация в конечном итоге дает два положения пункта наблюдений, одно из которых отбрасывается ввиду его очевидной нереальности. Четвертый спутник обеспечивает возможность определения не только искомым координат X, Y, Z , но и поправку Δt часов приемника относительно шкалы GPS Time.

Вычитая последовательно первое уравнение из второго и т.д., можно привести выражения (9.22), (9.23), (9.24), (9.25) к виду:

$$X\Delta X_1 + Y\Delta Y_1 + Z\Delta Z_1 = A_1 - \epsilon\Delta P_1, \quad (9.26)$$

$$X\Delta X_2 + Y\Delta Y_2 + Z\Delta Z_2 = A_2 - \epsilon\Delta P_2, \quad (9.27)$$

$$X\Delta X_3 + Y\Delta Y_3 + Z\Delta Z_3 = A_3 - \epsilon\Delta P_3, \quad (9.28)$$

где

$$\Delta P_i = P_{i+1} - P_i, \quad i \in [1, 3], \quad (9.29)$$

$$\sigma P_i = P_{i+1} + P_i, \quad i \in [1, 3], \quad (9.30)$$

$$\Delta X_i = X_{i+1} - X_i, \quad i \in [1, 3], \quad (9.31)$$

$$\sigma X_i = X_{i+1} + X_i, \quad i \in [1, 3], \quad (9.32)$$

$$\Delta Y_i = Y_{i+1} - Y_i, \quad i \in [1, 3], \quad (9.33)$$

$$\sigma Y_i = Y_{i+1} + Y_i, \quad i \in [1, 3], \quad (9.34)$$

$$\Delta Z_i = Z_{i+1} - Z_i, \quad i \in [1, 3], \quad (9.35)$$

$$\sigma Z_i = Z_{i+1} + Z_i, \quad i \in [1, 3], \quad (9.36)$$

$$(9.37)$$

$$A_i = (\Delta X_i \sigma X_i + \Delta Y_i \sigma Y_i + \Delta Z_i \sigma Z_i - \Delta P_i \sigma P_i) / 2, \quad i \in [1, 3] \quad (9.38)$$

Пользуясь правилом Крамера, разрешим уравнения (9.26), (9.27), (9.28) относительно величин X, Y, Z , включив формально члены, пропорциональные ϵ , в решение:

$$X = \frac{D_1}{D} + \epsilon \frac{d_1}{D}, \quad (9.39)$$

$$Y = \frac{D_2}{D} + \epsilon \frac{d_2}{D}, \quad (9.40)$$

$$Z = \frac{D_3}{D} + \epsilon \frac{d_3}{D}, \quad (9.41)$$

где

$$D = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta Y_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta X_2 & \Delta Y_2 & \Delta Z_2 \\ \Delta X_3 & \Delta Y_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix}, \quad (9.42)$$

$$D_1 = \det \begin{pmatrix} \Delta A_1 & \Delta Y_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta A_2 & \Delta Y_2 & \Delta Z_2 \\ \Delta A_3 & \Delta Y_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix}, \quad (9.43)$$

$$D_2 = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta A_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta X_2 & \Delta A_2 & \Delta Z_2 \\ \Delta X_3 & \Delta A_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix}, \quad (9.44)$$

$$D_3 = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta Y_1 & \Delta A_1 \\ \Delta X_2 & \Delta Y_2 & \Delta A_2 \\ \Delta X_3 & \Delta Y_3 & \Delta A_3 \end{pmatrix}, \quad (9.45)$$

$$d_1 = \det \begin{pmatrix} -\Delta P_1 & \Delta Y_1 & \Delta Z_1 \\ -\Delta P_2 & \Delta Y_2 & \Delta Z_2 \\ -\Delta P_3 & \Delta Y_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix}, \quad (9.46)$$

$$d_2 = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & -\Delta P_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta X_2 & -\Delta P_2 & \Delta Z_2 \\ \Delta X_3 & -\Delta P_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix}, \quad (9.47)$$

$$d_3 = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta Y_1 & -\Delta P_1 \\ \Delta X_2 & \Delta Y_2 & -\Delta P_2 \\ \Delta X_3 & \Delta Y_3 & -\Delta P_3 \end{pmatrix}. \quad (9.48)$$

С помощью обозначений

$$X' = \frac{D_1}{D}, \quad Y' = \frac{D_2}{D}, \quad Z' = \frac{D_3}{D}, \quad (9.49)$$

$$a_x = \frac{d_1}{D}, \quad a_y = \frac{d_2}{D}, \quad a_z = \frac{d_3}{D}, \quad (9.50)$$

наше решение представим в виде:

$$X = X' + \epsilon a_x, \quad Y = Y' + \epsilon a_y, \quad Z = Z' + \epsilon a_z. \quad (9.51)$$

Подставляя это решение в любое из исходных уравнений (например, в четвертое), мы получим квадратное уравнение вида

$$a_4\epsilon^2 + 2b_4\epsilon + c_4 = 0, \quad (9.52)$$

где

$$a_4 = 1 - a_x^2 - a_y^2 - a_z^2, \quad (9.53)$$

$$b_4 = P_4 + \Delta X'_4 a_x + \Delta Y'_4 a_y + \Delta Z'_4 a_z, \quad (9.54)$$

$$c_4 = -\Delta X_4'^2 - \Delta Y_4'^2 - \Delta Z_4'^2 + P_4^2, \quad (9.55)$$

$$\Delta X'_4 = X_4 - X', \quad \Delta Y'_4 = Y_4 - Y', \quad \Delta Z'_4 = Z_4 - Z'. \quad (9.56)$$

Решение этого квадратного уравнения имеет вид

$$\epsilon_{1,2} = -\frac{b_4}{a_4} \pm \frac{\sqrt{b_4^2 - a_4 c_4}}{a_4}. \quad (9.57)$$

Одно из этих решений имеет неправдоподобное значение и отбрасывается. Второе значение используется для получения поправки часов $\Delta t = \frac{\epsilon}{c}$ и искомых координат пункта X, Y, Z в системе ITRF. Критерием для определения истинного решения на геодинимической станции СПбГУ является: $\Delta t \in [-0.0005, 0.0005]$ (секунды).

Далее преобразуем декартовы координаты X, Y, Z в геодезические в системе WGS-84 при следующих значениях фундаментальных постоянных:

Постоянная	Значение	Описание
a	6378137.0 м	Большая полуось эллипсоида WGS-84
b	6356752.0 м	Малая полуось эллипсоида WGS-84

Параметры трансформации:

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}, \quad (9.58)$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}. \quad (9.59)$$

Определим теперь долготу и широту:

$$\lambda = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X}, \quad (9.60)$$

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{Z + e'^2 b \sin^3 \Theta}{\sqrt{X^2 + Y^2} - e^2 a \cos^3 \Theta}, \quad (9.61)$$

где

$$\Theta = \operatorname{arctg} \frac{a}{b} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (9.62)$$

9.7 Пример вычисления координат и времени по GPS-измерениям

Приведем пример расчета координат места и поправки часов приемника на момент времени 11:53:45 10.07.2006 по временной шкале GPS Time (или 1383 неделя 129225 секунда) по 4 GPS-спутникам: G8, G10, G13, G27. Наблюдения проводились в рамках астрометрической практики в лаборатории астрометрии СПбГУ.

Расчет координат спутника G8 на момент наблюдения

Наблюдательные данные по спутнику G8:

Данные	Значение
P	21267472.262
t_{obs}	11 53 45 / 1383 week 129225 sec

Бортовые эфемериды спутника G8:

Параметр	Значение
t_{oe}	129600.0
WN	1383.0
e	0.00963819015305
$A^{\frac{1}{2}}$	5153.62374496
Ω_0	2.73843067938
i_0	0.974034050279
ω	2.66223304346
M_0	-1.78927512368
Δn	3.83337396113e-009
$\dot{\Omega}$	-7.68603443990e-009
$IDOT$	1.67864135072e-011
C_{uc}	-7.13393092155e-006
C_{us}	9.02265310287e-006
C_{rc}	214.21875
C_{rs}	-135.6875
C_{ic}	-1.86264514923e-007
C_{is}	-5.21540641785-008

Решение:

1. Среднее движение (рад/с)

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}} = 0.0001458581.$$

2. Момент излучения сигнала со спутника

$$t_{em} = t_{obs} - \frac{P}{c} = 129225.0 - 0.070941 = 129224.929059.$$

3. Время от начала эпохи (значение берётся по модулю 604800/2, то есть, если больше 302400 с, то из него вычитается 604800 с, а если меньше - 302400 с, то добавляется 604800 с)

$$t = t_{em} - t_{oe} = -375.070941.$$

4. Исправленное среднее движение

$$n = n_0 + \Delta n = 0.0001458620.$$

5. Средняя аномалия

$$M = M_0 + nt = -1.8439837267.$$

6. Эксцентрическая аномалия (находится из уравнения Кеплера методом итераций)

$$E = -1.8532400252.$$

7. Истинная аномалия

$$\nu = -1.8624840568.$$

8. Аргумент широты

$$\phi = \nu + \omega = 0.7997489867.$$

9. Поправки аргумента широты, радиуса и наклона:

$$\delta u = C_{us} \sin 2\phi + C_{uc} \cos 2\phi = 9.22366e - 006,$$

$$\delta r = C_{rs} \sin 2\phi + C_{rc} \cos 2\phi = -141.779201926,$$

$$\delta i = C_{is} \sin 2\phi + C_{ic} \cos 2\phi = -4.679e - 008.$$

10. Исправленные значения аргумента широты, радиуса и наклона:

$$u = \phi + \delta u = 0.7997582103,$$

$$r = a(1 - e \cos E) + \delta r = 26631040.8523,$$

$$i = i_0 + \delta i + IDOTt = 0.9740339972.$$

11. Координаты спутника в орбитальной плоскости

$$X^{orb} = r \cos u = 18558643.4313,$$

$$Y^{orb} = r \sin u = 19099452.6327.$$

12. Исправленная долгота восходящего узла

$$\Omega = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e)t - \dot{\Omega}_e t_{oe} = -5.8815735513.$$

13. Положение в земной системе координат

$$X = X^{orb} \cos \Omega - Y^{orb} \cos i \sin \Omega = 21277632.227,$$

$$Y = X^{orb} \sin \Omega + Y^{orb} \cos i \cos \Omega = 2624628.197,$$

$$Z = Y^{orb} \sin i = 15798292.012.$$

14. Координаты спутников G10, G13, G27 — рассчитываются аналогично G8.

Определение координат и поправки часов приемника по четырем спутникам

Исходные данные:

№	i	X_i	Y_i	Z_i	P_i^0
G 8	1	21277632.227	2624628.197	15798292.012	21267472.262
G10	2	14136001.009	-7530688.663	21144548.488	21406610.202
G13	3	6380947.343	22063437.865	13292356.357	22193724.917
G27	4	13667726.877	9545209.321	21346910.550	20826905.858

№	i	Δt_i^s
G 8	1	-7.19673630017e-005
G10	2	8.63327302812e-005
G13	3	7.60678518091e-005
G27	4	5.73110823339e-005

Решение:

1. Коррекция псевдодальностей за поправку часов спутников:

i	P_i
1	21245896.989
2	21432492.103
3	22216529.485
4	20844087.288

2. Вычисление вспомогательных сумм и разностей:

i	ΔP_i	ΔX_i	ΔY_i	ΔZ_i
1	186595.114	-7141631.218	-10155316.860	5346256.475
2	784037.382	-7755053.666	29594126.528	-7852192.130
3	-1372442.197	7286779.534	-12518228.544	8054554.193

i	σP_i	σX_i	σY_i	σZ_i
1	42678389.093	35413633.236	-4906060.466	36942840.499
2	43649021.589	20516948.352	14532749.202	34436904.844
3	43060616.774	20048674.220	31608647.186	34639266.907

3. Вычислить:

$$A_i = (\Delta X_i \sigma X_i + \Delta Y_i \sigma Y_i + \Delta Z_i \sigma Z_i - \Delta P_i \sigma P_i) / 2.$$

i	A_i
1	-6773094355233.816
2	-16826837347660.354
3	44254029773618.672

4. Вычислить:

$$D = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta Y_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta X_2 & \Delta Y_2 & \Delta Z_2 \\ \Delta X_3 & \Delta Y_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix} = -1.68750626538 \times 10^{21}.$$

5. Вычислить:

$$D_1 = \det \begin{pmatrix} \Delta A_1 & \Delta Y_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta A_2 & \Delta Y_2 & \Delta Z_2 \\ \Delta A_3 & \Delta Y_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix} = -4.67184278242 \times 10^{27},$$

$$D_2 = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta A_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta X_2 & \Delta A_2 & \Delta Z_2 \\ \Delta X_3 & \Delta A_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix} = -2.72853445601 \times 10^{27},$$

$$D_3 = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta Y_1 & \Delta A_1 \\ \Delta X_2 & \Delta Y_2 & \Delta A_2 \\ \Delta X_3 & \Delta Y_3 & \Delta A_3 \end{pmatrix} = -9.28576309188 \times 10^{27}.$$

6. Вычислить:

$$d_1 = \det \begin{pmatrix} -\Delta P_1 & \Delta Y_1 & \Delta Z_1 \\ -\Delta P_2 & \Delta Y_2 & \Delta Z_2 \\ -\Delta P_3 & \Delta Y_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix} = -1.45500250602 \times 10^{20},$$

$$d_2 = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & -\Delta P_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta X_2 & -\Delta P_2 & \Delta Z_2 \\ \Delta X_3 & -\Delta P_3 & \Delta Z_3 \end{pmatrix} = -5.92005055079 \times 10^{19},$$

$$d_3 = \det \begin{pmatrix} \Delta X_1 & \Delta Y_1 & -\Delta P_1 \\ \Delta X_2 & \Delta Y_2 & -\Delta P_2 \\ \Delta X_3 & \Delta Y_3 & -\Delta P_3 \end{pmatrix} = -2.47917137068 \times 10^{20}.$$

7. Вычислить:

$$X' = \frac{D_1}{D} = 2768489.148,$$

$$Y' = \frac{D_2}{D} = 1616903.304,$$

$$Z' = \frac{D_3}{D} = 5502653.994.$$

8. Вычислить:

$$a_x = \frac{d_1}{D} = 0.0862220506023,$$

$$a_y = \frac{d_2}{D} = 0.0350816507908,$$

$$a_z = \frac{d_3}{D} = 0.146913313544.$$

9. Вычислить:

$$\Delta X'_4 = X_4 - X' = 10899237.7292,$$

$$\Delta Y'_4 = Y_4 - Y' = 7928306.01696,$$

$$\Delta Z'_4 = Z_4 - Z' = 15844256.5554.$$

10. Вычислить коэффициенты квадратного уравнения для 4-го спутника:

$$a_4 = 1 - a_x^2 - a_y^2 - a_z^2 = 0.969751514071,$$

$$b_4 = P_4 + \Delta X'_4 a_x + \Delta Y'_4 a_y + \Delta Z'_4 a_z = 24389712.2095,$$

$$c_4 = -\Delta X_4'^2 - \Delta Y_4'^2 - \Delta Z_4'^2 + P_4^2 = 1784089710472.375.$$

11. Вычислить:

$$\epsilon_1 = -\frac{b_4}{a_4} + \frac{\sqrt{b_4^2 - a_4 c_4}}{a_4} = -36601.2691246,$$

$$\epsilon_2 = -\frac{b_4}{a_4} - \frac{\sqrt{b_4^2 - a_4 c_4}}{a_4} = -50264350.7905,$$

$$\Delta t_1 = \frac{\epsilon_1}{c} = -0.000122, \quad \Delta t_2 = \frac{\epsilon_2}{c} = -0.167663,$$

Нашему критерию: $-0.0005 < \Delta t < 0.0005$ удовлетворяет Δt_1 , поэтому принимаем $\epsilon = \epsilon_1$.

12. Вычислить:

$$X = X' + \epsilon a_x = 2765333.312,$$

$$Y = Y' + \epsilon a_y = 1615619.271,$$

$$Z = Z' + \epsilon a_z = 5497276.781.$$

13. Вычислить параметры трансформации координат:

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 0.0066944782,$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} = 0.0067395963.$$

14. Определить долготу:

$$\lambda = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X} = 30^\circ 17' 42.704'' = 2^{\text{h}} 1^{\text{m}} 10.847^{\text{s}}.$$

15. Вычислить:

$$\Theta = \operatorname{arctg} \frac{aZ}{b\sqrt{X^2 + Y^2}} = 1.044730497.$$

16. Определить широту:

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{Z + e'^2 b \sin^3 \Theta}{\sqrt{X^2 + Y^2} - e^2 a \cos^3 \Theta} = 59^\circ 56' 31.696''.$$

9.8 Приложения

Приложение 1. Структура заголовка RINEX-файла с наблюдениями.

Параметры	Описание
RINEX VERSION / TYPE	1. Версия формата. 2. Тип RINEX-файла. 3. Используемые спутники (возможные варианты: пустое поле или «G» - GPS «R» - ГЛОНАСС «M» - Mixed (ГЛОНАСС+GPS))
PGM / RUN BY / DATE	1. Название программы (генератора данного файла). 2. Имя организации (автора данного файла). 3. Время создания файла
COMMENT	Строки с комментариями
MARKER NAME	Имя маркера
MARKER NUMBER	Номер маркера
OBSERVER / AGENCY	Имя наблюдателя / организации
REC# / TYPE / VER	Номер приёмника, тип приёмника, версия ПО
ANT # / TYPE	Номер и тип антенны
APPROX POSITION XYZ	Приближённые координаты маркера (WGS 84)
ANTENNA:	Высота и смещение к востоку и к северу антенны относительно маркера
WAVELENGTH FACT L1/2	1. Волновой фактор для L1 / L2. 2. Число спутников, на которые распространяются данные значения (0 или пустой символ – данные значения распространяются на все спутники). 3. Список номеров спутников

Приложение 1 . Структура заголовка RINEX-файла с наблюдениями. (Продолжение)

Параметры	Описание
# / TYPES OF OBSERV	1. Число типов наблюдений. 2. Типы наблюдений: - L1, L2: измерения по фазе на частотах L1 и L2; - C1: псевдодальности по C/A-коду на частотах L1 и L2; - P1, P2: псевдодальности по P-коду на частотах L1 и L2; - D1, D2: измерения по эффекту Доплера частотах на L1 и L2. Единицы измерений: - измерения фазы – в полных циклах; - псевдодальности – в метрах; - доплер – в герцах
INTERVAL	Интервал между наблюдениями, в секундах
TIME OF FIRST OBS	1. Время первой записи наблюдений в файл. 2. Шкала времени (GPS = шкала времени GPS; GLO = шкала времени UTC)
TIME OF LAST OBS	Время последней записи наблюдений в файл
LEAP SECONDS	Число добавленных секунд, с 6 янв. 1980 г.
# OF SATELLITES	Общее число спутников, участвовавших в наблюдениях
PRN / # OF OBS	1. PRN (номер спутника). 2. Число наблюдений каждого типа
END OF HEADER	Пустая строка, символ конца заголовка

Приложение 2 . Структура блока данных RINEX-файла с наблюдениями.

Название записи	Описание
Epoch/Sat or Event Flag	<p>1. Эпоха наблюдения (год (2 цифры), месяц, день, часы, минуты, секунды).</p> <p>2. Флаг эпохи '0': ОК, '1': сбой питания, '> 1': флаг события.</p> <p>3. Число спутников, передавших сигнал на данную эпоху.</p> <p>4. Перечисление PRN – бортовых номеров спутников.</p> <p>5. Поправка часов приёмника (необязательна)</p>
Observations	<p>Данная запись повторяется для каждого из спутников, перечисленных в поле Epoch/Sat:</p> <p>1. Измеренная величина.</p> <p>2. Индикатор loss of lock.</p> <p>3. Мощность сигнала: '1': минимально допустимая; '5': обеспечивающая приемлемое соотношение сигнал/шум; '9': максимально допустимая; '0': неизвестна или не имеет значения.</p> <p>Все три величины повторяются для каждого типа наблюдения, в той же последовательности, как и в заголовке. В случае если количество типов наблюдений больше 5, то запись переносится на следующую строку</p>

Приложение 3 . Структура заголовка RINEX-файла с навигационной информацией (GPS).

Параметры	Описание
RINEX VERSION / TYPE (обязательный)	1. Версия формата RINEX. 2. Тип файла (N – навигационные данные)
PGM / RUN BY / DATE (обязательный)	1 Название программы (генератора данного файла). 2. Имя организации (автора данного файла). 3. Время создания файла
COMMENT	Строки с комментариями
ION ALPHA	Ионосферные параметры альманаха (A0-A3)
ION BETA	Ионосферные параметры альманаха (B0-B3)
DELTA-UTC: A0,A1,T,W	Параметры альманаха для пересчёта времени в шкалу UTC: 1. A0, A1: полиномиальные коэффициенты. 2. T – эпоха UTC: время с начала недели (полночь с субботы на воскресенье) в секундах. 3. W – эпоха UTC (номер недели начиная 6 января 1980 года)
LEAP SECONDS	Разница между временем UTC и временем GPS, с.
END OF HEADER (обязательный)	Последняя запись заголовка

Приложение 4 . Структура блока данных RINEX-файла с навигационной информацией (GPS).

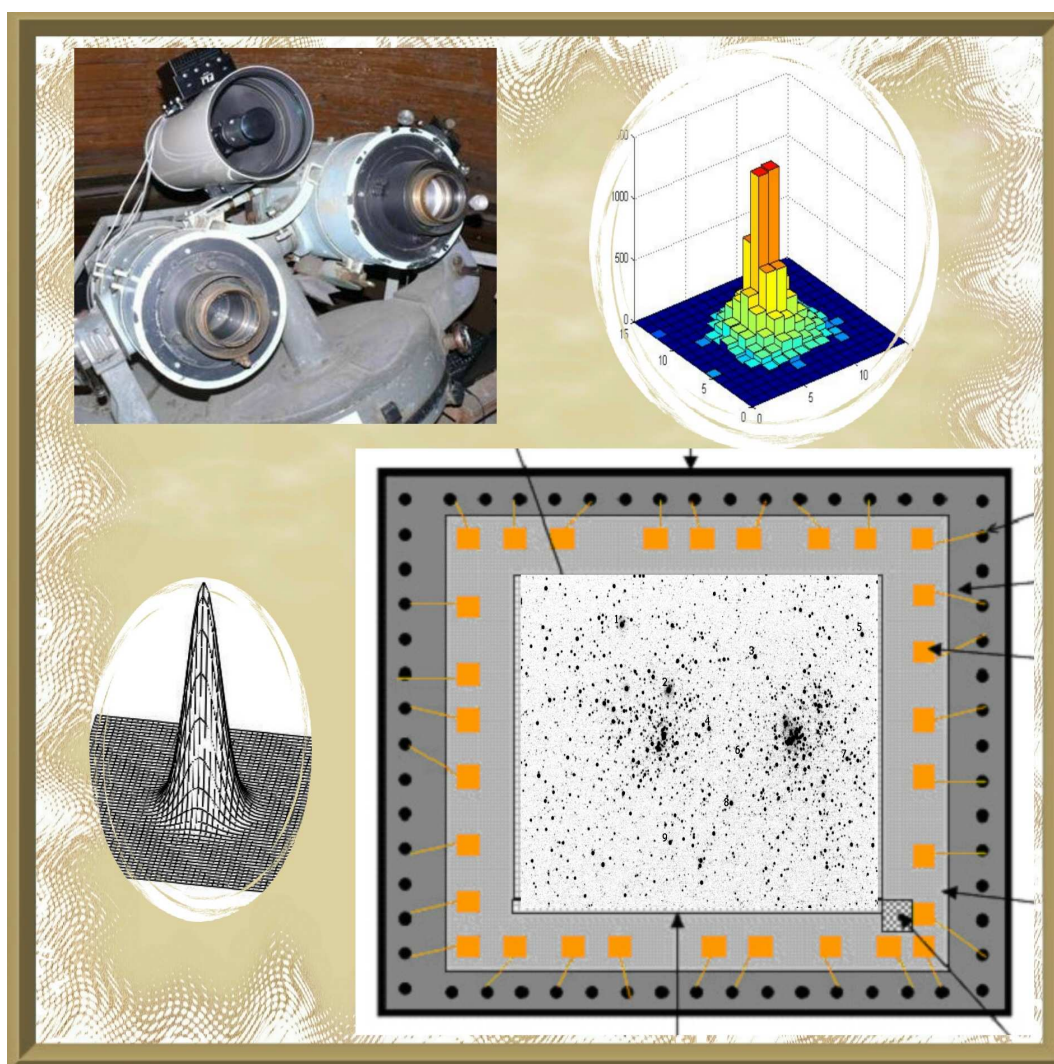
Строка	Содержание строки
Строка № 1 (PRN / EPOCH / SV CLK)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Номер спутника (PRN) 2. Эпоха (время сообщения): <ul style="list-style-type: none"> - год; - месяц; - день; - часы; - минуты; - секунды; 3. Поправка часов спутника. 4. Ход часов спутника. 5. Скорость хода часов
Строка № 2	<ol style="list-style-type: none"> 1. IODE (Issue of Data Ephemeris) – метка навигационного сообщения 2. C_{rs} - амплитуда синусоидальной поправки радиуса орбиты (m) 3. Δn - отклонение значения среднего движения (рад/с) 4. M_0 - средняя аномалия на начало эпохи(рад)
Строка № 3	<ol style="list-style-type: none"> 1. C_{uc} - амплитуда косинусоидальной поправки аргумента широты (рад). 2. e - эксцентриситет орбиты. 3. C_{us} - амплитуда синусоидальной поправки аргумента широты (рад). 4. $A^{\frac{1}{2}}$ - квадратный корень из большей полуоси орбиты ($m^{\frac{1}{2}}$)

Приложение 4. Структура блока данных RINEX-файла с навигационной информацией (GPS). (Продолжение)

Строка	Содержание строки
Строка № 4	<ol style="list-style-type: none"> 1. T_{oe} - эпоха, на которую даются эфемеридные данные (секунды GPS-недели). 2. C_{ic} - амплитуда косинусоидальной поправки наклона орбиты (рад). 3. Ω_0 - долгота восходящего узла плоскости орбиты на время эпохи (рад). 4. C_{is} - амплитуда синусоидальной поправки радиуса орбиты (рад)
Строка № 5	<ol style="list-style-type: none"> 1. i_0 - наклонение орбиты на время эпохи (рад). 2. C_{rc} - амплитуда косинусоидальной поправки радиуса орбиты (м). 3. ω_0 - аргумент перигея (рад). 4. $\dot{\Omega}$ - скорость изменения долготы восходящего узла плоскости орбиты (рад/с)
Строка № 6	<ol style="list-style-type: none"> 1. $IDOT$ - скорость изменения наклона орбиты (рад/с). 2. Доп. информация. 3. WN – номер недели GPS для эпохи эфемерид. 4. доп. информация
Строка № 7	<ol style="list-style-type: none"> 1. Точность определения координат спутника (м). 2. Состояние систем спутника. 3. Tgd – время групповой задержки (с). 4. IODC (Issue of Data, Clock)
Строка № 8	<ol style="list-style-type: none"> 1. Время передачи сообщения (секунды недели GPS). 2. Пусто. 3. Пусто. 4. Пусто

Глава 10

ПЗС-астрометрия



10.1 Введение

В 90-х годах XX века началось активное оснащение практически всех оптических астрономических инструментов принципиально новыми приборами для регистрации излучения – приборами с зарядовой связью (ПЗС) – charge coupled devices (CCD). Неоспоримые их достоинства, а именно, простота регистрации изображений и возможность мгновенного ввода изображений в компьютер для последующей обработки, широкий спектральный и динамический диапазон, линейность и стабильность характеристик, их несомненные преимущества перед фотопластинками и фотоумножителями, привели к быстрому и широчайшему распространению этих приборов в качестве устройств для оптических астрономических наблюдений. Основные недостатки – высокая стоимость и небольшие линейные размеры ПЗС. Тем не менее, ПЗС стали успешно применяться в самых разнообразных областях деятельности – промышленности, медицине, в быту, и, конечно же, в самых разных областях науки – в биологии, химии, физике, в космических исследованиях. Востребованность стимулирует уникальный прогресс в совершенствовании ПЗС и технологии их изготовления, а также позволяет снижать стоимость за счет массового производства.

10.1.1 Краткая история ПЗС

Приборы с зарядовой связью явились одним из важнейших достижений бурного развития микроэлектроники во второй половине XX века. Эти устройства фиксируют изображение и позволяют сохранять его в цифровом формате на различных современных носителях информации. Приборы с зарядовой связью были изобретены Бойлом (Willard Boyle) и Смитом (George E. Smith) в 1969 году [24], [23] в AT&T Bell Labs как электронный аналог памяти на магнитных кольцах. В качестве устройства памяти они должны были хранить биты информации, обеспечивать считывание, запись и очистку ячеек. Однако вскоре, уже в 1970 году, выяснилось, что предложенный прибор является превосходным устройством для регистрации изображений.

В самом общем виде ПЗС может быть представлен как набор

ячеек – пикселей, способных улавливать электромагнитное излучение, накапливать информацию о потоке квантов в каждом отдельном пикселе и обеспечивать последовательное считывание этой информации. Изначально такие совокупности пикселей были реализованы в виде линейных ПЗС и матричных, последние по сути представляют собой набор линейных. Основным моментом в изобретении ПЗС является принцип считывания информации, для чего использована специфическая структура пикселей.

Первые действующие ПЗС были продемонстрированы в 1970 г. в двух вариантах: линейный ПЗС из 96 элементов и матричный – 8 x 8 элементов. Это положило начало бурному развитию разработок разнообразных вариантов устройства и технологий производства ПЗС, широчайшему спектру применений этих замечательных приборов. Уже в 1974 году была выпущена первая промышленная ТВ-камера на основе ПЗС размером 256 x 220 пикселей. Через год появилась камера размером 512 x 320, а в настоящее время даже матрицы с размерами более 4000 x 4000 пикселей являются широко распространенными и привычными.

С самого начала эры применения ПЗС были отмечены неоспоримые достоинства этих приборов. В первую очередь это высокая квантовая эффективность, способность ПЗС улавливать почти весь поток фотонов. Квантовая эффективность современных приборов достигает 95-97 %. Для сравнения можно сказать, что квантовая эффективность качественных фотоматериалов составляет 3-5 %, фотоумножителей – 10-20 %. Замечательным свойством ПЗС является линейность характеристик – выходной сигнал прямо пропорционален количеству поглощенных фотонов вплоть до предела возможности накопления в пикселях. Сочетание высокой квантовой эффективности, линейности и низких шумов ПЗС обеспечивает большой динамический диапазон (возможность фиксировать на одном изображении и очень яркие, и очень слабые объекты), а также измерять фотометрические величины с высокой точностью. К этому надо прибавить и широкий спектральный диапазон, современные ПЗС работают от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра.

Важнейшим достоинством ПЗС является возможность мгновенного ввода цифрового изображения в компьютер для его по-

следующей обработки и интерпретации. Если принять во внимание низкое энергопотребление, небольшие размеры, геометрическую стабильность, надежность и долговечность этих приборов, становится понятным, почему они так быстро заменили практически все ранее существовавшие средства регистрации изображений. Можно с уверенностью сказать, что ПЗС в значительной степени изменили мир за последние два десятилетия, и этот процесс продолжается удивительно быстрыми темпами.

Астрономы одними из первых оценили потенциальные возможности ПЗС для получения высококачественных изображений с целью научных исследований. Еще в 1973 году сотрудники Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory – JPL) в США приступили к реализации программы создания высококачественных ПЗС-камер большого формата для космической навигации и космической съемки. Для того чтобы пробудить интерес астрономов к ПЗС, в JPL была создана «Путешествующая ПЗС-камера» (Travelling CCD Camera System), первая в своем роде. Эта камера была предназначена для экспериментальных наблюдений в различных обсерваториях с целью демонстрации возможностей ПЗС. Первое применение ПЗС в астрономии состоялось в 1975 году, это были наблюдения Урана на 61-см телескопе университета Аризоны сотрудниками JPL J. Janesick и Blouke [26].

В России первым значительным астрономическим исследованием с использованием ПЗС можно считать изучение кометы Галлея с помощью космических аппаратов "Вега-1" (старт 15 декабря 1984 г.) и "Вега-2" (21 декабря 1984 г.). Аппаратура, разработанная Институтом космических исследований в сотрудничестве с рядом отечественных и зарубежных ученых, основывалась на отечественных ПЗС размером 576 x 512 пикселей и позволила провести детальные съемки кометы Галлея с исключительно близких расстояний (менее 10 000 км).

подавляющее большинство первых работ в области астрономии на основе ПЗС-наблюдений было посвящено фотометрии небесных объектов и связанным с нею различным астрофизическим задачам. Это объясняется сравнительной простотой и эффективностью использования ПЗС для измерения световых по-

токов благодаря линейности характеристик и высокой чувствительности этих приборов.

Астрометрические применения ПЗС требовали более сложных методов обработки информации, получаемой из снимков. Первые астрометрические работы были посвящены измерениям положений квазаров как наиболее важных объектов для установления связи оптических и радиоинтерферометрических координатных систем, для абсолютизации каталогов звезд. Почти одновременно появились работы по астрометрии спутников больших планет Солнечной системы. Выбор задач определялся тем, что линейные размеры первых ПЗС были очень небольшими, это ограничивало поле зрения телескопа и, соответственно, класс решаемых задач.

В настоящее время ситуация изменилась в связи с быстрым развитием техники ПЗС, технологии изготовления приборов и значительным удешевлением их. Появились матрицы больших размеров, приемники, состоящие из большого количества отдельных ПЗС-матриц, смонтированных на общей платформе. Это позволило практически полностью заменить все иные средства и методы решения астрометрических и фотометрических задач, связанных с наблюдениями различных космических объектов.

10.1.2 Современные задачи ПЗС-астрометрии

Основной проблемой современной наземной оптической астрометрии является расширение фундаментальных систем координат, заданных высокоточными каталогами звезд, на более слабые звезды. Это связано с необходимостью координатного и фотометрического обеспечения на новом уровне целого ряда фундаментальных и прикладных задач. Необходимо создание универсальных высокоточных каталогов положений, собственных движений, блеска и цвета звезд по всему небу до 15-20 звездной величины общим объемом до сотен миллионов звезд. Такие каталоги настоятельно необходимы для решения широкого круга самых разнообразных задач как в области астрономии, так и в прикладных работах и исследованиях.

Важной задачей является изучение кинематики и динамики тел Солнечной системы. Инструменты с ПЗС-регистрацией ак-

тивно и эффективно используются для исследования движений различных тел Солнечной системы (большие планеты и их спутники, малые планеты, астероиды, кометы). Важным достоинством ПЗС в этом случае является большой динамический диапазон яркостей одновременно наблюдаемых объектов, а именно 7-8 звездных величин.

Актуальной остается задача связи различных координатных систем путем оптических наблюдений на фоне звезд объектов, задающих эту систему - например, наблюдений квазаров, определяющих радиоинтерферометрическую систему координат, или, например, наблюдений тел Солнечной системы, определяющих динамическую систему отсчета, или наблюдений спутников системы GPS (или любой другой) для привязки навигационных систем к фундаментальным координатным системам.

Астрометрические методы часто используются в звездно-астрономических и астрофизических исследованиях. ПЗС-инструменты позволяют эффективно решать такие задачи:

- поиск, отождествление и исследование различных астрофизических объектов на основе астрометрических и фотометрических ПЗС-наблюдений (например, гамма-всплесков, новых и сверхновых);

- высокоточные измерения параллаксов звезд, калибровка шкалы расстояний;

- исследования двойных и кратных звезд, звезд со спутниками, что дает крайне важный материал для оценок масс и других параметров небесных объектов;

- исследования состава и кинематики рассеянных и шаровых звездных скоплений, ассоциаций, потоков, исследования кинематики Галактики в целом;

- широкомасштабные исследования переменности звезд;

- наземное обеспечение разнообразных космических астрономических проектов.

Достаточно близкими к астрометрии являются многие задачи геодезии, геодинамики, навигации, космических исследований. ПЗС-инструменты обеспечивают высокоточные определения координат различных объектов и ИСЗ с целью решения задач геодинамики, исследований гравитационного поля Земли и т.д. Важ-

ное астрометрическое приложение в космических исследованиях – звездные датчики систем ориентации космических аппаратов.

Каждая из перечисленных задач (и не приведенных в перечислении) имеет свою специфику и требует для решения соответствующих инструментов (телескопов и ПЗС), методик наблюдений и обработки наблюдений. Рассмотрим вначале те особенности астрометрических работ с ПЗС, которые являются общими для всех задач.

10.2 ПЗС как устройство для регистрации изображений

10.2.1 Принцип работы ПЗС

Рассмотрим простейший вариант – линейный ПЗС (рис. 10.1). Первые экземпляры ПЗС представляли собой кристалл кремния, на поверхность которого нанесен изолирующий тонкий слой диоксида кремния (0.1 микрона). Поверх изолятора нанесены в определенной последовательности тонкие проводящие полоски – электроды. Электроды соединены таким образом, что создают на поверхности кристалла повторяющуюся (с шагом в один пиксель) сеть электродов.

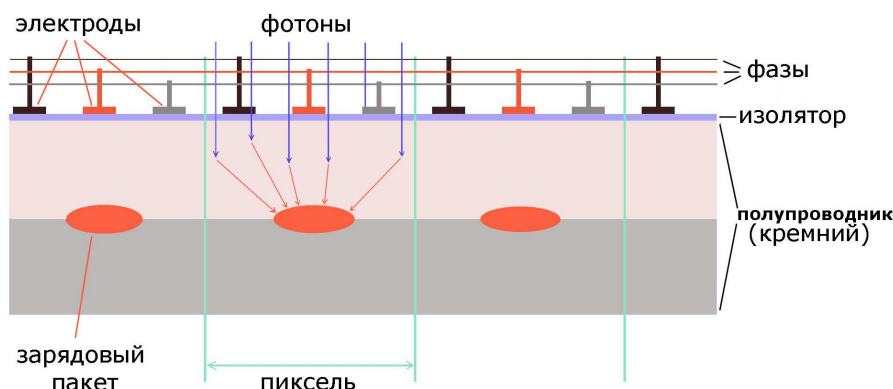


Рис. 10.1: Структура пикселей ПЗС

Матричный ПЗС по сути представляет собой набор линейных, разделенных стоп-каналами — изоляторами. Разумеется, изготавливаются матричные ПЗС не набором линейных, а на едином кристалле, на котором по достаточно сложной технологии формируется "полосатая" структура электродов (фаз) и "впечатыва-

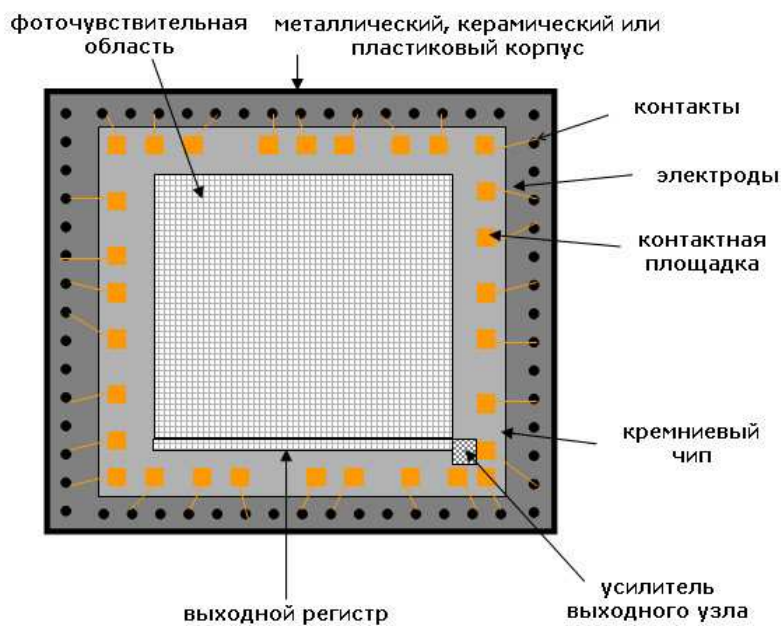


Рис. 10.2: Матричный ПЗС в сборке

ваются" стоп-каналы. После изготовления ПЗС монтируется на отдельную подложку (рис. 10.2) и оснащается управляющей электроникой, обеспечивающей процессы накопления фотоэлектронов, считывания информации и пр.

Работа ПЗС разделяется на следующие этапы:

1. Создание заряда.

Основным процессом, обеспечивающим использование ПЗС в качестве фотоприемника, является фотоэлектронная эмиссия в полупроводниках, образование свободных электронов (и дыр) под действием электромагнитного излучения. Наиболее часто используемый полупроводник – кремний – поглощает фотоны с энергией от 1.1 до 4 эВ, генерируя одну пару электрон–дыра (соответствует диапазону длин волн 3000А-11000А). Кванты большей энергии производят несколько пар электрон–дыра.

2. Накопление заряда

Образовавшиеся в результате фотоэффекта пары рекомбинируются за время примерно 100 микросекунд, поэтому для накопления заряда на один из электродов в каждом пикселе (т.е.

на одну фазу) подается напряжение (напряжение хранения). В результате образовавшиеся свободные электроны скапливаются в зарядовые пакеты под этим электродом. Количество накопленных электронов (дыр) зависит от многих факторов – от особенностей структуры ПЗС, времени накопления (экспозиции) и др.

3. Перенос заряда.

Главный момент в изобретении ПЗС – перенос зарядов вдоль столбцов, ограниченных стоп-каналами, за счет изменения напряжений на управляющих электродах – фазах. Для этого на электрод, соседний с тем, на который подавалось напряжение хранения, подается большее напряжение переноса. Зарядовый пакет перемещается под этот электрод. Далее, напряжение снимается с первого электрода, на второй подается напряжение хранения, а на третий – напряжение переноса. Многократное повторение этого цикла приводит к тому, что все зарядовые пакеты **ОДНОВРЕМЕННО** передвигаются из пикселя в пиксель вдоль столбцов. Последняя строка, в которую переносятся зарядовые пакеты – особенная, так называемый выходной регистр (*serial register*). Зарядовые пакеты в нем последовательно перемещаются вдоль строки к усилителю выходного узла (*on-chip amplifier*) и в нем преобразуются в выходное напряжение, пропорциональное величине зарядового пакета.

4. Измерение заряда.

Последний этап в цикле работы ПЗС – измерение сигнала, преобразование его в некоторое число, пропорциональное величине зарядового пакета в каждом пикселе. Выполняется эта процедура аналого-цифровым преобразователем (АЦП, в англоязычной литературе *analog-digital converter – ADC*), который переводит аналоговый сигнал (выходное напряжение) в численное значение. В зависимости от разрядности АЦП устанавливается соотношение между максимально возможным числом накопленных электронов в каждом пикселе и максимальным числом, соответствующим разрядности процессора.

10.2.2 Основные параметры и характеристики ПЗС-матриц

Тип матрицы

Существует множество вариантов внутреннего устройства ПЗС-матриц и способов считывания информации.

В зависимости от ориентации ПЗС относительно падающего потока фотонов матрицы подразделяются на:

- матрицы с прямой засветкой (front illuminated) — свет падает на ту плоскость ПЗС, на которую нанесены электроды – это более распространенный вариант ПЗС;

- матрицы с обратной засветкой (back-side illuminated) — свет падает на обратную, свободную от электродов сторону кристалла – это значительно более сложный в изготовлении, более качественный и дорогой вариант ПЗС.

По количеству и устройству фаз (групп электродов) матрицы также сильно различаются. Количество фаз варьируется от одной до четырех, существуют варианты ПЗС с виртуальными фазами, с фиксацией потенциала (МРР), с антибльюминговыми электродами. Вариантов структуры ПЗС очень много и постоянно разрабатываются новые.

В соответствии со способом организации считывания ПЗС подразделяются на:

- полнокадровые матрицы (full frame CCD), структура которых в общих чертах описана выше;

- матрицы с покадровым переносом (frame transfer CCD), которые разделены на две равные области: одна из них используется как фотоприемник для экспонирования, а вторая для считывания изображения, которое мгновенно перебрасывается в нее из первой после завершения экспозиции;

- матрицы с чересстрочной разверткой (interline) разных вариантов и другие.

В последнее время интенсивно ведутся разработки новых типов матриц, например, матриц с активными пикселями, которые могут быть особенно эффективными при решении некоторых астрономических задач.

Наиболее часто в астрономии используются полнокадровые матрицы, хотя для некоторых исследований, требующих очень быстрого считывания информации, более полезны матрицы с покад-

ровым переносом.

«Геометрические» параметры ПЗС-матриц.

В первую очередь к ним относятся количество элементов-пикселей по строкам и столбцам (они могут различаться) и размеры пикселей (они также могут различаться вдоль строк и вдоль столбцов). Связанный с этими параметрами размер фоточувствительной области используется для определения очень важного для астрономических задач параметра – углового поля зрения телескопа, которое зависит не только от линейных размеров фотоприемника, но и от фокусного расстояния телескопа.

Качество ПЗС как фотоприемника.

Основной характеристикой ПЗС, которую указывают в первую очередь, является квантовая эффективность (QE – quantum efficiency) – соотношение «пойманных» прибором квантов к общему количеству падающих на его поверхность. Чем ближе этот параметр к 100 %, тем качественнее прибор. Здесь есть одна тонкость – чувствительность ПЗС зависит от длины волны падающего излучения, и параметр QE указывается для максимального значения чувствительности. Поэтому более важной характеристикой является спектральная чувствительность ПЗС – то же самое соотношение для каждой длины волны. Обычно она приводится либо в виде таблицы, либо в виде графика (рис. 10.3). Чувствительность ПЗС определяется свойствами самого полупроводника, размером и свойствами электродов (в случае ПЗС с прямой засветкой), отражательными характеристиками поверхности ПЗС и др.

Важной качественной характеристикой ПЗС является емкость пикселей (full well capacity) – максимальное количество зарядов, удерживаемых в каждом пикселе, а также связанный с этим параметр – динамический диапазон ПЗС. Эта характеристика определяется и материалом полупроводника, и размером пикселей, и другими параметрами.

Существенную роль при работе с ПЗС играет скорость считывания информации и связанные с этим параметром характеристики. Наиболее важной является эффективность переноса заряда (СТЕ – charge transfer efficiency) – доля переносимого на каждом шаге из пикселя в пиксель заряда, что характеризует потери

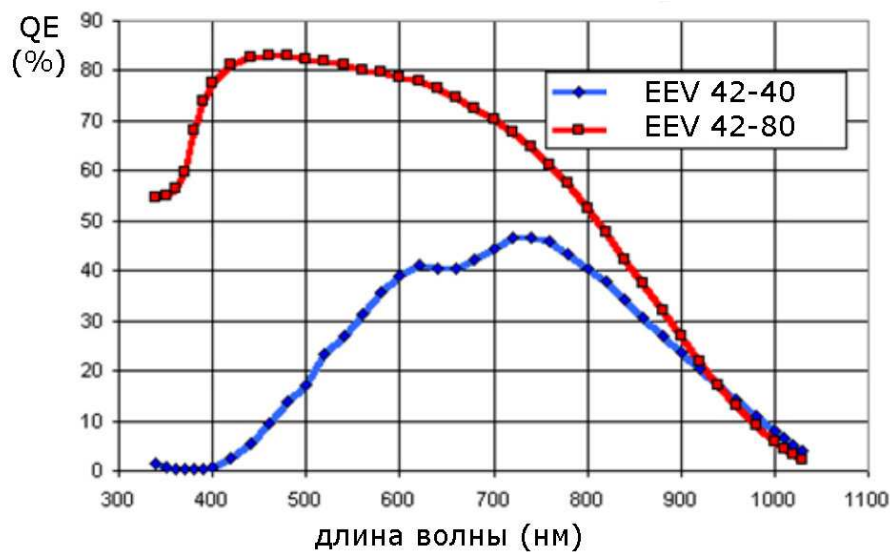


Рис. 10.3: Пример графиков спектральной чувствительности ПЗС с прямой и обратной засветкой

заряда на каждом шаге переноса. Для астрономических наблюдений это важно, поскольку при низкой эффективности искажается изображение, у звезд появляются «хвосты» в направлениях переноса зарядов.

10.3 Наблюдения и первичная обработка снимков

10.3.1 Инструменты

Важнейшей положительной особенностью ПЗС является возможность мгновенного получения изображения наблюдаемых объектов в виде, пригодном для дальнейшей компьютерной обработки. Сейчас уже трудно представить весь длительный и трудоемкий процесс съемки небесных объектов на фотопластинки, проявление и сушку пластинок, измерение координат объектов на специальных измерительных машинах, вычислительную обработку полученных результатов наблюдений.

Современный инструмент для астрометрических наблюдений является единым комплексом, состоящим из телескопа (как правило, автоматизированного), ПЗС-камеры и компьютера. ПЗС-камера представляет собой компактный прибор, состоящий из

Таблица 10.1: Угловые размеры поля зрения и угловые размеры пикселей различных вариантов ПЗС-телескопов. F – фокус телескопа, м; S – масштаб, "/мкм

ПЗС	КАF 1603	КАF 1001	КАF 09000	КАF 16803
Размер в пкс	1536 × 1024	1024 × 1024	3056 × 3056	4096 × 4096
Размер пкс	9 × 9	24 × 24	12 × 12	9 × 9
Поле, мкм	13.82 × 9.22	24.58 × 24.58	36.67 × 36.67	36.86 × 36.86
$F = 0.5$	95.0' × 63.3'	169' × 169'	252' × 252'	253' × 253'
$S = 0.4125$	3.713 "/pxl	9.900 "/pxl	4.950 "/pxl	3.713 "/pxl
$F = 1.0$	47.5' × 31.7'	84.5' × 84.5'	126' × 126'	127' × 127'
$S = 0.206265$	1.856 "/pxl	4.950 "/pxl	2.475 "/pxl	1.856 "/pxl
$F = 1.5$	31.7' × 21.1'	56.3' × 56.3'	84.0' × 84.0'	84.5' × 84.5'
$S = 0.13751$	1.238 "/pxl	3.300 "/pxl	1.650 "/pxl	1.238 "/pxl
$F = 2.0$	23.8' × 15.8'	42.2' × 42.2'	63.0' × 63.0'	63.5' × 63.5'
$S = 0.10313$	0.928 "/pxl	2.475 "/pxl	1.238 "/pxl	0.928 "/pxl
$F = 3.0$	15.8' × 10.6'	28.2' × 28.2'	42.0' × 42.0'	42.2' × 42.2'
$S = 0.068755$	0.619 "/pxl	1.650 "/pxl	0.825 "/pxl	0.619 "/pxl
$F = 5.0$	9.50' × 6.33'	16.9' × 16.9'	25.2' × 25.2'	25.3' × 25.3'
$S = 0.04125$	0.371 "/pxl	0.990 "/pxl	0.495 "/pxl	0.371 "/pxl
$F = 10.0$	4.75' × 3.17'	8.45' × 8.45'	12.6' × 12.6'	12.7' × 12.7'
$S = 0.020626$	0.186 "/pxl	0.495 "/pxl	0.247 "/pxl	0.186 "/pxl

ПЗС-матрицы, управляющей электроники, затвора, системы охлаждения и прочих необходимых компонент.

Телескоп для решения определенных астрометрических задач должен соответствовать этим задачам (или, наоборот, задачи выбираются с учетом возможностей данного телескопа и ПЗС). Параметры телескопов (диаметр объектива, фокусное расстояние) и ПЗС (размер пикселей, размер ПЗС) определяют разрешающую способность ПЗС-инструментов, проникающую способность (предельную звездную величину за время экспозиции), потенциальную точность определения координат объектов, угловое поле

зрения телескопа.

Примеры того, какими возможностями обладают наиболее распространенные современные ПЗС в сочетании с различными вариантами телескопов, приведены в табл. 10.1. Угловой размер поля зрения определяется фокусным расстоянием телескопа и линейными размерами ПЗС, разрешающая способность определяется угловыми размерами пикселя. Точность определения координат звезд по ПЗС-снимкам составляет примерно 0.01 – 0.02 пикселя, т.е. также определяется угловыми размерами пикселя. В таблице показаны угловые размеры поля зрения и угловые размеры пикселей различных вариантов ПЗС-телескопов. Из неё видно, что увеличение фокусного расстояния телескопа в N раз приводит к улучшению в N раз разрешающей способности и точности определения координат объектов, но в N^2 раз уменьшает поле зрения инструмента и, следовательно, его производительность.

Большинство работ студентов-астрономов СПбГУ в Пулковской обсерватории производилось на двойном короткофокусном астрографе (АКД). Этот инструмент был сконструирован и изготовлен в 50-е годы для фотографических наблюдений первых искусственных спутников Земли и представляет собой два идентичных четырехлинзовых рефрактора с диаметрами 100 мм и фокусными расстояниями 710 мм на общей монтировке. Телескопы обеспечивают высокое качество изображений для очень большого поля – примерно 6 x 6 градусов.

В 1992 году на одном из этих телескопов была установлена отечественная ПЗС-камера, изготовленная в Институте космических исследований РАН с использованием ПЗС-матрицы ISD015A, созданной в ленинградском НПО "Электрон". Камера была рабочим экземпляром космического проекта "Регата-Астро" (ИКИ РАН и ГАО РАН), в 1990 году она использовалась на Кисловодской горной станции ГАО РАН для экспериментальных наблюдений звезд и тел Солнечной системы (включая Солнце). В 1992 году в связи с прекращением работ по проекту "Регата-Астро" камера была передана в Пулковскую обсерваторию для отработки методик астрометрических и фотометрических исследований с ПЗС. Размер матрицы в пикселях – 520 x 580, размер пикселя



Рис. 10.4: Двойной короткофокусный астрограф (АКД) с дополнительным телескопом для наблюдений ИСЗ.

– 18 x 24 мкм. Поле зрения АКД с этой матрицей составляло 45 x 67 угловых минут, что позволяло производить дифференциальные наблюдения как астрометрические, так и фотометрические, строго привязывая их к высокоточным опорным звездам в той же площадке, выполнять различные исследования с этим инструментом.

В 1997 году Астрономическим институтом СПбГУ была закуплена новая ПЗС-камера ST-8 производства американской фирмы Santa Barbara Instrument Group (SBIG) с ПЗС матрицей KAF1600 фирмы Kodak. Это позволило существенно улучшить качество наблюдений и расширить возможности инструмента. Матрица размером 1020 x 1530 пикселей с размером пикселя 9 x 9 мкм обеспечивает примерно такое же поле зрения (44 x 66 угловых

минут), как и предыдущая камера, но с разрешением в 2-2.5 раза лучше (2.6"/пиксель), что важно при наблюдениях с короткофокусными телескопами. Для этого инструмента (телескоп + ПЗС) полная ширина функции рассеяния точки на половине максимума (FWHM) равна 1.5 пикселя в фильтрах В, V и 2.5 пикселя для фильтра R. Значительно лучшее качество матрицы, а также наличие механического затвора позволяет получать качественные снимки даже с короткими экспозициями. Встроенная турель с фотометрическими фильтрами обеспечивает возможность полноценных фотометрических исследований. Наличие на инструменте объективной призмы позволяет получать снимки спектров достаточно ярких звезд.

10.3.2 Особенности работы с ПЗС-изображениями

Оцифровка изображений.

Преобразование зарядовых пакетов в каждом пикселе в некоторое число, пропорциональное значению этого зарядового пакета, производится, как уже было сказано, с помощью аналого-цифрового преобразователя (ADC). Не вдаваясь в технические детали этого процесса, рассмотрим те аспекты, которые имеют значение для дальнейшей астрометрической и фотометрической обработки. Важно отметить линейность этого преобразования, равно как и линейность процесса накопления зарядов. Выходное напряжение, пропорциональное значению зарядовых пакетов и преобразуемое в числовой код, может быть изменено за счет использования разных коэффициентов усиления выходного узла.

Для большинства задач оптимальным является вариант, когда максимально возможному числу (определяемому разрядностью процессора) соответствует максимально возможная величина зарядового пакета (full well capacity). Например, максимальное число для 16-разрядного процессора (наиболее часто используемого в современных астрономических ПЗС) – 65535. Если максимальное значение зарядового пакета — 150 000 e, то каждой единице аналого-цифрового преобразователя (ADU – analog-digital unit) соответствует значение $150000 / 65535 = 2.29 \text{ e/ADU}$

Надо иметь в виду, что вблизи насыщения пикселей начинает

все же проявляться нелинейность прибора, которую необходимо исследовать и учитывать для обеспечения высокой точности измерений.

Коэффициенты усиления должны быть согласованы с шумами ПЗС, в частности, с шумом считывания, который появляется в процессе оцифровки сигнала (зарядового пакета). Обычно значение шума указывается в виде числа электронов, искажающих сигнал в процессе считывания. В хороших ПЗС оно составляет 5 - 10 e .

Отношение максимального значения зарядового пакета M к шуму считывания N характеризует динамический диапазон ПЗС, возможность одновременного наблюдения ярких и слабых объектов. В астрономии принято измерять динамический диапазон в звездных величинах. Изменение блеска в 100 раз соответствует 5 звездным величинам, а диапазон $M/N = 100000 e/10 e = 10\ 000$ соответствует 10 звездным величинам.

FITS-формат записи изображений.

После оцифровки снимка последовательность чисел, соответствующих сигналам в пикселях, записывается в память компьютера или на носитель информации в определенном формате. Соглашение о формате записи данных Flexible Image Transport System было принято Международным астрономическим союзом для облегчения процедур обмена данными и использования различных данных, полученных на разных инструментах в разных областях астрономии. Разработка этого формата была начата в 1979 году, а в 1982 на Генеральной ассамблее МАС были приняты основные соглашения по нему.

FITS-формат предполагает определенные правила записи данных, которым обязательно должно предшествовать их описание (так называемый заголовок FITS-файла) с использованием специально разработанного языка. Изначально формат данных был ориентирован на записи на магнитных лентах, отсюда несколько специфических требований, в частности, заголовок должен содержать целое число записей длиной 2880 байт (36 строк по 80 байт), после чего идут записи данных.

Заголовок FITS-файла представляет собой одну или несколько

записей длиной 36 строк в ASCII коде. Каждая 80-байтная строка содержит ключевое слово (8 байт, включая пробелы), знак равенства в 9-й позиции, пробел в 10-й, далее – значение ключевого слова и комментарий, отделенный от ключевого слова слешем (/). Набор ключевых слов, равно как и форматов данных, постоянно дополняется и расширяется. Минимальный набор информации для описания FITS-формата ПЗС-снимков содержит 6 параметров (строк, ключевых слов):

```
SIMPLE = T/ - означает, что данные записаны в FITS-формате.
BITPIX = 16/ - число битов в каждом значении данных
NAXIS = 2/ - размерность массива (изображения)
NAXIS1 = 3072/ - количество пикселей в столбце данных (снимка)
NAXIS2 = 2048/ - количество пикселей в строке данных (снимка)
END означает конец информативных строк FITS-заголовка
(но не конец записи длиной 36 строк, недостающие строки
заполняются пробелами).
```

До строки END вставляется произвольное число строк (в том числе строки с комментариями COMMENT), содержащие дополнительную информацию о данных, например, название обсерватории, инструмента, ПЗС-камеры, параметры телескопа и камеры, дату и время наблюдения, координаты обсерватории, имя наблюдателя, условия наблюдения.

Пример такого FITS-заголовка приведен ниже:

```
SIMPLE = T /
BITPIX = 16 /
NAXIS = 2 /
NAXIS1 = 1530 /
NAXIS2 = 1020 /
OBJECT = 'Persei ' /
TELESCOP= 'AKD'
INSTRUME= 'SBIG ST-8'
OBSERVER= 'I.S. Guseva'
DATE-OBS= '2004-04-03T21:16:51.000' / GMT START OF EXPOSURE
BZERO = +3.2768000000000E+004 /
BSCALE = +1.0000000000000E+000 /
EXPTIME = +1.2000000000000E+002 / EXPOSURE IN SECONDS
```

```

CCD-TEMP= -5.230000000000E+000 / CCD TEMP IN DEGREES C
XPIXSZ  = +9.000000000000E+000 / PIXEL WIDTH IN MICRONS
YPIXSZ  = +9.000000000000E+000 / PIXEL HEIGHT IN MICRONS
XBINNING=                1 / HORIZONTAL BINNING FACTOR
YBINNING=                1 / VERTICAL BINNING FACTOR
EGAIN   = +2.300000000000E+000 / ELECTRONS PER ADU
FOCALLEN= +7.110000000000E+002 / FOCAL LENGTH IN MM
APTDIA  = +1.100000000000E+002 / APERTURE DIAMETER MM
CBLACK  =                159 / BLACK ADU FOR DISPLAY
CWHITE  =                493 / WHITE ADU FOR DISPLAY
PEDESTAL=                -100 / ADD TO ADU FOR 0-BASE
DATAMAX =                65535 / SATURATION LEVEL
SBSTDVER= 'SBFITSEXT Version 1.0' / SBIG FITS EXTENSIONS VER
FILTER  = 'V              ' / OPTICAL FILTER NAME
END

```

Темновой ток, плоское поле.

При работе с ПЗС-снимками обязательно надо учитывать особенности прибора как средства регистрации изображений. Важнейшими из них являются так называемый темновой ток и неоднородность чувствительности пикселей по полю.

Темновой ток (он же тепловой шум ПЗС) – это зарядовые пакеты, создаваемые в каждом пикселе даже при отсутствии засветки за счет тепловых колебаний решетки кристалла полупроводника. Чем выше температура, тем больше пар электрон–дыра образуется в теле кристалла за единицу времени, и при наличии напряжения на одной из фаз они скапливаются в зарядовые пакеты. Очевидно, чем длиннее экспозиция, тем больше тепловой шум ПЗС. У каждого пикселя собственные значения теплового шума, зависящие от локальной структуры кристалла.

Для того чтобы отделить тепловой шум от фотоэффекта в процессе экспонирования, делаются снимки с полностью закрытым объективом (отсюда термин — темновой ток). Желательно, чтобы экспозиция снимков темнового тока была такой же, как и экспозиция объектов исследования. В этом случае нет необходимости выполнения довольно сложных процедур учета смещения

(bias) и пересчета темнового тока на другое время экспозиции. Смещение – это некоторая искусственная «добавка» в зарядовый пакет для улучшения рабочих характеристик ПЗС. Она не зависит от экспозиции и определяется либо по снимкам темнового тока с минимально возможной экспозицией, либо по нескольким снимкам с разными экспозициями. Любой снимок с закрытым объективом — это сумма темнового тока и смещения. Если объект снимается с той же экспозицией, нет необходимости отдельно определять оба фактора, сумма (темновой ток + смещение) просто вычитается из снимка объекта.

Важным фактором, влияющим на качество ПЗС-изображений, является неоднородность чувствительности ПЗС по полю, разная квантовая эффективность у разных пикселей. Это, опять же, зависит от локальной структуры полупроводника и качества поверхности, на которую падает засветка. Помимо собственно неоднородности ПЗС на качество изображений влияют особенности оптических систем, формирующих изображение. Влияет и оптика телескопа, и дефекты фильтров и покровных стекол матриц, грязь или пылинки на них. Поэтому необходимо измерить суммарный эффект этих факторов и учесть его при «очистке» снимков. Для этого делаются снимки «плоского поля», то есть некоторого объекта с заведомо равномерной яркостью по полю. При равномерной засветке каждого пикселя реакция (вследствие вышеперечисленных факторов) будет разной, что позволит определить коэффициенты чувствительности для каждого пикселя в отдельности. В качестве плоского поля используется либо равномерно освещенный экран, либо сумеречное небо. Последнее предпочтительнее, поскольку по спектральным характеристикам ближе к условиям наблюдений, чем любой искусственный экран, а «плоское поле» существенно зависит от длины волны падающего излучения.

Дефекты ПЗС-изображений.

Самыми очевидными дефектами ПЗС-матриц являются так называемые косметические – плохие пиксели, столбцы, кластеры (группы пикселей). В зависимости от того, в какую сторону сигналы в пикселях (столбцах, кластерах) отличаются от средних по

матрице значений, их подразделяют на черные (или холодные), белые (горячие) и серые (теплые). По количеству дефектов определяют качество ПЗС, их сорт (grade). Значительное количество таких дефектов не только визуально портит картинку, но и влияет на точность астрометрии и фотометрии наблюдаемых объектов в случае попадания изображения объекта на плохие пиксели.

Как уже говорилось выше, для получения неискаженных изображений важную роль играет эффективность переноса заряда (СТЕ). При низкой эффективности объекты имеют «хвосты» в направлении переноса заряда, что приводит в итоге к ошибкам астрометрической редукации. Современные ПЗС практически свободны от видимого проявления этого эффекта (более очевидно он сказывается при работе с малыми экспозициями), но при астрометрической обработке наблюдений его надо исследовать и учитывать.

Важную роль для качества ПЗС-снимков играют космические частицы, создающие фантомные изображения, часто неотличимые от изображений реальных объектов или искажающие их в случае наложения. Наиболее ярко это подтверждают снимки темнового тока, с закрытым объективом, на которых не должно быть никаких изображений. Эффект воздействия космических частиц зависит от их энергии (величина сигнала), длины волны, направления «удара». Важное следствие этого обстоятельства - необходимо делать несколько снимков и темнового тока, и плоского поля, поскольку каждый снимок в отдельности подвержен и шумам считывания, и влиянию космических частиц. Использование специальных процедур осреднения, исключаящих влияние космических частиц и минимизирующих шумы ПЗС, позволяет получить средние матрицы темнового тока и коэффициентов чувствительности каждого пикселя для более качественной очистки снимков.

10.3.3 Методика наблюдений

В настоящее время двойной короткофокусный астрограф полностью автоматизирован и может работать по заранее составленной программе, обеспечивающей последовательное наведение теле-

скопа в заданную область неба и выполнение серий снимков.

И в автоматическом, и в ручном режиме должны быть выполнены следующие операции:

- Заблаговременно, не менее чем за полчаса до начала съемки, должна быть включена ПЗС-камера и включено охлаждение камеры до требуемой температуры. Температура камеры должна стабилизироваться до начала наблюдений.
- Обязательно должны быть выполнены калибровочные снимки темнового тока и плоского поля (сумеречного неба вечером либо утром). Снимки темнового тока необходимо выполнять с той же экспозицией, что и рабочие снимки наблюдаемых объектов. Теоретически возможен перерасчет темнового тока для любой экспозиции, если есть снимки с разными экспозициями, но это крайне нежелательная и неточная процедура. Для снимков сумеречного неба надо привести инструмент в область неба, вечером противоположную закату Солнца, а утром в противоположную восходу Солнца, выбрать участок с минимальным градиентом яркости неба и минимальным количеством ярких звезд, попадающих в кадр. Сумеречное небо надо снимать с остановленным механизмом часового ведения, иначе невозможно будет исключить влияние изображений звезд.

В ручном режиме дальнейшая последовательность действий наблюдателя такова:

- Найти координаты объекта наблюдений (по каталогам, эфемеридам, базам данных и т.п.).
- Навести телескоп в заданную область неба, используя установочные круги инструмента.
- Выбрать (подобрать экспериментальным путем) необходимую экспозицию. Экспозиция должна быть такова, чтобы объект исследования был снят с хорошим отношением сигнала к шуму, чем больше, тем лучше, но без передержки. Одновременно надо позаботиться о том, чтобы в поле зрения было достаточное количество опорных звезд, пригодных для астрометрической редукции снимков.

- Выполнить серию снимков (не меньше трех) наблюдаемого объекта для исключения возможных попаданий космических лучей, для уверенного определения координат и блеска объекта, оценки точности наблюдений.

10.3.4 Предварительная обработка снимков

Обработка изображений звезд и других объектов на снимке (рис. 10.5) начинается с предварительной очистки снимков – исключения темнового тока и выравнивания поля с использованием коэффициентов чувствительности пикселей.

Измеренный сигнал v_{ij} в каждом пикселе матрицы (i, j) можно представить в виде

$$v_{ij} = d_{ij} + k_{ij} \cdot (u_{ij} + f_{ij}) + s_{ij}, \quad (10.1)$$

где d_{ij} – темновой ток в пикселе (i, j) ,

k_{ij} – коэффициент чувствительности пикселя,

u_{ij} – сигнал от объекта наблюдения,

f_{ij} – сигнал от фона неба,

s_{ij} – суммарный шум.

На первом этапе необходимо выделить истинный суммарный сигнал объекта и фона неба $(u_{ij} + f_{ij})$. Для каждого пикселя d_{ij} определяется из снимков темнового тока, k_{ij} из снимков "плоского поля". Шум носит случайный характер (но не с гауссовым распределением!). При необходимости выполняется дополнительно математическая фильтрация изображений. Существует множество методов фильтрации для разных случаев, которые позволяют улучшить вид изображения. Надо только не забывать, что практически любая фильтрация искажает сигнал в изображении и может существенно повлиять на измеряемые координаты и фотометрические величины объектов наблюдений.

После предварительной обработки на снимках (рис. 10.6) остаются изображения различных объектов, попавших в поле зрения инструмента, наложенные на фон неба. Фон неба может быть неравномерным, он меняется в зависимости от зенитного расстояния наблюдаемой области неба, от наличия и близости Луны и других ярких объектов. Кроме того, изображения отягощены

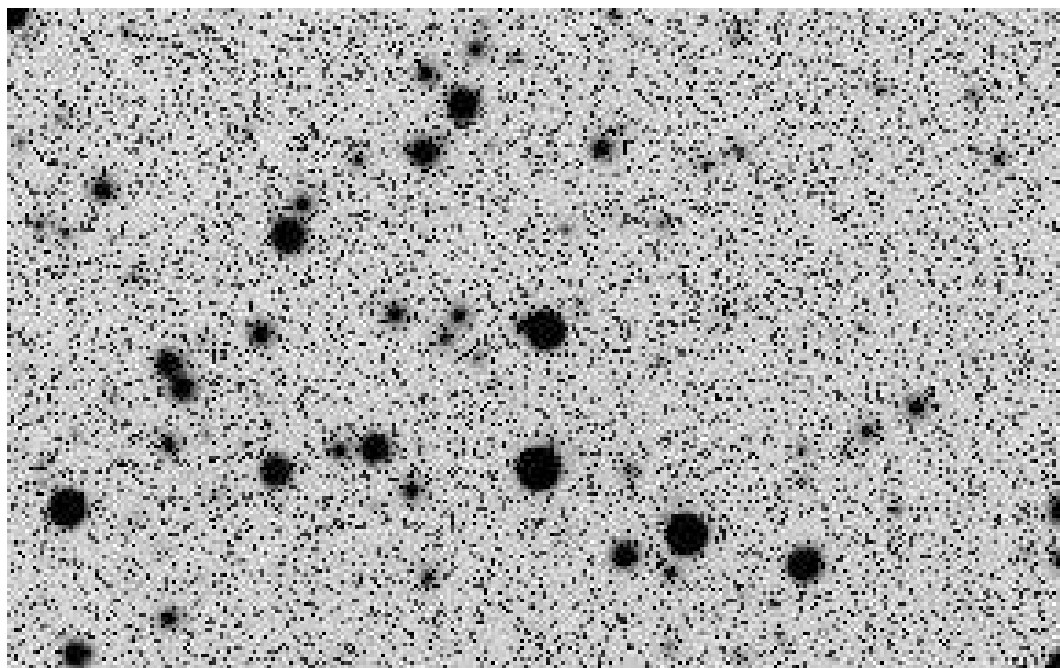


Рис. 10.5: Фрагмент исходного ПЗС-изображения

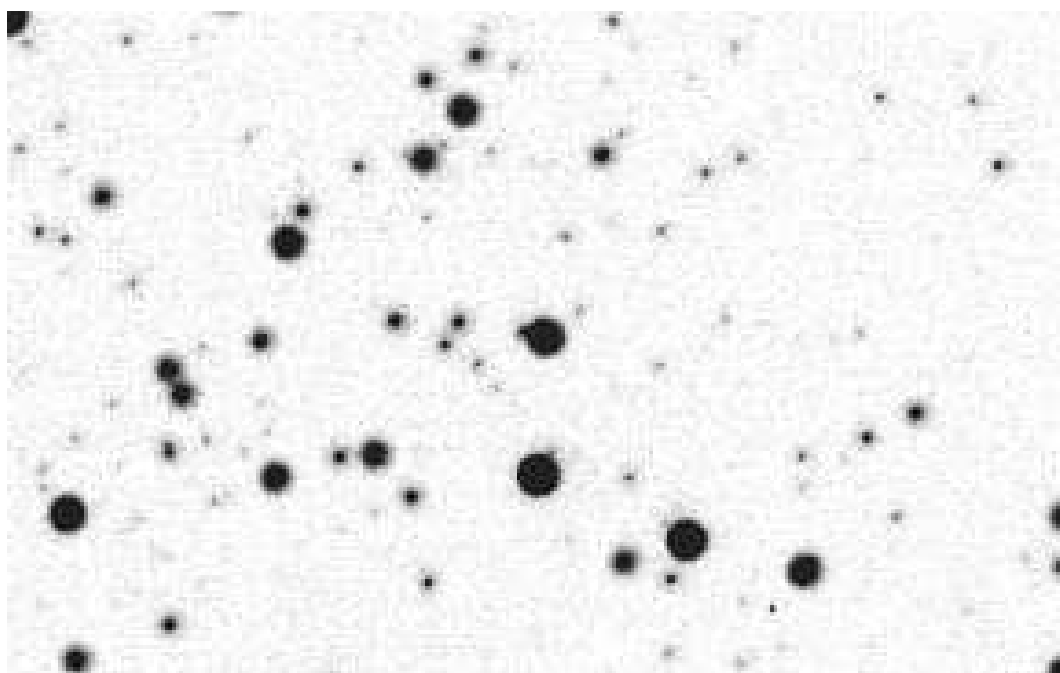


Рис. 10.6: Фрагмент ПЗС-изображения после учета темнового тока и плоского поля

шумами считывания, квантования, наличием фоновых объектов, которые не видны как, например, отдельные звезды, но вносят

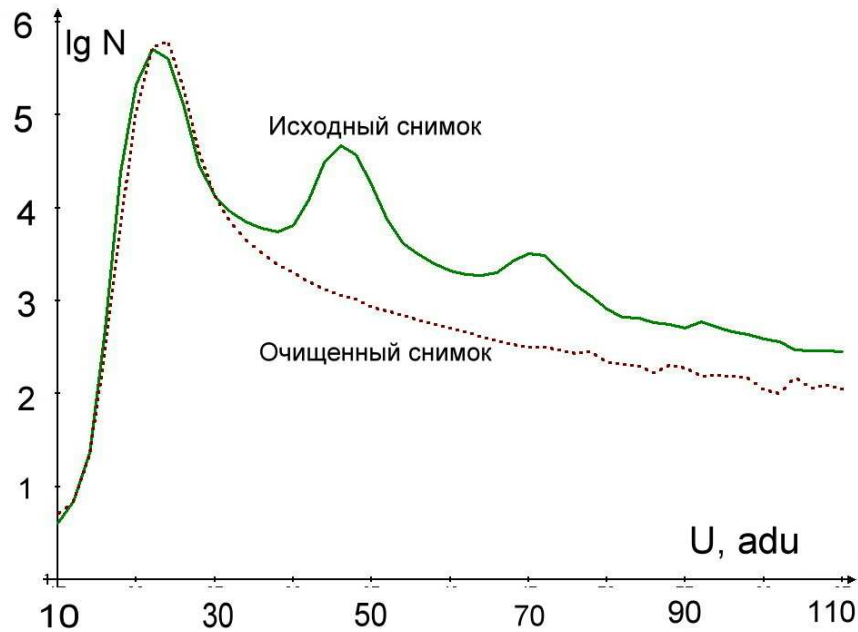


Рис. 10.7: Гистограмма распределения значений сигналов по пикселям

дополнительный неравномерно распределенный по матрице поток излучения.

Тем не менее, перед началом выделения объектов на снимке имеет смысл оценить средний уровень фона и суммарный шум изображения. Для большинства астрономических снимков это можно сделать, построив гистограмму распределения величин сигналов в пикселях (рис. 10.7): максимум гистограммы хорошо соответствует наиболее вероятному значению фона неба, а по ширине гистограммы вблизи максимума можно оценить суммарный шум изображения. Обычно принято работать с изображениями, максимальный сигнал которых в три раза превышает суммарный шум изображения.

10.3.5 *Определение прямоугольных координат и блеска объектов на матрице*

Выделение изображений объектов на снимке выполняется с учетом функции рассеяния точки (Point Spread Function, PSF) – двумерного распределения величины сигнала в изображении

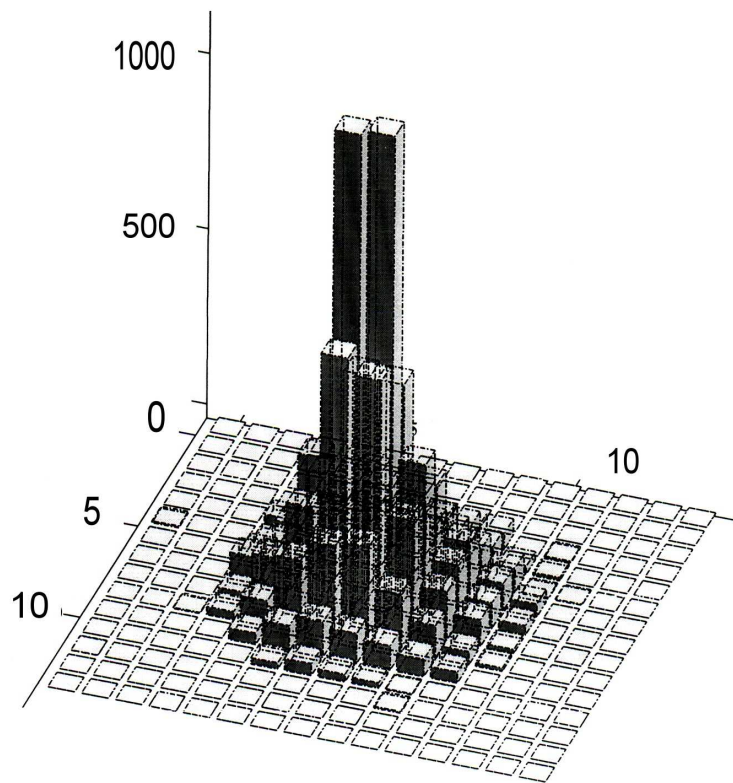


Рис. 10.8: Функция рассеяния точки

точечного объекта (рис. 10.8). PSF определяется в первую очередь оптической системой и параметрами телескопа, но на нее влияют также точность фокусировки и юстировки, точность гидирования во время съемки, наличие дополнительных оптических деталей по ходу лучей до приемника (фильтры, покровное стекло матрицы и т.д.), атмосферные условия наблюдений. В грубом приближении PSF описывается гауссианой, реальная картина может сильно отличаться. Основным параметром, характеризующим PSF, является полная ширина на половине максимума (Full Width at Half Maximum - FWHM). Этот параметр характеризует пятно рассеяния, размер изображения точечного объекта на матрице. Следует отметить, что размер пятна рассеяния не зависит от яркости объекта, хотя при визуализации ПЗС-снимка размеры изображений звезд кажутся разными.

В зависимости от PSF выбирается некоторая окрестность вокруг пикселя, соответствующего центру изображения звезды или

иногo объекта, вокруг точки локального максимума. Фон неба в окрестности объекта определяется по значениям сигналов на периферии этой вырезанной области, после чего значение фона вычитается из всех сигналов, формирующих изображение. Отрицательные сигналы обнуляются, тем самым дальнейшие вычисления избавляются от ошибок, связанных с шумами на периферии изображения. Конкретных методов определения локального фона много, они зависят от решаемой задачи. Например, для определения координат спутников больших планет или звезд, спроецированных на изображения галактик, необходимо учитывать кривизну, наклон фона вблизи объекта исследования.

Полученное «вырезанное» изображение используется для определения координат и блеска объектов.

Проще всего определяется звездная величина: суммируются сигналы во всех пикселях, формирующих изображение, и сумма I пересчитывается в звездную величину m по формуле

$$m = -2.5 \lg I + C, \quad (10.2)$$

где C — некоторая константа, общая для всех звезд данного снимка, определение которой производится с использованием звезд этого же снимка с известными звездными величинами. Этот вариант позволяет очень быстро получать достаточно точные измерения звездных величин всех объектов снимка, хотя разработаны и более рафинированные методы решения задачи.

Вычисление прямоугольных координат X , Y объектов снимка является более сложной задачей. Дискретность изображения, определяемая размером пикселя (в астрономии чаще используются пиксели от 9 до 27 мкм), не позволяет сразу определить точку максимума PSF с точностью лучше, чем половина размера пикселя. Этого явно недостаточно для современного уровня астрометрических работ. Поэтому для определения координат используются методы, учитывающие распределение потока квантов от объекта по соседним пикселям. Наиболее простым и часто используемым является метод центроидов, основанный на определении «центра тяжести» изображения. Пусть i - номер столбца пикселя изображения «вырезанного» объекта, j - номер строки, U_{ij} - значение сигнала в пикселе. Координаты центра изображе-

ния X , Y (в пикселях) вычисляются по формулам:

$$X = \frac{\sum_i \sum_j U_{ij} \cdot i}{\sum_i \sum_j U_{ij}}, \quad (10.3)$$

$$Y = \frac{\sum_i \sum_j U_{ij} \cdot j}{\sum_i \sum_j U_{ij}} \quad (10.4)$$

Несколько более точные измерения координат обеспечивают методы аппроксимации изображений аналитическими функциями. Чаще всего PSF представляют распределением Гаусса

$$G(r, a, b) = a \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2 \cdot b^2}\right), \quad (10.5)$$

где r – расстояние от центра изображения, a , b – параметры, определяющие вид функции (рис. 10.9).

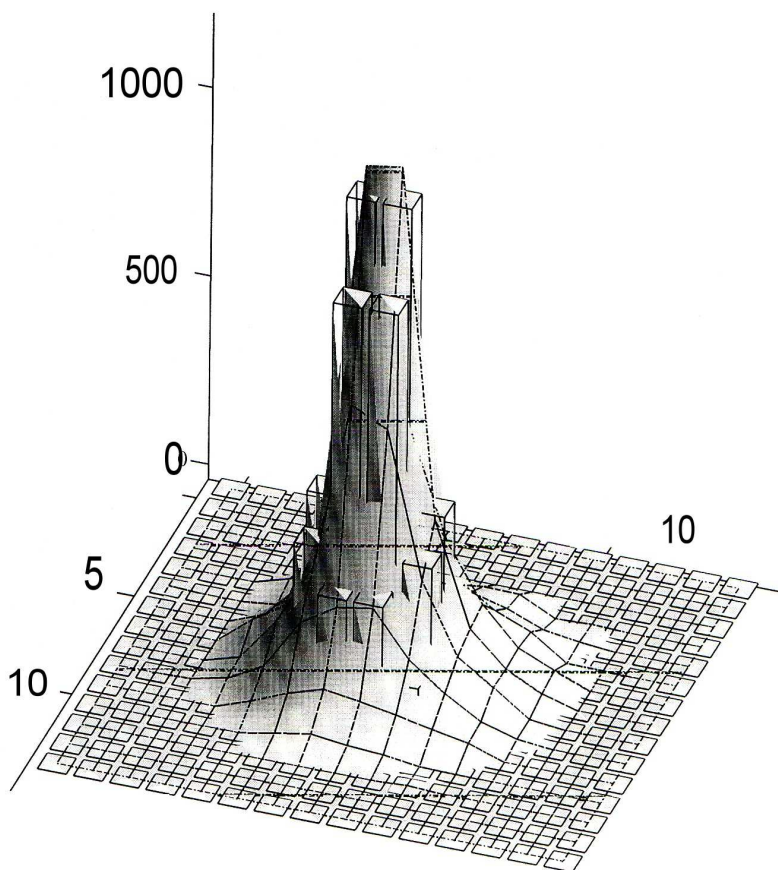


Рис. 10.9: Модель (10.5) функции рассеяния точки (10.8)

Распространены также функция Лоренца (случай $c = 1$ – функция Коши)

$$L(r, a, b, c) = \frac{a}{1 + (r^2/b^2)^c}, \quad (10.6)$$

функция Лапласа

$$P(r, a, b) = a \cdot \exp(-|r|/b) \quad (10.7)$$

и многие другие.

10.4 Астрометрическая редукция ПЗС-наблюдений

10.4.1 Определение экваториальных координат объектов

Дальнейшая работа производится по классической схеме астрометрической редукции снимков, в совершенстве разработанной для фотографической астрометрии [6]. ПЗС дают только некоторые дополнительные возможности, облегчающие решение этой задачи или позволяющие решать ее точнее.

Смысл астрометрической редукции заключается в том, чтобы установить соответствие между экваториальными координатами наблюдаемых звезд и измеренными прямоугольными координатами X , Y этих же звезд на ПЗС-снимке. Для того чтобы получить формулы, преобразующие одни координаты в другие, нужны звезды с известными экваториальными координатами, прямым восхождением α и склонением δ , т.е. нужны глобальные каталоги опорных звезд. Наиболее точный современный каталог Hipparcos не годится для этой цели, поскольку он содержит очень мало звезд в поле зрения практически любого телескопа. Следующий по точности каталог Tycho-2 обеспечивает достаточное количество звезд, если поле зрения телескопа не меньше четверти квадратного градуса. Для меньших полей используются большие каталоги (например, USNO B), содержащие на два порядка больше звезд, но с худшей точностью.

Процесс астрометрической редукции состоит из нескольких этапов.

Выбор опорных звезд

Вначале из каталога опорных звезд выбираются звезды, которые должны присутствовать на снятой площадке неба. Для нашего короткофокусного инструмента необходимой и достаточной является информация из каталога Tycho-2. Необходим именно этот каталог, поскольку точность измерений на АКД с ПЗС сравнима с точностью Tycho-2 и существенно лучше точности других больших каталогов. Достаточен он по той причине, что при большом поле зрения АКД в нем всегда много звезд, содержащихся в каталоге Tycho-2, что обеспечивает надежную астрометрическую редукцию.

Для примера на рис. 10.10 приведен снимок области рассеянных скоплений χ и h Персея, а на рис. 10.11 соответствующий (чуть меньший) фрагмент каталога Tycho-2, визуализированный программой Cartes du Ciel/Sky Chart.

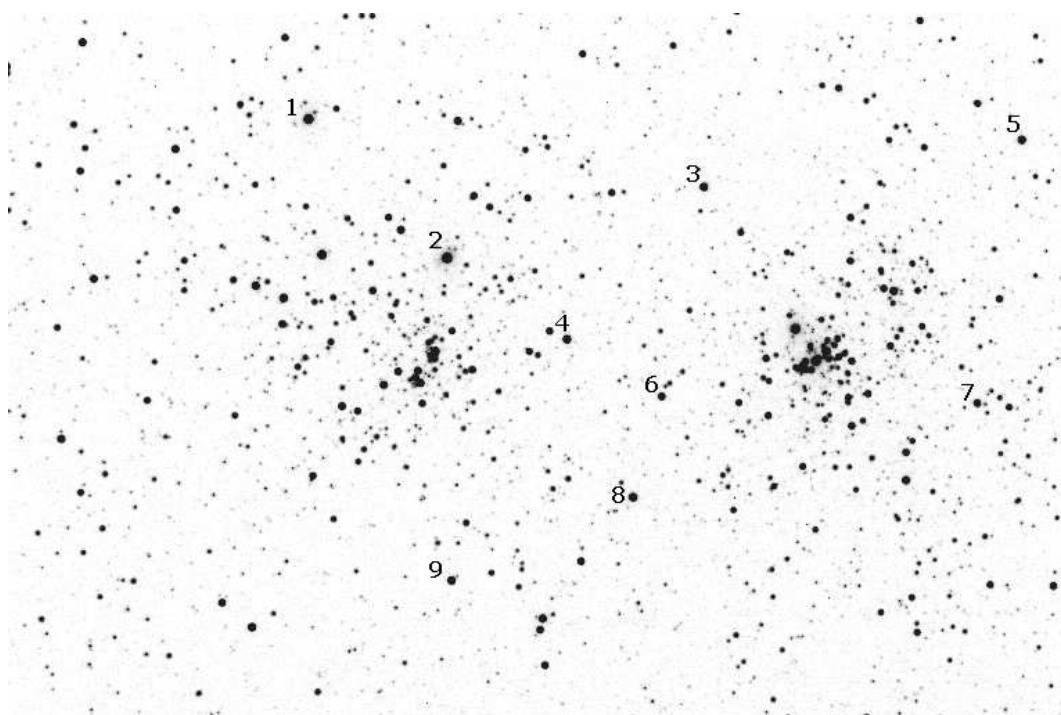


Рис. 10.10: Снимок области рассеянных скоплений χ и h Персея

Вычисление "идеальных координат" опорных звезд

Экваториальные координаты опорных звезд пересчитываются на эпоху наблюдений с учетом собственных движений звезд. Для этих звезд вычисляются их "идеальные" прямоугольные ко-

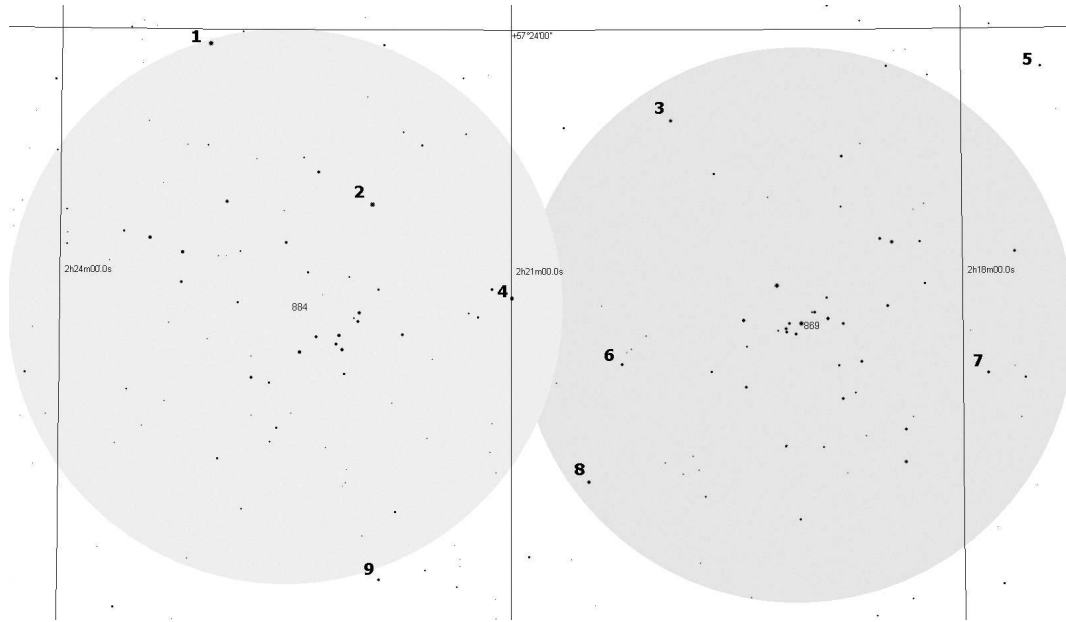


Рис. 10.11: Область рассеянных скоплений χ и h Персея по данным каталога Tycho-2

ординаты ξ и η в проекции на фокальную плоскость телескопа по следующим формулам, в которых α_0 , δ_0 — предварительные (установочные) координаты центра снимка (центрального пикселя X_c, Y_c):

$$\xi = \frac{\cos \delta \cdot \sin (\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)}, \quad (10.8)$$

$$\eta = \frac{\sin \delta \cdot \cos \delta_0 - \cos \delta \cdot \sin \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)}. \quad (10.9)$$

Поскольку истинные координаты центра снимка известны лишь приблизительно (точность наведения телескопа по координатам в заданную область неба недостаточна), необходимо вначале уточнить координаты α_0 , δ_0 центра снимка.

Определение параметров редуccionной модели

С помощью "идеальных" координат ξ , η и измеренных на матрице X, Y производится отождествление звезд опорного каталога с объектами снимка. Далее эти отождествленные звезды применяются для определения параметров редуccionной модели. Наиболее часто используется классический метод шести постоянных,

т.е. соотношения

$$\xi_i = A + B \cdot X_i + C \cdot Y_i, \quad (10.10)$$

$$\eta_i = D + E \cdot X_i + F \cdot Y_i, \quad (10.11)$$

где неизвестными параметрами являются A, B, C, D, E, F , индекс i означает номер отождествленной опорной звезды. Избыточная система уравнений (при количестве опорных звезд больше 3) решается, как правило, методом наименьших квадратов. Чем больше опорных звезд с высокоточными координатами, тем надежнее определяются постоянные снимка A, B, C, D, E, F .

Для уточнения экваториальных координат центра снимка α_c, δ_c по формулам (10.10), (10.11) с полученными A, B, C, D, E, F вычисляем ξ_c, η_c , подставив в эти формулы вместо X_i, Y_i координаты X_c, Y_c центра (центрального пикселя) снимка.

Уточненные экваториальные координаты центра снимка вычисляются по формулам:

$$\operatorname{tg}(\alpha_c - \alpha_0) = \frac{\xi_c \cdot \sec \delta_0}{1 - \eta_c \cdot \operatorname{tg} \delta_0}, \quad (10.12)$$

$$\operatorname{tg} \delta_c \cdot \sec(\alpha_c - \alpha_0) = \frac{\eta_c + \operatorname{tg} \delta_0}{1 - \xi_c \cdot \operatorname{tg} \delta_0}. \quad (10.13)$$

Полученные α_c, δ_c подставляются в формулы (10.8), (10.9) вместо α_0, δ_0 , после чего заново вычисляются ξ, η для опорных звезд и вновь определяются параметры редуцированной модели A, B, C, D, E, F .

Модель шести постоянных учитывает только геометрические параметры ПЗС-снимка (ориентацию, сдвиг, масштаб, неортогональность осей) при редукации к идеальной тангенциальной плоскости. Для учета искажений оптики часто применяют более сложные, нелинейные модели, содержащие 8, 12 и более постоянных. В случае ПЗС такие модели предпочтительнее заменить эмпирическими (полученными из калибровочных исследований) картами обобщенной дисторсии, объединяющей как возможные оптические искажения (абберации, несоответствие оптической оси телескопа центру снимка, наклон ПЗС к оптической оси и т.п.), так и возможные геометрические искажения ПЗС. Основанием

для такого подхода является фактор стабильности, жесткой фиксации системы ПЗС+телескоп, параметры которой не меняются от снимка к снимку в течение длительного времени (в отличие от астрофотографии, где каждый снимок требует подхода "с нуля" и определения всех параметров редукции заново).

Вычисление координат определяемых звезд

Уточнив постоянные A, B, C, D, E, F редукционной модели, по формулам (10.10) и (10.11), находят тангенциальные координаты ξ и η для всех определяемых объектов по их измеренным X, Y . После этого их искомые экваториальные координаты вычисляются по формулам:

$$\operatorname{tg}(\alpha - \alpha_c) = \frac{\xi \cdot \sec \delta_c}{1 - \eta \cdot \operatorname{tg} \delta_c}, \quad (10.14)$$

$$\operatorname{tg} \delta \cdot \sec(\alpha - \alpha_c) = \frac{\eta + \operatorname{tg} \delta_c}{1 - \eta \cdot \operatorname{tg} \delta_c}. \quad (10.15)$$

Описанная схема вычислений реализована в виде программ, работу которых проследим на двух типичных задачах.

10.4.2 Астрометрия звезд

Одна из важнейших задач современной наземной астрометрии — распространение фундаментальных координатных систем на слабые объекты, слабые звезды. Эта задача предполагает планомерную съемку избранной области неба, каждая площадка снимается небольшими сериями в разных фильтрах, после чего определяются координаты и блеск всех звезд на снимках.

Такая работа должна выполняться на инструментах с довольно большим полем зрения, не менее 0.5 квадратных градуса, для того, чтобы обеспечить достаточное количество высокоточных опорных звезд из каталога Tycho 2.

Экспозиция снимков выбирается с учетом ослабления фотометрическими фильтрами таким образом, чтобы обеспечить качественные, не передержанные изображения сравнительно ярких (9-11 зв. величины) опорных звезд, и качественные изображения слабых объектов. При наличии очень ярких звезд в поле зрения,

выполняется дополнительно серия снимков с короткими экспозициями, что позволяет существенно увеличить динамический диапазон наблюдаемых звезд. Поскольку одновременно на снимке регистрируется от 1000 до 5000 звезд на квадратный градус, серьезную проблему создает фон космических частиц, регистрируемых матрицей и значительно искажающих изображения звезд в случае попадания их на изображение. Это ведет к большому числу случайных выбросов при измерениях координат и блеска звезд. Поэтому количество снимков в серии должно быть достаточно большим (в любом случае не меньше трех) для того, чтобы иметь возможность проанализировать выбросы и исключить их при выводе средних положений и фотометрических величин.

Для определений координат звезд используются все снимки в полосах V и R , для получения координат очень ярких звезд (перекспонированных в V и R) используются наблюдения в фильтре B . Наблюдения в фильтре I в нашем случае непригодны для астрометрии из-за большой хроматической аберрации, но используются для получения звездных величин в этой полосе. Каждый снимок обрабатывается индивидуально до получения прямых восхождений α , склонений δ и инструментальных звездных величин M_{inst} . Значительное число наблюдений каждой звезды позволяет уверенно определять измеряемые величины, отбраковывать дефекты (выбросы), оценивать реальную индивидуальную ошибку измерений. С другой стороны, это требует значительного времени для наблюдений, причем наблюдений в хорошие ночи. Процедура обработки ПЗС-снимков включает несколько этапов.

Программа REDUCT.

Предварительная обработка снимков, включая редукцию за темновой ток и плоское поле, выполняется программой REDUCT.

Для данной задачи очень важна качественная очистка снимков. Требования высокой точности определения координат и блеска звезд не позволяют использовать стандартные, встроенные в прилагаемый к ПЗС-камере пакет программ процедуры редукции за темновой ток и плоское поле, поскольку это удваивает и без того высокую вероятность ошибок. При примитивном

вычитании единичного снимка темнового тока из обрабатываемого снимка на месте случайных всплесков (шум, космические частицы) образуются «черные дыры», в которые проваливается часть реального изображения. Поскольку звезд много, вероятность таких «провалов» достаточно велика. Особенно вредно, если один снимок темнового тока используется для обработки всех снимков серии. Чтобы избежать таких ошибок, нужны средние (медианные) матрицы темнового тока и матрица - карта дефектных пикселей ПЗС, которая в дальнейшем используется при анализе качества полученных результатов. Создание таких матриц выполняется вспомогательной программой программой DC (dark current). Аналогичная процедура продлевается и с индивидуальными снимками плоского поля (сумеречного неба), на которых основным искажающим фактором являются треки звезд (программа FF - flat field).

Программа ДЕТЕСТ.

Определение матричных координат X , Y и звездных величин M_{inst} .

Программа обработки полученных снимков включает в себя следующие этапы:

- последовательное выделение изображений звезд на матрице;
- определение локального фона матрицы возле изображения звезды;
- анализ формы изображения, исключение заведомо ложных сигналов;
- определение матричных координат X , Y и яркости звезд;
- учет эффектов субпиксельной неоднородности, уравнения блеска, дисторсии и др.;
- запись полученных результатов в отдельный файл.

Пример файла с результатами программы ДЕТЕСТ (X , Y - в пикселях, M - инструментальная с условным 0-пунктом):

NN	X	Y	M
1	363.551	517.963	4.64
2	895.706	666.828	4.62

3	393.302	564.327	4.74
4	1095.687	867.214	5.13
5	1076.186	671.380	5.54
6	627.367	321.169	5.82
7	722.627	549.233	5.90
8	66.206	837.301	6.12
9	912.569	531.807	6.16
10	1131.495	608.909	6.19
11	524.899	769.341	6.33
12	233.310	345.704	6.48
13	251.024	618.942	6.15
14	757.661	145.717	6.59
15	1171.881	626.654	6.49
16	889.167	200.689	6.62
17	382.223	510.952	6.58
18	986.919	483.399	6.62
19	934.122	486.132	6.62
20	1177.118	133.327	6.79
21	962.311	707.304	6.90
22	130.409	457.136	6.87
23	381.760	506.423	7.15
24	1452.475	405.328	7.10
25	585.747	466.636	7.10

.....

Программа ASTRO (астрометрическая редукция).

Для астрометрической редукции измеренных X , Y нужна дополнительная информация, которую имеет смысл сгруппировать в виде файла входных данных (файл DATA).

Исходные данные для астрометрической обработки ПЗС-снимков:

- tycho_f - имя входного файла фрагмента каталога TYCHO-2
- г - имя входного файла результатов снимка X , Y , M
- с - имя выходного файла результатов второй итерации
- а - имя выходного файла результатов снимка RA , DEC , M

- 030917 - дата наблюдений (ГГММДД)
- 21400 - звездное время экспозиции, ЧЧММСС
- 220.5 - прямое восхождение центра снимка, часы, минуты
- 5710 - склонение центра снимка, градусы, минуты
- 560. - эффективная длина волны фильтра в нм
- 5. - температура воздуха в градусах Цельсия
- 1000. - давление воздуха в мбарах, 1000 мбар = 750 мм рт ст

В соответствии с заданной информацией выполняются следующие операции:

- считывание результатов X , Y , M предыдущей программы;
- выборка из каталога Tycho-2 опорных звезд для обработки данного снимка;
- автоматическое отождествление части опорных звезд с использованием приблизительных (с точностью 0.5 градуса) координат центра снимка;
- предварительная астрометрическая редукция снимка методом 6 постоянных, уточнение экваториальных координат центра снимка;
- уточнение предварительных параметров снимка, вторичная обработка с учетом всех эффектов (отбраковка плохих опорных звезд, дифференциальная рефракция, дифференциальная экстинкция и т.д.).

Пример рабочего этапа обработки: корректировка исходных данных по результатам обработки опорных звезд (установочные координаты и фокусное расстояние объектива известны неточно); параметры астрометрической редукции; невязки опорных звезд, мкм:

```

Observation Date 30917      Time 2 14 0      File name r7
Corrected frame center:      RA 2 21.22      DEC 57 8.
Corrected focal length of the telescope -      711319.0 mkm

```

Results of astrometric reduction:

reference stars number - 70

solution sigma X 0.267 mkm
solution sigma Y 0.245 mkm

scale factor by X 1.000114
scale factor by Y 0.999904

optical frame center X 0.0 mkm
optical frame center Y 0.0 mkm

turn angle X -> RA 0.21 grad
addition angle X - Y 72.22"

Residuals of reference stars (mkm):

NN	X	Y	X	Y
4	2976.18	3214.93	-0.06	-0.16
5	2800.67	1452.42	0.14	0.07
8	-6289.15	2945.71	0.30	-0.09
9	1328.12	196.26	-0.14	-0.11
10	3298.45	890.18	0.28	-0.12
15	3661.93	1049.89	0.39	-0.14
26	1036.14	3193.31	0.07	0.15
30	-564.07	-2534.06	0.17	-0.07
31	-5999.62	878.77	0.14	-0.04
33	-4080.78	-773.86	-0.02	0.20
34	-4081.15	69.35	-0.06	-0.09
37	1810.31	-66.34	0.00	0.15
38	-2967.16	102.90	0.04	-0.11
40	-3909.28	3619.77	-0.17	-0.37
43	-32.65	-3423.78	0.14	0.23
44	-3910.14	122.07	-0.27	0.15
45	4704.31	2825.96	-0.31	-0.11

47	1339.03	101.53	-0.42	0.29
56	-5878.46	-2838.15	0.00	0.08
58	1497.50	-481.19	0.16	0.08
61	847.77	-44.91	0.18	0.12
63	-2996.00	-640.11	-0.08	-0.02
71	128.02	2190.09	0.16	0.18
77	-6125.73	-531.17	0.07	-0.03
78	106.30	192.22	0.05	0.25

.....

В результате астрометрической редукиции получаем вычисленные значения экваториальных координат всех звезд (и опорных, и определяемых). Поскольку 6 параметров редукиционной модели вычисляются по большому числу опорных звезд (в данном примере - 70), правомерно рассматривать невязки опорных звезд как поправки к их каталожным координатам.

В приводимой ниже распечатке показан фрагмент результатов обработки, для опорных звезд приведены разности их координат с координатами из каталога Tycho-2:

NN	M	X	Y	RA			Dec			dRA	dDec	dM	
	mag	pixel	pixel	h	m	s	deg	'	"	s	"	mag	
1	4.64	363.55	517.96	2	19	4.450	57	8	8.04	0	-0.002	0.21	-1.98
2	4.62	895.71	666.83	2	21	55.436	57	14	34.65	0			
3	4.74	393.30	564.33	2	19	13.939	57	10	9.33	0	-0.004	0.10	-1.95
4	5.13	1095.69	867.21	2	23	0.422	57	23	13.18	0	-0.002	-0.05	-1.91
5	5.54	1076.19	671.38	2	22	53.503	57	14	42.57	0	0.005	0.02	-1.97
6	5.82	627.37	321.17	2	20	29.004	56	59	35.20	0			
7	5.90	722.63	549.23	2	20	59.651	57	9	29.93	0			
8	6.12	66.21	837.30	2	17	28.058	57	21	56.30	0	0.011	-0.03	-2.02
9	6.16	912.57	531.81	2	22	0.573	57	8	41.92	0	-0.005	-0.03	-1.94
10	6.19	1131.49	608.91	2	23	11.076	57	11	57.96	0	0.010	-0.04	-1.99
11	6.33	524.90	769.34	2	19	56.121	57	19	5.13	0			
12	6.48	233.31	345.70	2	18	23.047	57	0	36.69	0			
13	6.15	251.02	618.94	2	18	28.153	57	12	30.17	0			
14	6.59	757.66	145.72	2	21	10.436	56	51	56.33	0			
15	6.49	1171.88	626.65	2	23	24.117	57	12	43.05	0	0.014	-0.04	-2.03
16	6.62	889.17	200.69	2	21	52.417	56	54	18.04	0			
17	6.58	382.22	510.95	2	19	10.448	57	7	49.91	0			
18	6.62	986.92	483.40	2	22	24.301	57	6	34.08	0			
19	6.62	934.12	486.13	2	22	7.385	57	6	42.30	0			
20	6.79	1177.12	133.33	2	23	23.947	56	51	15.28	0			

21	6.90	962.31	707.30	2	22	16.959	57	16	19.03	0			
22	6.87	130.41	457.14	2	17	49.846	57	5	25.57	0			
23	7.15	381.76	506.42	2	19	10.305	57	7	38.09	0			
24	7.10	1452.47	405.33	2	24	53.066	57	2	54.58	0			
25	7.10	585.75	466.64	2	20	15.715	57	5	55.01	0			
26	6.95	880.13	864.81	2	21	50.807	57	23	11.69	0	0.003	0.04	-2.38
27	7.08	233.36	385.82	2	18	22.979	57	2	21.40	0			
28	7.17	20.55	192.78	2	17	15.573	56	53	52.89	0			
29	7.34	265.43	622.54	2	18	32.775	57	12	39.78	0			
30	7.32	702.33	228.44	2	20	52.881	56	55	32.74	0	0.006	-0.02	-1.92
31	7.36	98.38	607.64	2	17	39.134	57	11	57.67	0	0.005	-0.01	-1.96
32	7.33	378.49	517.24	2	19	9.242	57	8	6.30	0			
33	7.12	311.58	424.02	2	18	47.937	57	4	2.23	0	-0.001	0.06	-2.11
34	7.39	311.54	517.71	2	18	47.769	57	8	6.78	0	-0.002	-0.03	-1.89

В первом столбце таблицы — порядковый номер звезды, во втором — измеренная инструментальная (с произвольным 0-пунктом) звездная величина, в третьем и четвертом — прямоугольные координаты X , Y звезды на матрице, далее — вычисленные экваториальные координаты звезды. Три последних столбца — это разности между измеренными и каталожными значениями прямых восхождений, склонений и звездных величин для звезд, имеющих в каталоге Tycho-2.

Определение средних значений координат и редуцированных фотометрических величин всех звезд (программа ANALYSIS).

Последний этап работы - анализ полученных данных, объединение результатов обработки индивидуальных снимков, вывод средних (каталожных) значений координат, редукция фотометрических величин всех звезд.

Средние звездные величины в данном фильтре и их ошибки получаем объединением результатов соседних перекрывающихся снимков. Одновременно определяются фотометрические поправки к каждому снимку в отдельности по имеющимся звездам с известной фотометрией.

Средние значения координат и их ошибки получаем объединением результатов индивидуальных измерений по соседним перекрывающимся площадкам в двух фильтрах (V , R), дополняя измерениями координат ярких звезд с фильтром B .

Соединяем все результаты в единый файл, содержащий ко-

ординаты (и их ошибки) и фотометрические инструментальные BVRI величины (и их ошибки). Одновременно выполняется сравнение наших измерений со всеми звездами каталога Tycho-2, включая опорные (их координаты также вычисляются с использованием 6 постоянных каждого снимка). Пример сравнения сводных результатов наших измерений с каталогом Tycho-2 – в нижеследующей распечатке. В первом столбце приведены измеренные и осредненные по 6 снимкам значения прямых восхождений RA, во втором – их формальные ошибки, в третьем - значения прямых восхождений, взятые из каталога Tycho-2 (секунды времени), в четвертом - измеренные и осредненные по 6 снимкам значения склонений Dec, в пятом – их формальные ошибки, в шестом - склонения из каталога Tycho-2, в седьмом – измеренные звездные величины в фильтре V ПЗС, в восьмом - ошибки измерений, в девятом - V из каталога Tycho-2. Результаты показывают, что точность наших измерений сравнима с точностью каталога с данными, полученными из наблюдений в космосе:

RA obs			err	RA T	Dec obs			err	Dec T	V obs	err	V T
h	m	s	s	s	deg	'	"	"	"	m	m	m
2	19	4.449	0.002	4.453	57	8	7.80	0.02	7.82	6.47	0.03	6.62
2	19	13.937	0.004	13.944	57	10	9.24	0.04	9.23	6.56	0.06	6.69
2	23	0.428	0.003	0.425	57	23	13.25	0.03	13.23	6.83	0.03	7.04
2	23	11.066	0.002	11.066	57	11	58.00	0.02	58.00	7.47	0.05	8.18
2	23	24.104	0.002	24.104	57	12	43.08	0.01	43.09	7.73	0.03	8.52
2	18	28.157	0.002		57	12	30.17	0.03		8.08	0.05	
2	17	28.059	0.003	28.047	57	21	56.36	0.04	56.33	8.13	0.03	8.14
2	19	10.438	0.002		57	7	49.85	0.06		8.38	0.02	
2	18	23.044	0.002		57	0	36.63	0.04		8.39	0.02	
2	21	52.408	0.002		56	54	17.99	0.05		8.52	0.02	
2	18	53.279	0.002	53.288	57	25	16.82	0.04	16.81	8.54	0.07	9.52
2	18	22.977	0.005		57	2	21.44	0.02		8.66	0.04	
2	17	49.845	0.002		57	5	25.56	0.02		8.80	0.06	
2	20	15.727	0.004		57	5	54.99	0.01		8.92	0.04	
2	24	2.235	0.003	2.239	57	21	14.15	0.03	14.14	9.01	0.04	9.13
2	18	47.934	0.004	47.938	57	4	2.23	0.02	2.17	9.01	0.06	9.23
2	17	15.566	0.005		56	53	52.89	0.04		9.12	0.07	
2	18	32.773	0.002		57	12	39.71	0.03		9.22	0.07	
2	22	43.543	0.003		57	5	12.26	0.04		9.24	0.05	
2	20	52.879	0.002	52.875	56	55	32.73	0.03	32.76	9.25	0.04	9.24
2	19	9.244	0.002		57	8	6.13	0.06		9.25	0.02	
2	18	47.769	0.003	47.771	57	8	6.78	0.01	6.80	9.28	0.03	9.28
2	21	43.027	0.002		57	18	29.80	0.02		9.34	0.04	

2	19	27.464	0.003	27.464	57	8	17.68	0.03	17.71	9.34	0.01	9.30
2	18	29.831	0.002		57	9	3.18	0.01		9.35	0.02	

10.4.3 Астрометрия движущихся объектов

Наблюдения известных движущихся объектов (астероидов, комет) начинаются с определения предварительных (установочных) координат избранных объектов. Наиболее распространенный способ - поиск нужного объекта и его эфемерид на сайте Международного астрономического союза, Центра малых планет (Minor Planet Center - <http://www.cfa.harvard.edu/iau/mpc.html>)

Эфемериды объектов даны для каждого из них отдельно в виде таблицы, в которой на предстоящие даты с интервалом 1 или 5 дней приведены координаты (прямые восхождения и склонения), а также дополнительная информация.

Астрометрические наблюдения астероидов выполняются в течение всего периода видимости этих объектов небольшими сериями, несколько снимков в течение ночи. Больше внимание уделяется объектам, сближающимся с Землей, а также кометам, представляющим особый интерес и для астрометрии, и для небесной механики, и для астрофизики.

Специфика наблюдений комет заключается в том, что желательно вести съемку как можно чаще и в течение всей наблюдательной ночи, поскольку эти объекты быстро меняются, в них идут бурные процессы, влияющие и на динамику кометы (негравитационные эффекты), и на структуру ядра, головы, хвоста кометы. Важен правильный подбор экспозиции для того, чтобы избежать перенасыщения в изображении ядра и получить максимально информативное изображение остальных частей кометы.

Обработка наблюдений начинается с предварительной «чистки» снимков. Из полученных изображений вычитается темновой ток (осредненный по серии снимков). Производится коррекция изображения с помощью коэффициентов чувствительности пикселей.

После этих процедур начинается собственно астрометрическая обработка снимков. Необходимо выделить изображения звезд, определить уровень фона неба в окрестности каждой звезды и определить матричные координаты X , Y этих звезд. Одновре-

менно определяются их относительные звездные величины (с произвольным нуль-пунктом). При этом анализируется форма изображений звезд, асимметрия может указывать на наличие близкого "соседа" или на то, что изображение искажено попавшей на него космической частицей. Одновременно индексируется вероятность ошибки (если изображение попадает на плохие пиксели). «Плохие» звезды не используются при астрометрической редукции снимков.

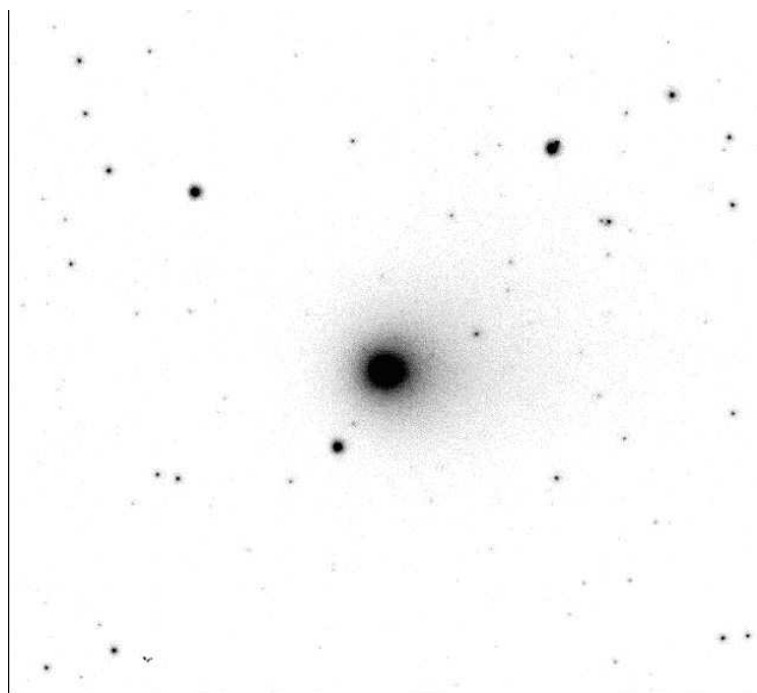


Рис. 10.12: Негативное изображение кометы C/2004 Q2 (Machholz) 04/05.02.2005

Определение координат ядра кометы представляет отдельную сложную задачу. Комета наблюдается не в виде точечного источника, как, например, астероид, а имеет сложную фотометрическую форму, зависящую от плотности и химического состава вещества головы кометы, от взаимного положения кометы, Солнца и наблюдателя, от наличия вращения и джетов. В частности, комета C/2004 Q2 (Machholz) была сориентирована достаточно выгодно для астрометрических наблюдений. Очень важно правильно определить координаты ядра кометы, по возможности исключить все факторы, влияющие на видимое изображение

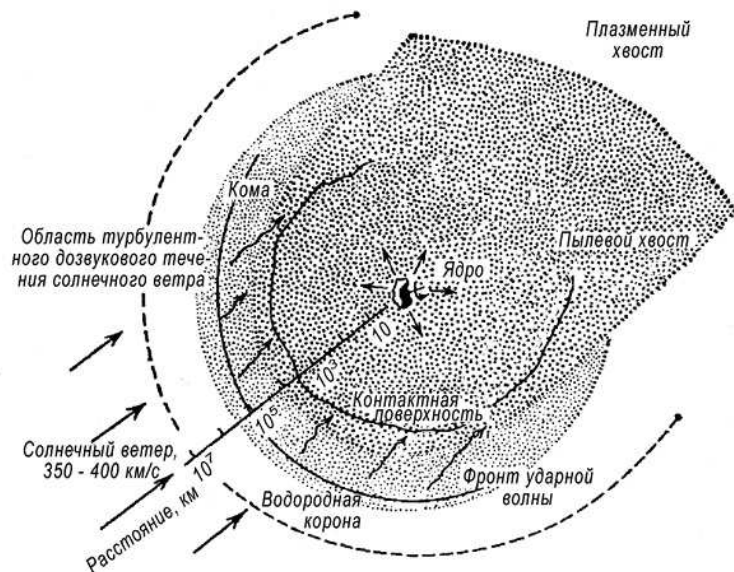


Рис. 10.13: Схема структуры кометы и обтекание ее солнечным ветром

– и неравномерную яркость головы кометы, и неравномерную освещенность Солнцем, и наличие джетов. Сложность этой задачи видна и по приведенному снимку (рис. 10.12), и по схеме (рис. 10.13) из статьи М.Я.Марова ¹.

После определения матричных координат X , Y и относительных звездных величин m выполняется астрометрическая редукция снимка, включающая несколько этапов. Из опорного каталога Tycho-2 выбираются все звезды в некоторой окрестности снимка (область должна превышать размер снимка, поскольку неизвестна точная установка телескопа). Далее производится автоматическое отождествление звезд каталога Tycho-2 со звездами снимка.

По этим отождествленным звездам определяются параметры (постоянные) снимка и производится вычисление экваториальных координат всех звезд снимка (программа ASTRO). Применяется итерация для уточнения координат центра снимка и параметров снимка, отбраковываются опорные звезды с большими ошибками. Координаты опорных звезд также вычисляются

¹Маров М.Я. Физические свойства и модели комет. Астрон. вестник, 1994. Т. 28. №4

Таблица 10.2: Результаты обработки одной из серий наблюдений кометы C/2004 Q2 01 января 2005 года (МР К04Q020; Obs. 84; year 2005)

Dynamical Time	RA	$(O - C) \cos \delta$	DEC	$(O - C)$
01 27.658803	$2^h 58^m 22.890^s$	$-0.19''$	$+57^\circ 42' 18.06''$	$0.18''$
01 27.661593	$2^h 58^m 22.691^s$	$-0.11''$	$+57^\circ 42' 30.34''$	$0.03''$
01 27.664003	$2^h 58^m 22.540^s$	$0.12''$	$+57^\circ 42' 41.01''$	$-0.02''$
01 27.667123	$2^h 58^m 22.273^s$	$-0.14''$	$+57^\circ 42' 55.09''$	$0.17''$
01 27.669903	$2^h 58^m 22.084^s$	$0.02''$	$+57^\circ 43' 07.37''$	$0.08''$
01 27.672663	$2^h 58^m 21.875^s$	$0.00''$	$+57^\circ 43' 19.86''$	$0.29''$
01 27.675443	$2^h 58^m 21.646^s$	$-0.16''$	$+57^\circ 43' 32.44''$	$0.50''$
01 27.680843	$2^h 58^m 21.177^s$	$-0.67''$	$+57^\circ 43' 56.32''$	$0.36''$
Среднее по 8 наблюдениям				
01 27.668797	$2^h 58^m 22.1472^s$	$-0.141'' \pm 0.084$	$+57^\circ 43' 02.562''$	$0.199'' \pm 0.062$
Средняя ошибка одного наблюдения: $\sigma_\alpha \cos \delta = 0.238''$				$\sigma_\delta = 0.176''$

с полученными постоянными снимка и определяются их поправки, которые позволяют оценить точность редукции. Одновременно определяются и экваториальные координаты ядра кометы на снимке.

Заключительный этап обработки – объединение результатов обработки разных снимков в таблицу, предназначенную для небено-механического анализа с помощью специального программного пакета «ЭПОС» (пример – табл. 10.2) и выполнение этого анализа.

Программный пакет "Эпос" разработан в ГАО РАН для эфемеридного обеспечения наблюдений тел Солнечной системы и анализа наблюдательных данных (включая средства визуализации наблюдаемой области неба, визуализации орбит и пр.).

Результаты определения координат (с достаточно точной временной привязкой) одного и того же объекта по разным снимкам на протяжении какого-то интервала времени, представленные в стандартном формате МРС вносятся в программу "Эпос", с помощью которой сравнивают измеренные и эфемеридные координаты, определяют средние поправки к эфемеридным положениям и среднеквадратические ошибки этих поправок.

Так, результаты обработки одной из серий (одной ночи) наблюдений кометы C/2004 Q2 (Machholz) показывают, что средние поправки к эфемеридным значениям координат невелики, в пре-

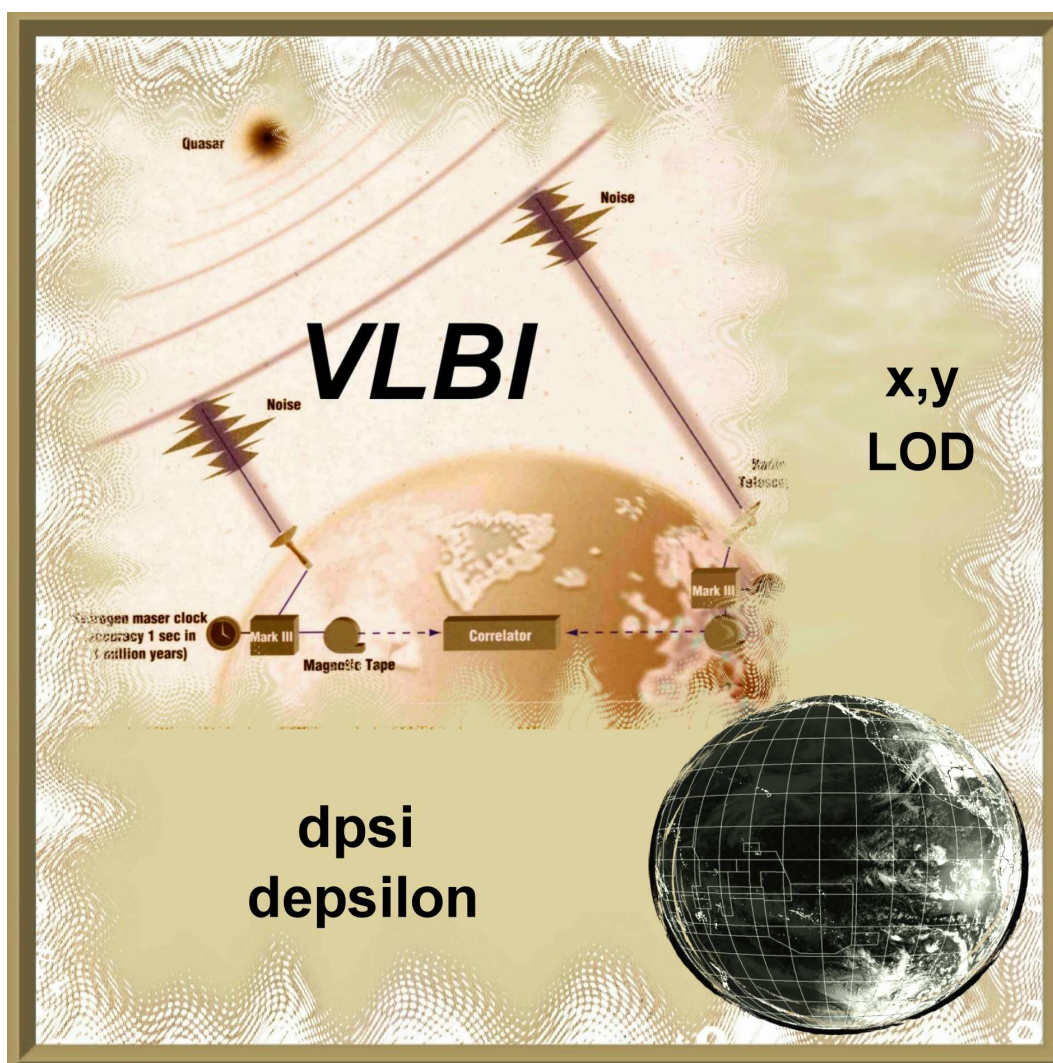
делах ошибок наблюдений. Можно отметить, что средние ошибки одного наблюдения по обеим координатам ($0.24''$ и $0.18''$) в случае использования ПЗС в несколько раз меньше, чем ошибки измерений координат комет на этом же инструменте с фотопластинками, они редко были лучше $1''$.

Наблюдения в течение длительного времени позволяют выявить интересные особенности в движении кометы, что может служить материалом для исследований динамических и астрофизических явлений в этих объектах.

Приведенные примеры наблюдений с короткофокусным ПЗС-телескопом не исчерпывают всех возможностей исследований с такими инструментами.

Глава 11

Получение параметров ориентации Земли из РСДБ наблюдений



11.1 Метод РСДБ

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ, в англоязычной литературе VLBI – Very Long Baseline Interferometer) является одной из самых точных наблюдательных методик. В настоящее время метод РСДБ занимает в астрометрии особое место, поскольку он позволяет независимым способом построить небесную систему отсчета (ICRF), земную систему отсчета (ITRF) и определять их взаимную ориентацию. Регулярные наблюдения радиоисточников, необходимые для построения небесной системы отсчета на миллисекундном уровне точности, доставляют также важную астрофизическую информацию для изучения внегалактических радиоисточников. Метод РСДБ совместно с лазерной локацией ИСЗ и Луны, а также с помощью спутниковых систем DORIS и GPS/ГЛОНАСС позволяет построить на миллиметровом уровне точности земную систему отсчета, в которой изучаются явления, происходящие на Земле. Взаимная ориентация небесной и земной систем отсчета, параметризуемая с помощью пяти параметров ориентации Земли (ПОЗ), позволяет изучать движение полюсов в теле Земли, получать информацию о неравномерности вращений Земли, а также о прецессионно-нутационном движении оси вращения Земли.

Принцип действия простейшего радиоинтерферометра прост – есть две антенны, разнесённых на некоторое расстояние между собой (от сотен метров до нескольких тысяч километров), измеряется разность моментов прихода одного сигнала на различные антенны (задержка τ). Подобные инструменты впервые появились в начале 50-х годов XX века.

Как правило, они использовались для наблюдения компактных радиоисточников, их разрешающая способность была много выше одиночных радиотелескопов. Всё же для наблюдений многих радиоисточников требовалось существенно бо́льшая разрешающая способность. Простейший способ увеличить разрешающую способность интерферометра при сохранении частоты принимаемого сигнала – увеличить базу (расстояние между антеннами). Однако на этом пути возникают ограничения, связанные с технической невозможностью создания протяженных фазостабильных



Рис. 11.1: Национальная РСДБ сеть "КВАЗАР": Светлое, Зеленчук, Байдары

линий передач. В 1965 году в СССР была предложена идея о создании радиоинтерферометра с применением независимых гетеродинов и систем регистрации сигнала [11]. Принятые сигналы записываются на магнитные ленты (в настоящее время – жесткие магнитные диски), которые затем совместно обрабатываются на корреляторе. Идея была впервые применена на практике в 1967 году в США. Метод получил название радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Технически это радиоинтерферометрия с раздельной записью сигнала.

Проведение РСДБ-наблюдений требует решения большого количества технических и организационных задач. На каждой антенне должна стоять система регистрации, в которую входят высокоточные стандарты частоты, синхронизированные между собой. Вследствие огромных длин баз (тысячи километров) элементы РСДБ сети находятся, как правило, в различных государствах и принадлежат различным организациям. В нашей стране такие работы ведутся в рамках проекта КВАЗАР (рис.11.1), для осуществления которого в Санкт-Петербурге был открыт Институт прикладной астрономии Российской академии наук.

11.2 Международная служба РСДБ (IVS)

По мере развития РСДБ и увеличения количества участников наблюдений возникла необходимость в организации, координирующей международные усилия в этой области. Ранее координация велась РСДБ-группой в Годдарде и координатором была Нэнси Ванденберг (она же была инициатором создания IVS) и Международной службой вращения Земли (МСВЗ, англ. IERS), которая для своих нужд использовала, в частности, РСДБ-наблюдения. Однако к концу 90-х годов стало ясно, что Международная служба вращения Земли (IERS) не справляется с координацией всех методов наблюдений, которые она использует (помимо РСДБ это GPS, лазерная локация Луны и ИСЗ и др.). В 1998 году комиссией при Международной Ассоциации Геодезии (IAG) было решено создать международную службу, которая бы взяла на себя координацию РСДБ наблюдений. Организация начала свою деятельность в 1999 году и получила название International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS). В общей сложности она охватывает работу более 40 учреждений в 18 странах (рис.11.2). В состав IVS входят около тридцати станций, наблюдения которых передаются на корреляторы. Результаты после корреляционной обработки поступают на хранение в базы данных. Из этих баз они становятся доступны всем пользователям. В структуру IVS входит 21 центр анализа данных (среди которых постоянные и ассоциированные центры), использующий эти наблюдения для получения поправок к координатам радиоисточников и станций и ПОЗ. Основываясь на рядах ПОЗ, предоставляемых шестью постоянными аналитическими центрами (USNO – Военно-морская обсерватория США, GSFC – Годдардовский центр космических полетов, BKG – Федеральное агентство геодезии и картографии, Германия, IAA – ИПА, SPBU – СПбГУ, AUS – Geoscience Australia), координатор выводит общее решение для ПОЗ (<http://giub.geod.uni-bonn.de/vlbi/IVS-AC/index.html>).

Одной из функций IVS является организация наблюдательных программ, которые проводятся для решения различных задач. Их описание можно получить на сайте <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/>.

Остановимся более подробно на программах, направленных на

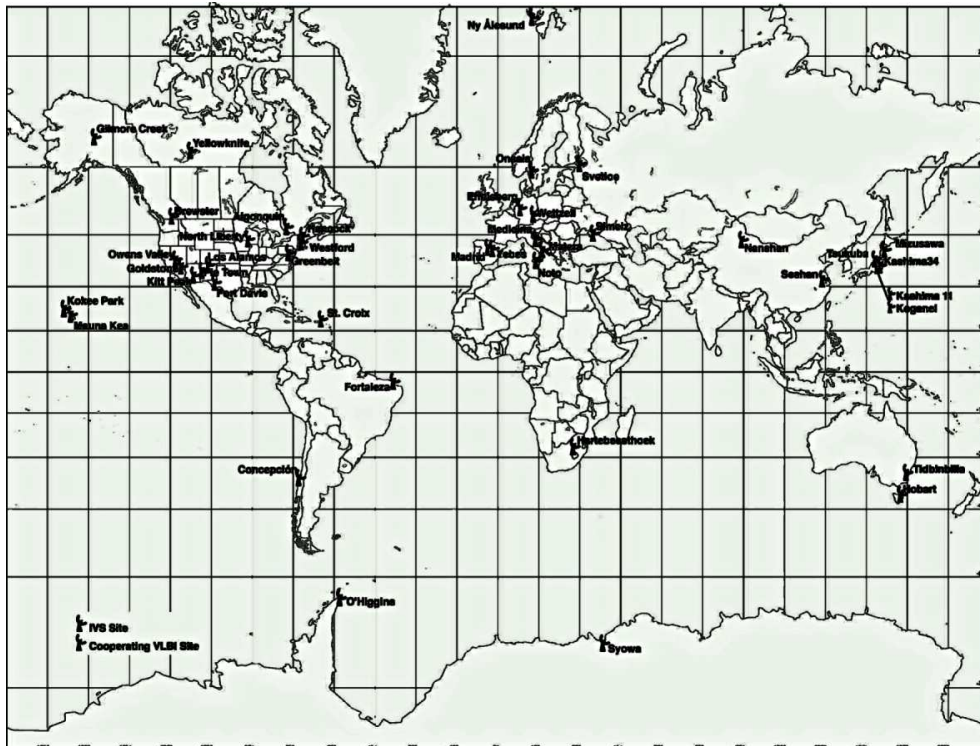


Рис. 11.2: Мировая сеть РСДБ

определение ПОЗ. Для решения этой задачи проводятся специальные наблюдательные сессии. Начиная с 1984 года такими сессиями являлись еженедельные 24-часовые серии по программе IRIS-A (International Radio Interferometric Surveying, IRIS), которая позднее, в 1993 году, сменилась программой NEOS-A (National Earth Orientation Service, NEOS). С 1997 года к NEOS-A прибавились одновременные наблюдения по программе CORE-A (NASA Continuous Observations of the Rotation of the Earth, CORE) с целью получения ПОЗ на двух независимых сетях и последующего сравнения полученных результатов. В настоящее время (2009 год) IVS еженедельно проводит две специальные геодезические наблюдательные программы – IVS-R1 и IVS-R4, которые с начала 2002 года заменили собой программы CORE-A и NEOS-A соответственно. В наблюдениях участвуют, как правило, от 5 до 8 станций. Заметим, что в начале 80-х годов XX века, когда массовые астрометрические РСДБ-наблюдения только начинались, в наблюдениях участвовало от 3 до 5 станций.

11.3 Измеряемые величины

Результатом обработки записей сигналов на корреляторе являются временная задержка τ прихода волнового фронта на различные антенны интерферометра и частота интерференции. Все последующие данные (ПОЗ, координаты станций и радиоисточников) определяются из этих наблюдаемых величин.

Опишем кратко процедуру получения этих величин. Для это-

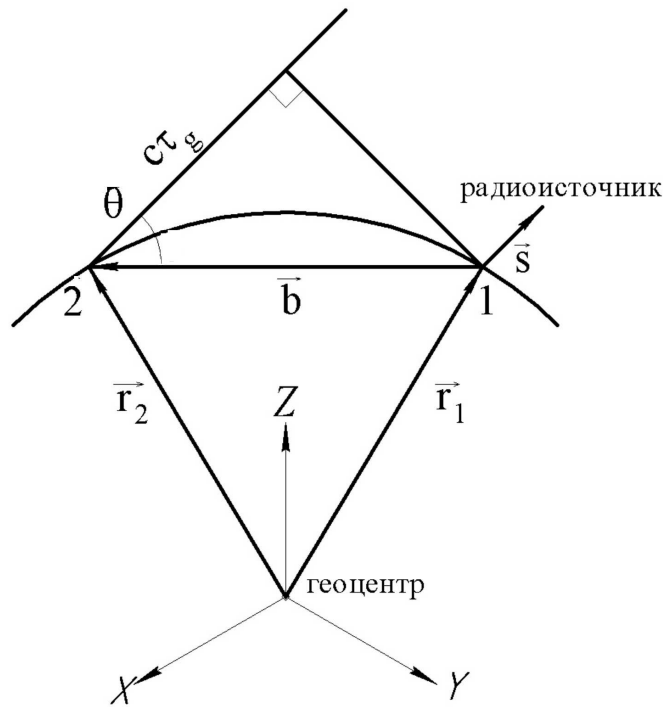


Рис. 11.3: Схема радиоинтерферометра

го рассмотрим случай двухэлементного интерферометра. Есть два радиотелескопа, находящихся на большом расстоянии друг от друга, одновременно наблюдающих радиоисточник на частоте $\omega = 2\pi f$ (рис.11.3). Обозначая через \vec{r}_1 и \vec{r}_2 соответственно радиусы-векторы антенн, для вектора базы имеем:

$$\vec{b} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \quad (11.1)$$

Если обозначить через \vec{s} единичный вектор в направлении наблюдаемого источника с известными координатами, то

$$\vec{b} \cdot \vec{s} = -c\tau_g, \quad (11.2)$$

где c – скорость света, τ_g – геометрическая задержка сигнала.

После завершения наблюдений носители информации с каждого пункта РСДБ перевозятся в центр обработки, где выполняется корреляционный анализ: вычисляется амплитуда и фаза Φ_0 взаимной корреляционной функции сигналов для каждой пары антенн. Фазовые измерения $\phi(\omega_i, t_j)$ для различных частотных каналов ω_i и моментов времени t_j используются, чтобы оценить три параметра – фазу ("phase") $\phi_0 = \phi(\omega_0, t_0)$, групповую задержку ("group delay") $\tau_{gr} = \frac{\partial \phi}{\partial \omega}$ и частоту интерференции ("phase delay rate") $\dot{\tau}_{pd} = \frac{\partial \phi}{\partial t}$ методом наименьших квадратов:

$$\phi(\omega_i, t_j) = \phi_0 + \frac{\partial \phi}{\partial \omega}(\omega_i - \omega_0) + \frac{\partial \phi}{\partial t}(t_j - t_0). \quad (11.3)$$

Если фаза была измерена для двух хорошо разнесенных частот (что выполняется для случая стандартных частот X (8.4 ГГц) и S (2.2 ГГц)), то при достаточной точности наблюдений, система условных уравнений, как правило, решается без проблем. Из трех оцениваемых параметров (ϕ_0 , τ_{gr} , $\dot{\tau}_{pd}$) для обработки с целью получения ПОЗ и других параметров используется только групповая задержка¹.

В эту групповую задержку входит еще и задержка сигнала, вызванная прохождением сигнала через среду из заряженных частиц (ионосферная задержка). Чтобы устранить влияние ионосферы, наблюдения проводятся на двух частотах (ν_1, ν_2), каждая из которых намного больше частоты собственных колебаний плазмы $\nu_p = \sqrt{\frac{\rho c^2 r_0}{\pi}} \approx 8.98 \sqrt{\rho}$ Гц. Здесь ρ – плотность электронов в расчете на кубический метр, c – скорость света, r_0 – классический радиус электрона. Для земной ионосферы $\nu_p \approx 9$ МГц, для межпланетной среды $\nu_p \approx 900$ кГц и для межзвездной среды $\nu_p \approx 28$ кГц. Таким образом, для рабочих РСДБ частот (2.2 ГГц и 8.4 ГГц) $\nu_{1,2} \gg \nu_p$. Если неискаженная ионосферой групповая задержка равна τ , то для двух частот (ν_1, ν_2) справедливы соотношения

$$\tau_{\nu 1} = \tau + \frac{q}{\nu_1^2}, \quad (11.4)$$

¹Термин "групповая временная задержка" отражает то обстоятельство, что эта величина вычисляется по измерениям фазы в группе, состоящей из 8 частотных каналов.

$$\tau_{\nu 2} = \tau + \frac{q}{\nu_2^2}, \quad (11.5)$$

где $q = \frac{cr_0 I_e}{2\pi}$, I_e – полное количество электронов на единицу площади вдоль луча зрения. Исключая из уравнений (11.4) и (11.5) величину q , находим:

$$\tau = \tau_{\nu 2} \frac{\nu_2^2}{\nu_2^2 - \nu_1^2} - \tau_{\nu 1} \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2 - \nu_1^2}. \quad (11.6)$$

Таким образом, неискаженная групповая задержка легко вычисляется. Однако в базу наблюдений записываются значения $\tau_{\nu 1}$, $\tau_{\nu 2}$ и ионосферная поправка для X-полосы $\frac{q}{\nu_1^2}$. Соответствующая коррекция производится при обработке наблюдений.

11.4 Модель задержки

Обработка РСДБ-наблюдений состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляются разности "О-С" (наблюдённая величина "Observatum" минус предвычисленная "Calculatum"). В качестве наблюдаемой задержки используется величина τ_{gr} , а в качестве предвычисленной – τ_g . На втором этапе для некоторого выбранного множества уточняемых параметров строится матрица условных уравнений, после чего проводится уравнивание разностей "О-С" на основе выбранной параметрической модели с помощью метода наименьших квадратов или его модификаций.

Таким образом, на первом этапе необходимо с максимальной возможной точностью вычислить расчетные задержки для каждого наблюдения на основе принятой модели вращения Земли и движения ее по орбите, приливного и неприливного смещения телескопов, теории прецессии и нутации и т.д. В настоящее время модель вычисления задержки определена стандартами Международной службы вращения Земли. Этот этап в соответствии с традициями астрометрии можно назвать редукцией РСДБ-наблюдений.

Современная точность измерения групповой задержки составляет в среднем $\sim 10^{-11}$ с или 10 пкс, а частоты интерференции – $\sim 10^{-15}$ с/с. Поэтому точность вычисления задержки (точность модели наблюдений) должна быть не хуже 1 пкс (в линейной

мере ~ 0.3 мм).

В идеальном случае (Земля неподвижна, тяготения нет, координаты телескопов и источников известны точно, атмосфера отсутствует, часы синхронизованы точно и т.п.) геометрическая задержка выражалась бы формулой (11.2). В действительности это не так. Выражение (11.2) определяет геометрическую задержку в отсутствие эффектов ОТО и СТО, которыми нельзя пренебрегать.

В соответствии со стандартами МСВЗ модель задержки вычисляется в рамках общей теории относительности, с использованием определения барицентрической и геоцентрической систем отсчета. Рекомендованное Международной службой вращения Земли (IERS) аналитическое выражение для временной задержки τ в геоцентрической системе координат, полученной по наблюдениям на двух радиотелескопах, имеет вид [28]:

$$\tau = \frac{\tau_{grav} - \frac{\vec{b} \cdot \vec{s}}{c} \left(1 - \frac{2U_E}{c^2} - \frac{\langle \vec{V}_E^2 \rangle}{2c^2} - \frac{\vec{V}_E \vec{w}_2}{c^2} \right) - \frac{1}{c^2} (\vec{b} \cdot \vec{V}_E) \left(1 + \frac{(\vec{V}_E \cdot \vec{s})}{2c} \right)}{1 + \frac{1}{c} (\vec{s} \cdot (\vec{V}_E + \vec{w}_2))}, \quad (11.7)$$

где $\tau = t_2 - t_1$ – временная задержка, τ_{grav} – гравитационная задержка ("эффект Шапиро"), c – скорость света, \vec{b} – геоцентрический вектор базы, \vec{s} – вектор барицентрических координат наблюдаемого радиоисточника, \vec{V}_E – вектор барицентрической скорости Земли, \vec{w}_2 – вектор геоцентрической скорости "второго" радиотелескопа, $U_E = \frac{GM_s}{R_s}$ – гравитационный потенциал Солнца в геоцентре Земли (M_s , R_s – соответственно, масса и расстояние от Солнца до геоцентра). Если в этой формуле отбросить все слагаемые, учитывающие эффекты ОТО и СТО, то останется только геометрическая задержка в виде (11.2).

Однако и эта величина не является окончательной. В реальности в качестве модели используется величина

$$\tau_c = \tau + \Delta\tau_{atm} + \Delta\tau_{clock}, \quad (11.8)$$

в которую добавляются еще эффекты "влажной" компоненты тропосферной задержки и разница хода часов на пунктах РСДБ. Именно для этой величины выполняется приближённое равенство

$$\tau_{gr} \approx \tau_c = \tau + \Delta\tau_{atm} + \Delta\tau_{clock}. \quad (11.9)$$

Теперь можно сформировать разности вида

$$\tau_{gr} - \tau_c = (O - C). \quad (11.10)$$

В теории методов обработки наблюдений все параметры, образующие вектор (11.10), должны быть "малыми величинами". Однако на деле в (11.10) не все "малые величины" действительно малые. Происходит это потому, что $\Delta\tau_{clock}$ – достаточно большая величина, которая составляет практически весь вектор $(O - C)$. Так что можно записать:

$$\tau_{gr} - \tau_c = (O - C) = -\Delta\tau_{atm} - \Delta\tau_{clock} + \Delta\tau, \quad (11.11)$$

где вектор $\Delta\tau$ – как раз то слагаемое, которое образовано малыми поправками, зависящими от неточности априорных значений ПОЗ, координат станций, координат полюса и т.п.

При выводе формулы τ_{gr} временная задержка, производимая коррелятором, в пределах точности, выражается в шкале координатного времени ТТ. Интервал координатного времени ΔTT можно привести к интервалу в шкале TCG с помощью простой формулы

$$\Delta TCG = \frac{\Delta TT}{1 - L_G}, \quad (11.12)$$

где

$$L_G = 6.969290134 \cdot 10^{-10}. \quad (11.13)$$

В результате такого подхода длина базы b вычисляется не в системе GCRS, а в другой координатной системе, связанной именно с РСДБ-методом. Обозначим координаты станций в этой системе (согласованной со шкалой времени ТТ) как x_{VLBI} . Чтобы перейти к системе координат, согласованной с системой времени TCG и рекомендованной резолюциями IAU и IUGG, нужно координаты РСДБ-станций, получающиеся в результате уравнивания, привести к системе GCRS как $x_{TCG} = x_{VLBI} / (1 - L_G)$. Однако было принято решение для поддержания совместимости со старыми результатами при выводе новой земной системы координат ITRF2000 не перевычислять координаты станций в систему TCG. Таким образом, шкала ITRF2000 не соответствует резолюциям IAU и IUGG.

11.5 Методы получения оценок астрономических и геодезических параметров

На втором этапе обработки для каждого наблюдения разность измеренной и вычисленной задержки представляется в виде разложения по малым параметрам – поправкам к принятым значениям параметров p_i модели:

$$O - C = \sum_i^N \frac{\partial \tau_c}{\partial p_i} \Delta p_i, \quad (11.14)$$

причем число параметров N может быть различным в зависимости от конкретной задачи.

На третьем этапе выполняется оценивание параметров модели. Решение системы условных уравнений (11.14) дает поправки Δp_i к параметрам, которые нас интересуют. В нашем случае этими параметрами являются ПОЗ:

- координаты полюса x_p, y_p ,
- разность $UT1 - UTC$,
- нутация в долготе и наклоне $\Delta\psi, \Delta\epsilon$.

В выражение для временной задержки (11.7) они входят как параметры, связывающие GCRS и ITRS, поскольку вектор базы \vec{b} , фигурирующий в (11.7), имеет следующий смысл:

$$\vec{b} = PNUXY\vec{b}', \quad (11.15)$$

где \vec{b}' - вектор базы в системе ITRS, исправленный нужными поправками за эффекты тектонического движения, твердотельного и полюсного приливов, океанических и атмосферных нагрузок. Перечислим матрицы, входящие в это уравнение: P - матрица прецессии, N - матрица нутации, U - матрица вращения вокруг z -оси в земной системе координат, X, Y - матрицы вращения вокруг x - и y -осей. Ось x задана направлением из центра Земли к Гринвичскому меридиану, ось y - лежит на 90 градусов к востоку от оси (меридиан Бангладеш), ось z задана положением стандартного полюса на эпоху 1903.0.

Матрицы прецессии и нутации зависят от параметров, медленно меняющихся в небесной системе координат, а матрицы U, X, Y

- от параметров, медленно меняющихся в земной системе координат. Именно представление вращения Земли с помощью набора медленно меняющихся со временем параметров привело к тому, что небесная и земная системы координат связываются через 5 углов, а не через минимальный набор из 3 углов. Однако в последние 10 лет в связи с повышением точности наблюдений пришлось ввести в модель высокочастотные вариации Всемирного времени и координат полюса. Некоторые из этих гармоник трансформируются в долгопериодические вариации нутации. Таким образом, преимущество представления через медленно меняющиеся параметры было утрачено и, более того, привело к двусмысленности для определения некоторых физических эффектов. В настоящее время разработана новая концепция представления вращения Земли через 3 угла, которая пока окончательно не вошла в практику обработки наблюдений. Детальное рассмотрение всех пяти матриц и входящих в них углов приведено, например, в книге [6].

Если априорные значения ПОЗ, публикуемые IERS, заданы с ошибками, то они внесут свой вклад в разницу между наблюдаемой и вычисленной величиной τ . Поэтому, вводя соответствующие производные в матрицу условных уравнений, можно вычислить соответствующие поправки к принятым значениям ПОЗ с помощью одного из применяемых для обработки РСДБ наблюдений методов. Обычный метод наименьших квадратов для обработки РСДБ наблюдений не подходит. Виной тому являются инструментальные ошибки, вызванные нестабильностью хода водородных стандартов $\Delta\tau_{clock}$ и влажной компоненты тропосферы $\Delta\tau_{atm}$. Эти величины в течение 24-часовой серии не остаются постоянными, поэтому стандартный МНК для их оценивания не годится. Для оценивания параметров, которые остаются нестабильными, были разработаны специальные методы (разновидности обычного МНК) - сегментированный МНК, фильтр Калмана, информационный фильтр, среднеквадратическая коллокация [5],[18].

11.6 Необходимое программное обеспечение. Форматы данных. Возможности пакета ОССАМ

Выше были приведены теоретические основы получения необходимой информации (координаты станций, источников, ПОЗ) из РСДБ-наблюдений. Ясно видно, что это трудоёмкая задача, которая с приемлемой скоростью решается только при использовании ЭВМ и специализированных программных пакетов. Существуют несколько различных программных пакетов, предназначенных для обработки РСДБ-наблюдений, нами используется пакет ОССАМ. Прежде чем приступить к описанию программного пакета, следует сказать несколько слов об используемых данных.

Непосредственным результатом обработки РСДБ-сессии на корреляторе является файл в формате МКЗ. Для последующей обработки его, как правило, переводят в формат NGS с помощью программы МКЗNGS.exe. Файл NGS состоит из заголовка вида

```
DATA IN NGS FORMAT FROM DATABASE 08DEC30XE_V004  
Observed delays and rates in card #2, modified errors in card #9
```

за которым следует запись вида

```
FORTLEZA 4985370.04800 -3955020.32000 -428472.30600 AZEL .00000  
HARTRAO 5085442.79600 2668263.49800 -2768697.04300 EQUA 6.69500  
NYALES20 1202462.76100 252734.40400 6237766.01300 AZEL .50800  
TIGOCNC 1492054.25700 -4887960.95600 -3803541.32000 AZEL .00000  
KOKEE -5543837.62100 -2054567.85200 2387851.92200 AZEL .50800  
WETTZELL 4075539.89500 931735.27000 4801629.35500 AZEL .00000
```

Здесь первый столбец – названия станций, три последующих содержат геоцентрические координаты. Пятый – тип монтировки (азимутальная или экваториальная), шестой – смещение точки отсчёта относительно фазового центра антенны.

Затем идёт список наблюдаемых источников:

1741-038	17	43	58.856137	- 3	50	4.616680
1357+769	13	57	55.371519	76	43	21.051110
1611+343	16	13	41.064249	34	12	47.909090
2318+049	23	20	44.856598	5	13	49.952660
2243-123	22	46	18.231976	-12	6	51.277340
3C418	20	38	37.034755	51	19	12.662690
1749+096	17	51	32.818573	9	39	0.728510 .

В первом столбце источники, во втором, третьем, четвёртом – прямое восхождение (в часах, минутах, секундах), в пятом, шестом, седьмом – склонение (градусы, минуты, секунды).

Затем идут записи вида

```

BADARY   MEDICINA  0955+476 2008 05 07 18 30  49.0000000000
-9913132.28216106 .00568 -574505.3289003637 .00722 0 I
.00227 .00000 .00000 .00000 -4.897373747598247 0.
.00 .0 .00 .0 .00 .0 .00 .0
.00000 .01521 .00000 .00000 .00000 .00000
-1.320 19.662 928.100 1015.900 50.120 41.340 0 0
.0917413550 .00735 .0081861501 .00482 0
-9913132.28216106 .02364 -574505.3289003637 .08993 0 I

```

В первой строке указана база (две станции, её определяющие), наблюдаемый источник, момент наблюдения – год, месяц, число, час, минута и секунда. В следующей строке идут наблюдаемая групповая задержка, частота интерференции и их ошибки. Третья строка снизу – метеопараметры (температура в градусах Цельсия, давление в гектопаскалях, влажность воздуха). Зачастую оборудование для их определения ломается (а на некоторых станциях оно и не ремонтируется), в таком случае значения метеопараметров заменяются на -999 для температуры и давления и на -99900 для влажности. В данном случае следует с помощью программы METEO.exe заменить на правдоподобные (достаточно соответствия календарному сезону для данной местности). Необходимо, чтобы NGS-файлы находились в одной директории с программой METEO.exe. Тогда METEO.exe при запуске сама определит NGS-файлы, в которых пропущены метеоданные и выдаст для каждого файла список станций, для которых нет метеоданных, после чего предложит ввести данные для каждой станции в отдельности. Для ввода метеоданных надо набрать

строку вида *xx.xxx xxxx.xxx xx.xxxx*, где первое чило – температура, второе – давление в гектопаскалях и третье – влажность.

Пакет ОССАМ состоит из нескольких отдельных программ, запускаемых с помощью пакетного файла. Данный пакет программ выполняет две основные функции: предвычисление задержки на основе принятых моделей и оценивание поправок к искомым величинам. Пакет ОССАМ позволяет выбирать модели, в соответствии с которыми будет производиться предвычисление задержки. В пакете реализовано несколько алгоритмов оценивания неизвестных параметров: МНК, метод среднеквадратической коллокации (МСКК), фильтр Калмана. Каждый из реализованных методов применяется в соответствии с его спецификой. Для получения оценок Всемирного времени в рамках срочной службы ПОЗ оправдано применение МНК, так как наблюдения ведутся всего один час и есть основания полагать, что все оцениваемые величины не изменяются на этом интервале времени. В то же время, при получении оценок всех пяти ПОЗ по 24-часовым наблюдениям, нужно учитывать, что состояние атмосферы и поведение часов могут меняться случайным образом внутри суток (то есть представляют собой стохастический процесс). По этим причинам для получения оценок по таким сериям наблюдений больше подходит фильтр Калмана. Кроме того, интересной задачей является получение оценок координат полюса и Всемирного времени с внутрисуточным разрешением. Для решения этой задачи в пакете программ ОССАМ был реализован МСКК.

11.7 Инструкция обработки сеанса наблюдений

Обработка сеанса наблюдений предполагает некоторую последовательность подготовки файлов для их последующей обработки с помощью пакета ОССАМ. Общая схема обработки наблюдений показана на рис. 11.4.

11.7.1 Загрузка данных

Данные для оперативной обработки наблюдений могут быть загружены с одного из трех серверов Международной РСДБ

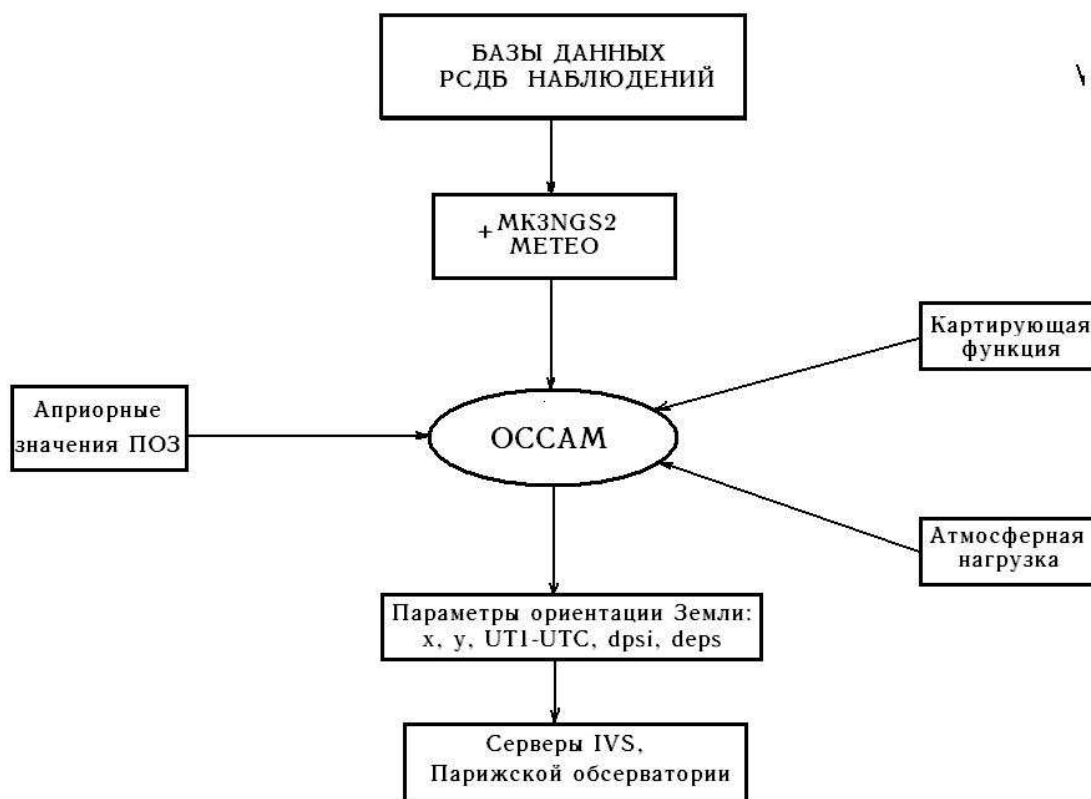


Рис. 11.4: Блок-схема обработки данных

Службы на сайте <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/products-data/data.html>. Для обработки используются серии, выполненные по двум программам IVS-R1, IVS-R4, каждая из которых проводится еженедельно (обычно, в понедельник и четверг). Сами наблюдательные данные (групповые задержки и т.д.) представляют собой файлы вида $YYMMDDSS_V004.gz$, где YY – год, две цифры, MMM – месяц, три латинские буквы, DD – число месяца, две цифры, SS – идентификатор наблюдательной программы, XA для IVS-R1, XE для IVS-R4, V004 – четвёртая версия с коррелятора. Так, файл, содержащий наблюдения за 15 декабря 2008 года, будет называться 08DEC15XA_V004.gz. Загрузка производится обычным

способом через ftp-сервер.

11.7.2 NGS файлы, дополнительные файлы, проблемы с дополнительной секундой

После разархивации данные в двоичном виде сохраняются в файле 08DEC15 (формат МКЗ). Пакет OCCAM использует в качестве входного формата NGS-формат. Перевод из формата МКЗ в формат NGS производится с помощью программы МКЗNGS2. В результате получается текстовый файл 08DEC15ха.ngs. Часто метеопараметры в NGS-файла для некоторых станций отсутствуют и при корреляционной обработке заменяются отрицательными числами (-999 для атмосферного давления и температуры, и -99900 для влажности). Чтобы заменить эти величины более реалистичными параметрами, используется программа meteo. Эта программа выводит список "проблемных" станций и запрашивает приблизительные значения метеопараметров для каждой станции индивидуально. Обычно для давления следует использовать значение в 1000 (гектопаскалей), и для влажности 70%. Значения температуры следует выбирать исходя из географического положения станции и календарного сезона. После корректировки метеопараметров файл в виде 081215.ngs должен быть записан в поддиректорию вида C:\DATA\2008\081215\

Для обработки необходимо также загрузить текущие файлы об атмосферной нагрузке, о картирующей функции и априорные значения параметров ориентации Земли.

Данные об атмосферной нагрузке находятся на сайте http://mars.hg.tuwien.ac.at/~vlbi/ATM_ALL/.

Файл VLBI_2008.atm следует переименовать в VLBI2008.atm и записать в директорию
C:\OCCAM6_2\ATM_ALL

Данные о картирующей функции находятся на сайте <http://mars.hg.tuwien.ac.at/~ecmwf1/VLBI/2008/>.

Файл y2008.vmf1_r следует переименовать в VLBI2008.vmf1 и записать в директорию
C:\OCCAM6_2\VM1_ALL

Априорные значения ПОЗ находятся на сайте

http://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc04_05/.

Файл eopc04.08 следует переименовать в eop.08 и записать в директорию

C:\ОССАМ6_2\ЕРНЕМ. "Шапку" файла следует удалить.

Время от времени Международная служба вращения Земли добавляет дополнительную секунду. Обычно эта секунда вводится либо 1 июля, либо 1 января. Тогда первые несколько колонок файла ПОЗ выглядят так:

Дата	MJD	X	Y	UT1-UTC
2005 12 27	53731	0.058170	0.387256	-0.6602010
2005 12 28	53732	0.057024	0.386697	-0.6607954
2005 12 29	53733	0.055859	0.385838	-0.6611076
2005 12 30	53734	0.054801	0.384968	-0.6611447
2005 12 31	53735	0.053701	0.384201	-0.6611375
2006 1 1	53736	0.052611	0.383708	0.3387836
2006 1 2	53737	0.051675	0.383346	0.3385443
2006 1 3	53738	0.050858	0.383109	0.3380866
2006 1 4	53739	0.050068	0.382799	0.3373980

Как видно, значения поправок UT1-UTC скачком изменяются на 1 секунду. Поскольку значения ПОЗ для каждого момента наблюдений вычисляются с помощью интерполяции, то подобные скачки создают определенную проблему.

1 января 2009 года по решению IERS к суткам была добавлена дополнительная секунда. В связи с этим, ряд априорных значений ПОЗ "на стыке" 2008 и 2009 годов выглядит так:

2008 12 28	54828	-0.001045	0.141781	-0.5903105
2008 12 29	54829	-0.005302	0.143148	-0.5906679
2008 12 30	54830	-0.009633	0.144197	-0.5911612
2008 12 31	54831	-0.013457	0.145110	-0.5918624
2009 1 1	54832	-0.017013	0.146240	0.4071845
2009 1 2	54833	-0.020431	0.147554	0.4059901
2009 1 3	54834	-0.023262	0.149082	0.4046846
2009 1 4	54835	-0.025750	0.150718	0.4033868

При обработке наблюдений вблизи даты разрыва в величинах UT1-UTC (как правило, ± 5 суток от даты разрыва) для успешной интерполяции приходится создавать файлы априорных значений эфемерид вручную. Так, например, для вышеуказанного

перехода с 2008 года к 2009 году, "правильный" файл априорных значений ПОЗ примет вид

2008	12	28	54828	-0.001045	0.141781	-0.5903105
2008	12	29	54829	-0.005302	0.143148	-0.5906679
2008	12	30	54830	-0.009633	0.144197	-0.5911612
2008	12	31	54831	-0.013457	0.145110	-0.5918624
2009	1	1	54832	-0.017013	0.146240	-0.5928155
2009	1	2	54833	-0.020431	0.147554	-0.5940099
2009	1	3	54834	-0.023262	0.149082	-0.5953154
2009	1	4	54835	-0.025750	0.150718	-0.5966132

11.7.3 Подготовка файлов *input.txt*

В файлах вида *input.txt* содержится информация о выборе той или иной опции в редукциях оценивания. В примере ниже для программы *dtau0.exe* используется файл

```
input0_v.txt
```

```
c:\оссам6_2\dtau0.exe < input0_v.txt
```

В примере ниже для программы *pn.exe* используется файл

```
input1_2.txt
```

```
c:\оссам6_2\pn.exe < input1_2.txt
```

В примере ниже для программы *station.exe* используется файл *input2.txt*

```
c:\оссам6_2\station.exe < input2.txt
```

В примере ниже для программы *geomet.exe* используется файл *input3.txt*

```
c:\оссам6_2\geomet.exe < input3.txt
```

В примере ниже для программы *kvlbi.exe* используется файл *input8.txt*

```
c:\оссам6_2\kvlbi.exe < input8.txt
```

Подробная информация об используемых программах и о выборе опций для файлов *input.txt* содержится в руководстве пользователя ОССАМ 6.2.

11.7.4 Подготовка файла *bat*

Обработка одной 24-часовой серии представляет последовательную работу пяти программ (exe-файлов). Поэтому *bat*-файл для

обработки выглядит так:

```
copy c:\data\2008\081215\081215.ngs current.ngs
copy c:\data\2008\081215\kvlbi.opt kvlbi.opt
c:\occam6_2\dtau0.exe < input0_v.txt
c:\occam6_2\pn.exe < input1_2.txt
c:\occam6_2\station.exe < input2.txt
c:\occam6_2\geomet.exe < input3.txt
c:\occam6_2\kvlbi.exe < input8.txt
```

Сперва в рабочую директорию пакета OCCAM копируется NGS-файл с данными и файл KVLBI.OPT, после чего начинается собственно обработка. Различные параметры для редуционных вычислений задаются с помощью файлов вида input.txt.

При необходимости в bat-файл добавляются строки копирования файла эфемерид (из-за введения дополнительной секунды) и копирования файла breaks.res. Например, для серии 29 декабря 2008 года bat-файл будет выглядеть так:

```
copy c:\data\2008\081229\081229.ngs current.ngs
copy c:\data\2008\081229\kvlbi.opt kvlbi.opt
copy c:\data\2008\081229\breaks.res breaks.res
c:\occam6_2\dtau0.exe < input0_v.txt
copy c:\data\2008\081229\ephem.dat ephem.dat
c:\occam6_2\pn.exe < input1_2.txt
c:\occam6_2\station.exe < input2.txt
c:\occam6_2\geomet.exe < input3.txt
c:\occam6_2\kvlbi.exe < input8.txt
del breaks.res
```

Файл ephem.dat копируется в рабочую директорию после работы программы DTAU0.EXE, поскольку эта программа "по умолчанию" создает обычный ряд априорных значений ПОЗ с разрывом в величинах UT1-UTC на границе 2008 и 2009 годов. Последняя строчка нужна из-за того, что breaks.res после обработки данной серии следует удалить.

11.7.5 Обработка

Для обработки одной серии необходимо ввести в командной строке соответствующую команду с расширением bat. Все серии,

включенные в bat-файл, будут последовательно обработаны, а результаты записаны в файлы с SESS.DAT и SPU000N.EOPS. В файле SPU000N необходимо заменить NEOS на номер серии (R1XXX для IVS-R1, R4XXX для IVS-R4).

11.7.6 Диагноз ошибок, коррекция kvlbi.opt, breaks.res

Обычно обработка наблюдений одной серии происходит без проблем. Однако иногда по ряду причин на экран монитора выдается сообщение о перевзвешивании наблюдений. Это возникает из-за того, что на одной из станций из-за технических проблем точность наблюдений оказалась хуже предполагаемой априорно.

11.7.7 Файлы - SESS.DAT и SPU0000N.EOPS replace NEOS to R1, R4

В результате обработки программа выдает файлы SESS.DAT и файл с расширением EOPS. Имя файла задается в соответствии с соглашениями. Для РСДБ-центра СПбГУ имя файла SPU0000N, где N - номер версии.

Файл SESS.DAT содержит поправки к априорным оценкам ПОЗ. Этот файл очень полезен для контроля результатов. Значения поправок к априорным значениям HE должны быть слишком большие! Для координат полюса значения поправок не должны превышать по абсолютной величине 0.7 миллисекунды дуги. Хотя в некоторых случаях, при малом числе станций в конкретной серии поправка может выйти и за этот предел. Превышение 1.0 миллисекунды дуги практически однозначно указывает на проблемы с одной или несколькими станциями, которые необходимо устранить вручную. Обычно это связано с тем, что реальная ошибка наблюдений на одной или нескольких станциях превышает стандартную априорную ошибку наблюдений, вычисляемую для применения метода наименьших квадратов. В этом случае на экран при работе программы KVLBI.EXE выдается сообщение об ошибке для конкретного наблюдения и название базы, на которой это наблюдение было получено. Как правило, "проблемная" станция проявляется сразу для нескольких баз, поэтому установить ее не составляет особого труда. Чтобы исправить ситуацию, необходи-

мо в файле KVLBI.OPT изменить значение априорной ошибки (в сторону увеличения) для данной станции. Файл SESS.DAT отправлять в Центр данных IVS не нужно. Например, для серии 23 декабря 2008 года были сделаны следующие изменения в файле KVLBI.OPT. Исходный файл имеет вид

EOP: YES STATION COORDINATES: NO

```

Apriori disp for clock offset: 10000.00 (m**2)
Apriori disp for clock rate : 0.01 (m**2)
Apriori disp for wet trop. delay: 1.00 (m**2)
Apriori disp for trop. gradients: 0.01 (m**2)
Apriori disp for nutation: 1.00 (arcsec**2)
Apriori disp for EOP: 1.00 (arcsec**2)

```

NO. STATIONS	4	CONST	N_EC	E_EC	H_EC	WET	CL_0	CL_1
WETTZELL	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10		
MATERA	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000
SVETLOE	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000
ZELENCHK	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000

В ходе обработки было обнаружено, что наблюдения на станциях ZELENCHK и SVETLOE имеют большие ошибки. В связи с этим для каждой станции была добавлена дополнительная априорная ошибка в 2 см. Кроме того, было обнаружено, что разность фаз для наблюдений со станцией ZELENCHK систематически "шумела". Подобный эффект проявляется как отклонение разности фаз между двумя водородными стандартами от линейной зависимости. Чтобы устранить ошибку, вызываемую этим эффектом, вводят ненулевую дисперсию динамической модели фильтра Калмана для первой производной разности хода часов (CL_1 в файле KVLBI.OPT). Для данной серии принимается значение 0.00001 пкс²/с.

EOP: YES STATION COORDINATES: NO

```

Apriori disp for clock offset: 10000.00 (m**2)
Apriori disp for clock rate : 0.01 (m**2)

```

```

Apriori disp for wet trop. delay:      1.00 (m**2)
Apriori disp for trop. gradients:      0.01 (m**2)
Apriori disp for nutation:             1.00 (arcsec**2)
Apriori disp for EOP:                  1.00 (arcsec**2)

```

NO. STATIONS	4	CONST	N_EC	E_EC	H_EC	WET	CL_0	CL_1
MATERA	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10		
WETTZELL	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000
ZELENCHEK	0.020	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000001
SVETLOE	0.020	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000

Файл вида SPU0000N.EOPS содержит окончательные значения ПОЗ (априорное значение плюс поправка, полученная в результате оценивания). Этот файл должен быть отправлен в Центр данных IVS. Перед отправкой следует заменить в каждой строке "NEOS" на идентификатор данной серии. В настоящее время идентификаторов состоит из 5 символов, например R1345 – R1 или R4 (по названию программы) и порядковый трехзначный номер серии для каждой программы. Идентификатор можно найти в LOG-файле для данной серии (типа 081215ха.LOG), описанном ранее.

11.7.8 Отправка результатов

Результаты отправляются обычным образом на один из трех ftp-серверов, рекомендованных IVS. Процедура "How to submit product files" описана на сайте <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/products-data/submit-product.html>. Сперва следует отправлять сам файл с ПОЗ, затем – файл-документ, содержащий краткую информацию о представленном решении.

11.8 Получение ПОЗ из обработки РСДБ-сессии за 5 января 2009 года

11.8.1 Получение данных

Скачиваем из базы данных по адресу <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/vlbi/ivsdata/db/2009/>

файл сессии за 5 января: 09JAN05XA_V004.gz.

Файл сохраняем в директорию вида C:\DATA\2009. Скачиваем данные об атмосферной нагрузке с сайта

http://mars.hg.tuwien.ac.at/~vlbi/ATM_ALL/.

Файл VLBI_2009.atm переименовываем в VLBI2009.atm и записываем в директорию

C:\OCCAM6_2\ATM_ALL.

Скачиваем файл с картирующей функцией по адресу

<http://mars.hg.tuwien.ac.at/~ecmwf1/VLBI/2009/>.

Файл y2009.vmf1_r переименовываем в VLBI2009.vmf1 и записываем в директорию C:\OCCAM6_2\VM1_ALL

С сайта Парижской обсерватории скачиваем файл с априорными значениями ПОЗ http://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc04_05/.

Файл eopc04.09 переименовываем в eop.09 и записываем в директорию C:\OCCAM6_2\ЕРНЕМ. "Шапку" файла удаляем. Добавляем в начало последние 5 строк из файла eopc04.08.

11.8.2 Подготовка данных

Разархивировать файл сессии в директорию. Получаем файл 09jan05xa_v004, в формате МКЗ. Программой МКЗNGS2.exe переводим его в NGS-формат. Для этого в командной строке набираем команду, в общем виде выглядящую как МКЗNGS2.exe (Имя МКЗ-файла). В нашем конкретном случае это

C:\DATA\2009\MKЗNGS2.exe 09jan05xa_v004.

В результате из одного файла мы получаем два: собственно NGS-файл 090105xa.ngs и log-файл 090105xa.log. Возможно, в этих NGS-файлах пропущены метеоданные. Для исправления этого мы запускаем программу METEO.exe, расположенную в C:\DATA\2009. Она выдаёт сообщение, что для сессии 5 января нет метеоданных для станции WESTFORD, и предлагает нам их ввести вручную. Данные можно взять "из головы", то есть подобрать подходящие под местность и время года. WESTFORD находится рядом с одноименным населённым пунктом в Массачусетсе, США, север Восточного побережья. Учитывая время года, можно предполагать, что температура около 0 °C (в реаль-

ности среднесуточная 5 января 2009 года в окрестностях Вестфорда -4°C). Давление порядка 1000 гектопаскалей, влажность 70 процентов. Желающие ввести точные данные могут воспользоваться возможностями, которые предоставляют специализированные Интернет-ресурсы, но опыт показывает, что приближенные данные, основанные на знании места и времени года, позволяют получать результаты не хуже, чем полученные с помощью истинных метеоданных. "Приглашение" к вводу данных выглядит следующим образом:

Program Meteo

ngsfile=090105XA.NGS

Station without meteodata ::

1. WESTFORD

PLEASE INPUT TEMPERATURE, PRESSURE, DAMP FOR WESTFORD ::

Для ввода метеопараметров набираем строку:

-4.000 1010.000 70.000

В результате получаем файлы с расширением .out. Переименовываем их в .ngs. Создаем в C:\DATA\2009 папку 090105, после чего переносим в неё соответствующие файлы (.log и .ngs). Файл 09jan05xa_v004 можно удалить. Создаем в папке 090105 файлы kvlbi.opt. Для сессии 090105.ngs в которой участвуют 7 станций (KOKEE, TSUKUB32, WESTFORD, WETTZELL, MATERA, TIGOCONC и NYALES20), kvlbi.opt будет выглядеть следующим образом:

EOP: YES STATION COORDINATES: NO

Apriori disp for clock offset: 10000.00 (m**2)

```

Apriori disp for clock rate :      0.01  (m**2)
Apriori disp for wet trop. delay:   1.00  (m**2)
Apriori disp for trop. gradients:   0.01  (m**2)
Apriori disp for nutation:          1.00 (arcsec**2)
Apriori disp for EOP:               1.00 (arcsec**2)

```

NO.	STATIONS	7	CONST	N_EC	E_EC	H_EC	WET	CL_0	CL_1
WETTZELL	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10		
KOKEE	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000
TSUKUB32	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000
WESTFORD	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000
MATERA	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000
TIGOCONC	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000
NYALES20	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.	0.000000

Данные операции проделываются при обработке каждой РСДБ-сессии.

Подготовка файлов input.txt осуществляется единожды. Их изменение означает изменение моделей, используемых при обработке сессий, и в таком случае необходимо либо начинать новый ряд, либо совершать переобработку старого, так как научную ценность представляют однородные в плане условий получения ряды ПОЗ, поэтому здесь мы не будем их подробно описывать.

11.8.3 Обработка данных

Перед тем, как запускать файл в общую обработку, имеет смысл обработать его отдельно в тестовом режиме. Для этого формируем специальный .bat-файл.

```

echo off
cls
del statim
del sortim
del stacat
del bastim
del batch
del dictio
del meteor

```



```
del breaks.res
copy h:\iers\data\2009\090105\090105.ngs current.ngs
copy h:\iers\data\2009\090105\kvlbi.opt kvlbi.opt
h:\iers\occam6_2\dtau0.exe < input0_v.txt
h:\iers\occam6_2\pn.exe < input1_2.txt
h:\iers\occam6_2\station.exe < input2.txt
h:\iers\occam6_2\geomet.exe < input3.txt
h:\iers\occam6_2\kvlbi.exe < input8.txt
```

После его запуска смотрим файл SESS.DAT. В нём прибавилась новая строка. Смотрим на второй, третий, четвёртый, а также последний и предпоследний столбцы. В столбцах 2 и 3 – уклонения вычисленных значений координат полюса от априорных, в четвёртом – аналогичная величина для UT1-UTC, в предпоследнем – количество перевзвешенных наблюдений, в последнем – χ^2 . Если уклонения вычисленных параметров от априорных не больше 0.000300, количество перевзвешенных не больше 0 (в крайнем случае несколько в пределах десяти) и χ^2 не сильно отличается от 1, то сессию можно включать в общую обработку. В нашем случае строка имеет вид

```
54837.20751  0.000096 -0.000014  0.0000081 ...  0    0.6768
```

Сессия удачная, можно включать в общую обработку. Обновляем основной .bat-файл, добавляя в него строки из нашего тестового файла. Удаляем файл sru0004.eops. После запуска основного пакетного файла он будет создан заново. Затем заменяем значения ПОЗ, имеющиеся в нашем ряде, на те, которые есть в новом eops-файле. После чего отправляем наш ряд в обработку в IERS.

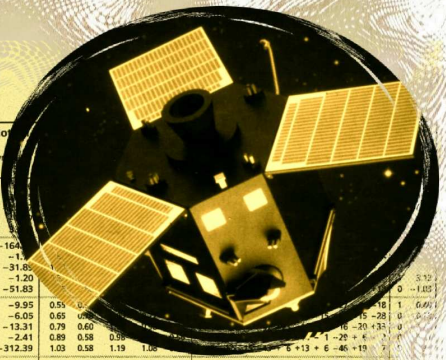
Глава 12

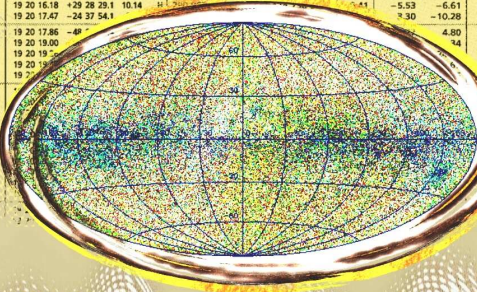
Работа с каталогом Hipparcos

19 19 52 52° 10' 49"

95001 - 95100

Number FK5 : 2	Descriptor: epoch J1991.25					Position: epoch J1991.25					Par. = mas 11 12	Proper Mo = mas/yr 11 12
	RA 3	Dec 4	mag 5	6	7	α deg 8	δ deg 9	10	μ _α 11	μ _δ 12		
95001	19 19 52.83	+35 32 16.6	8.19	H		289.970 118.39	+35.537 938.84	A	1.32	11.88		
95002	19 19 53.04	+11 32 05.7	6.03	H		289.971 001.15	+11.534 910.38	B	13.95	48.55		
95003	19 19 54.95	-29 50 44.7	10.05	G		289.978 964.53	-29.845 744.60		0.13	-0.92		
95004	19 19 54.92	-30 41 43.3	7.97	H		289.978 814.29	-30.695 359.07		6.37	1.48		
95005	19 19 55.05	+45 01 53.3	7.19	H		289.979 392.00	+45.032 021.46		6.59	13.11		





25 - 275

System	Solution	Comp.	HP	HP	Mag
ccdm	S	HP	HP	HP	HP
1	2	3	4	5	6
00003-4437	1 F C A	A	25	6.884 5.046	
00004-4711	1 F C A	A	37	10.865 2.901	
00005-6713	1 F C A	A	40	11.067 0.817	
00005-7212	1 F C A	A	45	9.880 0.812	
00006-5306	1 F C A	A	50	6.614 5.000	
00006-6641	1 F C A	A	55	7.907 0.804	
00008-3347	1 F C A	A	71	8.418 5.000	
00012-1358	1 F C A	A	70	10.387 0.840	
00014-3937	1 F C A	A	14	10.312 0.831	

12.1 Общие сведения о проекте Hipparcos

В 1989 году Европейское космическое агентство (ESA) осуществило запуск космического аппарата HIPPARCOS (High Precision PARallax Collecting Satellite – спутник для сбора высокоточных параллаксов) с целью получения положений, собственных движений и параллаксов звезд на миллисекундном уровне точности. Космический аппарат проработал на орбите 37 месяцев, в течение которых он выполнял астрометрические и фотометрические измерения звезд по заданной программе.

Обработка этих наблюдений, подробно описанная в [25], привела к созданию двух каталогов: Hipparcos, содержащего информацию о 118 218 звездах с точностью определения положений, годовых собственных движений и параллаксов на уровне 1 мсд (миллисекунда дуги), и каталога Tycho, содержащего уже свыше 1 миллиона звезд, с точностью измерения тех же параметров до 25 мсд. В табл. 12.1 приведены сравнительные характеристики этих каталогов.

Таблица 12.1: Сравнительные характеристики каталогов Hipparcos и Tycho

Каталог	Hipparcos	Tycho
Система каталога	ICRS	ICRS
Средняя эпоха наблюдений	1991.25	1991.25
Число звезд	118 218	1 058 332
Предельная звездная величина	12.4 ^m	11.5 ^m
Полнота	7.3 ^m – 9 ^m	10.5 ^m
Средние точности:		
положений	< 1 мсд	7–25 мсд
собственных движений	< 1 мсд/уг	
параллаксов	1 мсд	
фотометрии	0.002 ^m	0.06 ^m – 0.10 ^m

Результаты, полученные в проекте Hipparcos, опубликованы в печатном и электронном виде.

Печатная версия [25] занимает 16 томов документации, описывающих содержание конечных версий Hipparcos и Tycho, характеристики спутника, редуциционные процедуры, а также печатную версию каталога Hipparcos. В дальнейшем мы будем использовать ссылки на эти материалы, используя трехступенчатую структуру ссылки. Например, секция 1.2.3 означает третий

параграф второй главы первого тома.

Электронная версия состоит из шести компакт-дисков, собранных в 17-й том [25]. В дополнение к печатной версии каталогов электронная версия включает приложение для двойных и кратных звезд, кросс-идентификацию и дополнительные файлы, содержащие промежуточные стадии получения астрометрических данных. Каталог Hipparcos размещен в базе астрономических данных CDS (Страсбург), и выпущен на компакт-диске в текстовом (ASCII) формате.

Для работы с электронной версией каталогов было выпущено специальное издание на компакт-диске, называемое *Celestia 2000*. Этот диск содержит данные каталогов Hipparcos Input Catalogue, Hipparcos и Tycho вместе со специальным программным обеспечением, значительно облегчающим использование каталогов. Программное обеспечение рассчитано на работу в нескольких разных версиях ОС Microsoft Windows.

Существует информационный портал космической миссии Hipparcos¹, который поддерживается Европейским космическим агентством (ESA). Кроме основных результатов миссии, сайт содержит ссылки на самые важные и текущие публикации, полученные по материалам каталогов Hipparcos и Tycho, а также научно-популярную часть.

12.1.1 Система каталогов Hipparcos и Tycho

Положения и собственные движения звезд в каталогах Hipparcos и Tycho приводятся в фундаментальной системе ICRS (International Celestial Reference System), реализованной в настоящее время с помощью каталога внегалактических радиоисточников ICRF (International Celestial Reference Frame). Вследствие того, что внегалактические источники (кварзары) были недоступны прямому наблюдению на аппарате Hipparcos (за исключением 3С 273), пришлось использовать несколько прямых и косвенных методов, чтобы связать предварительную систему каталога Hipparcos с ICRF [8]. Следует отметить, что достигнутая точность привязки осей координат системы отсчета каталога Hipparcos к

¹<http://astro.estec.esa.nl/Hipparcos/hipparcos.html>

осям ICRF оценивается величиной 0.6 мсд по всем трем углам поворота и величиной 0.25 мсд/год по всем трем компонентам вектора остаточного взаимного вращения двух систем отсчета.

До полета спутника Hipparcos практика построения астрометрических каталогов положений и собственных движений звезд принципиально основывалась на *динамическом* определении системы отсчета и базировалась на установлении положений средней экваториальной плоскости (после исключения из вращения Земли нутационных членов) и плоскости эклиптики. Одна из точек пересечения этих плоскостей дает среднюю точку весеннего равноденствия, которая служит нуль-пунктом в отсчете прямого восхождения. Эти две плоскости не являются инерциально неподвижными, а медленно перемещаются вследствие лунно-солнечной и планетной прецессии. Для того чтобы зафиксировать систему отсчета (сделать ее инерциальной), необходимо определить некоторую дату E , на которую «заморозить» положение фундаментальных плоскостей, и с этого момента установить оси небесной системы координат. В терминологии классической астрометрии эпоха E определяла равноденствие и экватор каталога (например, J2000). Преобразование координат между системами разных равноденствий E_1 и E_2 выражается в поправках к положениям звезд, вызванных накоплением действия прецессии между двумя этими датами. Этот процесс зависит от принятой динамической теории прецессии и получаемой эмпирически постоянной прецессии и других констант теории. В связи с принятием ICRS, в которой ориентация осей зафиксирована раз и навсегда, средняя экваториальная плоскость и эклиптика потеряли свое фундаментальное значение как основы системы отсчета. По этой причине отпадает необходимость в указании эпохи системы каталога, хотя нуль-пункт отсчета прямых восхождений каталога ICRF формально близок к положению динамического равноденствия эпохи J2000.

При сопоставлении каталогов Hipparcos и Tycho с классическими астрометрическими каталогами следует принять во внимание следующие обстоятельства.

С одной стороны, можно считать, что каталоги Hipparcos и Tycho являются первыми широкомасштабными реализациями ICRS

в оптическом диапазоне, с другой стороны, их можно рассматривать как расширение и улучшение системы FK5 J2000 с сохранением глобальной ориентации этой системы, но без зональных систематических ошибок. Но следует еще раз подчеркнуть, что и каталог Hipparcos, и каталог Tycho привязаны не к системе FK5, а к системе ICRF.

Тот факт, что положения звезд каталогов миссии Hipparcos приведены в системе ICRS, означает, что они непротиворечивы по отношению к современной внегалактической радиосистеме координат. Для собственных движений это означает, что они показывают угловые скорости звезд по отношению к лучшей на сегодняшний день реализации инерциальной системы отсчета (т.е. не вращающейся по отношению к удаленным галактикам).

Так как параллаксы звезд получены исключительно в процессе обработки данных космического аппарата, направления на звезды, представленные прямым восхождением и склонением на эпоху каталога $T_0 = J1991.25$, являются строго барицентрическими. В предшествующих астрометрических каталогах неопределенность, вызванная параллактическим смещением, проникала в окончательные координаты звезд каталога.

В то время как собственные движения звезд, полученные из наземных наблюдений, традиционно определялись на разности эпох от 20 до 50 лет, собственные движения каталога Hipparcos определены на временном базисе всего в несколько лет. «Наземные» собственные движения дают среднее значение движения звезды за период несколько декад, а собственные движения каталога Hipparcos можно назвать почти мгновенными. Здесь нет никакого противоречия до тех пор, пока мы имеем дело с равномерно движущейся звездой, по крайней мере, одиночной. Однако много видимых одиночных звезд являются в реальности двойными и движение компонент или фотоцентра двойной звезды может быть в значительной мере неравномерным. Для таких объектов может наблюдаться значительное разногласие между «наземными» и «космическими» собственными движениями, которые нельзя приписать случайным ошибкам или разностями между фундаментальными системами.

12.1.2 Входной каталог

В процессе выполнения наблюдательной программы на аппарате использовался Hipparcos Input Catalogue (HIC) – Входной каталог миссии Hipparcos. Он содержал список звезд и объектов Солнечной системы, составивших подробную наблюдательную программу. Этот каталог представляет собой компиляцию наземных данных астрометрического и астрофизического характера, необходимых для формулирования и выполнения научной программы.

12.1.3 Обозначения и размерности астрометрических параметров

Каждая запись (информация о звезде) каталога HIC предваряется номером. Та же нумерация строго сохранена в финальном каталоге, поэтому номера звезд по каталогу Hipparcos совпадают с HIC. Для размещения других данных о звезде запись делится на поля. Описание всех 77 полей каталога Hipparcos можно найти в Приложении А в [19].

Основные астрометрические данные, содержащиеся в каталогах Hipparcos и Tycho, состоят из положений, собственных движений и тригонометрических параллаксов звезд. Hipparcos – первый в мире каталог, содержащий индивидуальные высокоточные параллаксы и собственные движения для всех звезд, включенных в наблюдательную программу.

Стандартная астрометрическая модель для одиночной звезды (см. [25], секция 1.2.8) предполагает прямолинейное движение звезды относительно барицентра Солнечной системы. Поэтому для описания положения и движения звезды на некоторую эпоху T_0 используются следующие шесть параметров:

- барицентрические координаты направления на звезду – прямое восхождение α и склонение δ ; в каталоге единицы измерения этих величин – градусы и их десятичные доли;
- годичный параллакс π (в каталоге единица измерения – мсд – угловая миллисекунда); с достаточной точностью можно полагать, что $1000\pi^{-1}$ дает расстояние до звезды в парсеках;

- собственные движения $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ в угловых миллисекундах за юлианский год (мсд/год);
- лучевая скорость (км/с).

Лучевые скорости обычно получаются из спектроскопических наблюдений. К сожалению, на борту аппарата такие измерения не велись. Оставшиеся астрометрические параметры, так называемые «пять астрометрических параметров», определялись из анализа наблюдений спутника HIPPARCOS и даны почти для всех звезд каталога (117 955).

Для большинства звезд, включая даже компоненты кратных систем, модель пяти параметров оказалась вполне адекватной. Однако для нескольких тысяч звезд такая стандартная модель не дает достаточно хорошего приближения к наблюдениям. Вероятно, это двойные звезды, у которых фотоцентр описывает кривую траекторию на небесной сфере, вызванную орбитальным движением компонент относительно общего центра масс. Для таких «астрометрических двойных» стандартная модель требует введения дополнительных параметров, чтобы добиться лучшего согласия с наблюдениями. В большинстве случаев хорошее эмпирическое совпадение было получено путем включения одного или двух членов ряда Тейлора в разложении вариации барицентрического направления на звезду по степеням времени. В нескольких сотнях случаев и этого оказалось недостаточно. Для таких звезд была применена кеплеровская модель орбитального движения фотоцентра (иногда базирующаяся на наземных данных). Такие решения даны в Приложении двойных и кратных систем ([25], том 10).

Для работы с каталогом Hipparcos используется шкала времени TT (Terrestrial Time) (см. [25], секция 1.2.3). Положения звезд и их собственные движения даны на одну общую эпоху $T_0 = J 1991.25$ (не путать с фундаментальной эпохой!).

В ICRS можно выбрать и использовать экваториальные координаты прямое восхождение α и склонение δ . Собственные движения звезд являются скоростями изменения их координат:

$$\mu_\alpha = \frac{d\alpha}{dt}, \quad \mu_\delta = \frac{d\delta}{dt}. \quad (12.1)$$

По традиции, вызванной удобством использования и сравнения с

μ_δ , вместо величины μ_α используют нормированную к большому кругу величину μ_{α^*} :

$$\mu_{\alpha^*} \equiv \mu_\alpha \cos \delta, \quad (12.2)$$

которая и приведена и в электронной, и в печатной версиях каталогов. К примеру, в этих обозначениях полное собственное движение звезды выражается формулой

$$\mu = \sqrt{\mu_{\alpha^*}^2 + \mu_\delta^2}, \quad (12.3)$$

а позиционный угол θ собственного движения определяется формулами

$$\mu_{\alpha^*} = \mu \sin \theta, \quad \mu_\delta = \mu \cos \theta. \quad (12.4)$$

Отметим, что в литературе можно встретить написание $-\mu_\alpha \cos \delta$ или даже $\mu \cos \delta$, в последнем случае собственное движение по склонению обозначают через μ' .

Стандартные ошибки в положении по прямому восхождению также приведены к большому кругу множителем $\cos \delta$: $\sigma_{\alpha^*} \equiv \sigma_\alpha \cos \delta$. Таким образом, полная ошибка положения звезды выражается формулой

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\alpha^*}^2 + \sigma_\delta^2}, \quad (12.5)$$

причем σ_{α^*} не имеет систематического хода по склонению. Например, её значение при $\delta = 80^\circ$ составляет для большинства звезд около 1 мсд, в то время как σ_α достигает 6 мсд.

Аналогично, через $\sigma_{\mu_\alpha^*} \equiv \sigma_{\mu_\alpha} \cos \delta$ представляется ошибка собственного движения, а выражение для полной ошибки собственного движения принимает вид

$$\sigma_\mu = \sqrt{\sigma_{\mu_\alpha^*}^2 + \sigma_{\mu_\delta}^2}. \quad (12.6)$$

В звездных каталогах прямое восхождение и склонение традиционно приводятся в шестидесятеричной системе, причем прямое восхождение – еще и во временных единицах, т.е. α измеряется в часах, минутах и секундах времени, а δ в градусах, минутах и секундах дуги. Естественно, такая запись неудобна для современных вычислений. Публикация каталогов *Hipparcos* и *Tycho* представляла идеальную возможность для установления нового стандарта. Было решено использовать градусы и их десятичные доли для всех координат на небесной сфере, а для стандартных

ошибок, параллаксов и годовых собственных движений – миллисекунды дуги.

Тем не менее, для облегчения идентификации приблизительные прямые восхождения и склонения даются для каждого объекта и в шестидесятеричной системе. Однако в связи с более низкой точностью представления этих данных в каталоге (прямое восхождение – до сотых долей секунды времени, склонение до десятой доли угловой секунды) не следует использовать эти координаты (поля НЗ, Н4) в вычислительных задачах.

Астрометрические параметры, как и другие наблюдаемые величины, даны в каталоге с достаточным числом десятичных цифр, чтобы избежать ошибок округления для самых точных величин. В результате менее точные данные могут содержать несколько незначащих десятичных знаков в конце.

12.1.4 Вариационно-ковариационные данные и корреляции

Процедура построения окончательной версии каталога Hipparcos заключалась в определении из наблюдений поправок к некоторым начальным значениям. Например, для начального значения склонения δ_0 определялась поправка $\Delta\delta$. Всего методом наименьших квадратов оценивались значения пяти переменных:

$$\begin{aligned} a_1 &= \Delta\alpha_* \equiv \Delta\alpha \cos \delta, & a_2 &= \Delta\delta, \\ a_3 &= \pi, \\ a_4 &= \mu_{\alpha_*} \equiv \mu_{\alpha} \cos \delta, & a_5 &= \mu_{\delta}. \end{aligned} \quad (12.7)$$

В контексте метода наименьших квадратов информация о качестве оценки неизвестных a_j содержится в ковариационной матрице с элементами

$$c_{ii} = \sigma_i^2, \quad c_{ij} = \rho_{ij}\sigma_i\sigma_j, \quad i, j = 1, \dots, 5, \quad (12.8)$$

где σ_i – стандартная ошибка оцениваемого параметра, а ρ_{ij} – коэффициенты корреляции.

В каталоге для коэффициентов корреляции используется следующая схема обозначений:

$$\rho_{\alpha_*}^{\delta} = \rho_{21}, \quad \rho_{\alpha_*}^{\pi} = \rho_{31}, \quad \rho_{\delta}^{\pi} = \rho_{32}, \quad \rho_{\alpha_*}^{\mu_{\alpha_*}} = \rho_{41}, \quad \dots, \quad \rho_{\mu_{\alpha_*}}^{\mu_{\delta}} = \rho_{54}. \quad (12.9)$$

Эта последовательность соответствует треугольной части корреляционной матрицы, расположенной ниже главной диагонали в построчном порядке (или верхней части в порядке по колонкам).

В печатной версии каталога Hipparcos приводится только 10 коэффициентов корреляции среди пяти астрометрических параметров, в то время как в электронной версии приведен полный набор коэффициентов корреляции, включая сложные случаи для двойных и кратных систем. Корреляции необходимы для правильной оценки стандартных ошибок при переводе координат с одной эпохи на другую (см. следующую секцию).

12.1.5 Преобразование астрометрических данных

Над астрометрическими данными каталогов Hipparcos и Tycho определены следующие преобразования: переходы из экваториальной системы координат в эклиптическую и из экваториальной системы в галактическую, а также перевод данных с эпохи $T_0 = J1991.25$ (ТТ) на произвольную эпоху T . Хотя эти или подобные преобразования обсуждаются во многих книгах и учебниках, однако в случае каталогов миссии Hipparcos они имеют специфические особенности.

В эклиптических координатах астрометрические параметры обозначаются как $\lambda, \beta, \pi, \mu_{\lambda^*}, \mu_{\beta}$, аналогично в галактической системе координат – $l, b, \pi, \mu_{l^*}, \mu_b$. Здесь, как обычно, $\mu_{\lambda^*} \equiv \mu_{\lambda} \cos \beta$ и $\mu_{l^*} \equiv \mu_l \cos b$. Индекс «0» означает, что данные относятся к эпохе каталога T_0 .

Преобразование координат из экваториальной системы в эклиптическую производится по следующим формулам:

$$\begin{pmatrix} \cos \beta \cos \lambda \\ \cos \beta \sin \lambda \\ \sin \beta \end{pmatrix} = R_k \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix}, \quad (12.10)$$

где

$$R_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9174820621 & 0.3977771559 \\ 0 & -0.3977771559 & 0.9174820621 \end{pmatrix}, \quad (12.11)$$

а $\varepsilon = 23^\circ 26' 21.448'' = 23.4392911111^\circ$ – принятое значение наклона эклиптики к экватору на эпоху J2000.

В системе ICRS значения координат галактического полюса определены как

$$\begin{aligned}\alpha_G &= 192.85948^\circ, \\ \delta_L &= +27.12825^\circ,\end{aligned}\tag{12.12}$$

а разность между восходящим узлом галактического экватора и нуль-пунктом долгот

$$l_\Omega = 32.93192^\circ.\tag{12.13}$$

Значения (12.12) и (12.13) находятся в полном согласии с предыдущим (1960 г.) определением положения галактической системы координат с точностью, которая достигалась в оптическом диапазоне. Связь между галактическими и экваториальными координатами задается выражением

$$\begin{pmatrix} \cos b \cos l \\ \cos b \sin l \\ \sin b \end{pmatrix} = \mathbf{R}_G^{-1} \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix},\tag{12.14}$$

где

$$\mathbf{R}_G = \begin{pmatrix} -0.0548755604 & 0.4941094279 & -0.8676661490 \\ -0.8734370902 & -0.4448296300 & -0.1980763734 \\ -0.4838350155 & 0.7469822445 & 0.4559837762 \end{pmatrix}.\tag{12.15}$$

Формулы для вычисления собственных движений можно найти путем дифференцирования выражений (12.10) и (12.14) по времени. Элементы матриц (12.11) и (12.15) при этом считаются постоянными. Значения элементов этих матриц даны на фундаментальную эпоху J2000.

Можно использовать и традиционный способ вычисления галактических собственных движений через матрицу поворота:

$$\begin{pmatrix} \mu_{l^*} \\ \mu_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_{\alpha^*} \\ \mu_\delta \end{pmatrix},\tag{12.16}$$

здесь φ – угол, под которым из данной точки небесной сферы видны полюс Галактики и полюс мира. Этот угол может быть

найден с помощью следующих формул:

$$\begin{aligned}\sin \varphi &= \frac{\cos \delta_G \cos(l - l_\Omega)}{\cos \delta}, \\ \cos \varphi &= \frac{\cos b \sin \delta_G - \sin b \cos \delta_G \sin(l - l_\Omega)}{\cos \delta}.\end{aligned}\quad (12.17)$$

Простейшие формулы пересчета небесных координат звезды α и δ с эпохи T_0 на произвольную эпоху T выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha_0 + (T - T_0)\mu_{\alpha^*0} \sec \delta_0, \\ \delta &= \delta_0 + (T - T_0)\mu_{\delta 0}.\end{aligned}\quad (12.18)$$

Множитель $\sec \delta_0$ введен для компенсации множителя $\cos \delta_0$, входящего по определению в μ_{α^*0} . Среднеквадратичные ошибки преобразованных координат могут быть вычислены с помощью формул

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha^*}^2 &= [\sigma_{\alpha^*}^2 + 2t\rho_{\alpha^*}^{\mu_{\alpha^*}} \sigma_{\alpha^*} \sigma_{\mu_{\alpha^*}} + t^2 \sigma_{\mu_{\alpha^*}}^2]_0, \\ \sigma_{\delta}^2 &= [\sigma_{\delta}^2 + 2t\rho_{\delta}^{\mu_{\delta}} \sigma_{\delta} \sigma_{\mu_{\delta}} + t^2 \sigma_{\mu_{\delta}}^2]_0.\end{aligned}\quad (12.19)$$

где $t = T - T_0$ — разность эпох, а все величины в правой части относятся к эпохе T_0 .

Если вспомнить, что в процессе движения звезды в пространстве изменяются ее расстояние от Солнца и собственное движение, то становится ясным, что модель (12.18) не очень хороша с физической точки зрения. Хотя разность по отношению к точной модели обычно очень мала, но все-таки в некоторых случаях, особенно для звезд, близких к полюсам или на больших временных периодах, она может быть значимой. Поэтому уравнения (12.18) не следует использовать в программах, предназначенных для универсального применения. Тем не менее, в большинстве случаев и в оценочных вычислениях их точность вполне достаточна.

Строгое преобразование параметров и ковариационных матриц встроено в программу Celestia 2000. Из-за относительной сложности этих преобразований ASCII CD-ROM-1 ([25], секция 2.11) содержит тексты программы на языках Fortran и C, реализующих этот алгоритм.

12.1.6 Фотометрические системы каталогов *Tycho* и *Hipparcos*

Фотометрические измерения на основном инструменте спутника HIPPARCOS выполнялись в широкой полосе. Результаты этих измерений, обозначенные как H_P , приведены в поле H44. В дополнение, почти для всех звезд каталога *Tycho* (в том числе и звезд *Hipparcos*, которые имеются в *Tycho*) была выполнена двухцветная фотометрия (соответственно величины V_T и B_T - поля H32, H34). Точность определения H_P составляет 0.0004^m – 0.007^m (для звезд $2 - 12^m$), а точность одного измерения – от 0.003^m до 0.05^m . Для большинства звезд *Hipparcos* типичное значение ошибки H_P – около 0.0015^m , а индивидуальной ошибки одного измерения – 0.011^m . Точность фотометрической системы *Tycho* составляет около 0.012^m для звезд ярче 9^m и около 0.06^m для более слабых звезд.

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

$$V_J = V_T - 0.090(B - V)_T, \quad (12.20)$$

$$(B - V)_J = 0.850(B - V)_T. \quad (12.21)$$

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

Формальные ошибки величин V_J и $(B - V)_J$ выражаются формулами

$$\sigma_{V_J} = \sqrt{1.09\sigma_{V_T}^2 + 0.09\sigma_{B_T}^2}, \quad (12.22)$$

$$\sigma_{(B-V)_J} \approx G \cdot \sqrt{\sigma_{V_T}^2 + \sigma_{B_T}^2}, \quad (12.23)$$

где множитель G принимает значения от 0.79 до 0.97 в зависимости от показателя цвета звезды.

Для удобства использования в основном каталоге Hipparcos приведены величины V_J и $(B - V)_J$ (поля H5, H37). Кроме того, указан источник получения этих параметров: наземные наблюдения, фотометрия Tycho и пр. (поля H7, H39).

12.2 Работа с ASCII версией каталога Hipparcos

Для широкого круга астрономов Европейское космическое агентство выпустило CD-ROM "Celestia"², содержащий данные каталогов Hipparcos Input Catalogue, Hipparcos и Tycho, а также программное обеспечение, которое позволяет делать выборки из каталогов по многим критериям и их комбинациям, строить визуализации каталога на небесной сфере, получать подробную информацию о конкретной звезде. Программа Celestia распространяется только для программных платформ Windows.

Несмотря на большие возможности программы Celestia 2000, существует большое число задач, которые не могут быть решены с ее помощью. Например, сбор различных статистических характеристик: распределение по расстояниям, абсолютной звездной величине и т.п.; построение диаграммы Герцшпрунга–Рессела для различных выборок звезд; изучение распределения звезд в пространстве и разнообразные звездно-кинематические исследования. Для проведения такого рода исследований придется прибегнуть к программированию на универсальных языках высокого уровня (C/C++, Fortran, Pascal/Delphi и т. п.) с использованием полных версий каталогов.

Полная электронная версия каталогов включает 6 компакт-дисков. Главный из них – первый, он содержит собственно каталоги Hipparcos и Tycho объемом 53 и 373 Мбайт соответственно. Остальные компакт-диски содержат информацию о двойных и кратных звездах, кривые блеска переменных звезд, фотометрические приложения к Hipparcos и Tycho, времена прохождения звезд через решетку аппарата, а также полную документацию. Эти диски поступили в библиотеку Астрономического институ-

²<http://astro.estec.esa.nl/Hipparcos/CELESTIA/celestia-pr.html>.

Таблица 12.2: Наиболее употребимые в кинематических исследованиях параметры звезд

Байты	Формат	Ед. изм.	Пояснение
3-14	I12		Номер по Hipparcos
52-63	F12.8	градусы	Прямое восхождение (ICRS, J1991.25)
65-76	F12.8	градусы	Склонение (ICRS, J1991.25)
80-86	F7.2	мсд	Тригонометрический параллакс
88-95	F8.2	мсд/год	Собственное движение $\mu_\alpha \cos \delta$ (ICRS)
97-104	F8.2	мсд/год	Собственное движение μ_δ (ICRS)
78	A1		Флаг для кратных систем [A, B, ..., +, *]
42-46	F5.2	mag	Звездная величина V_J по шкале Джонсона
246-251	F6.2	mag	Показатель цвета $(B - V)_J$ в системе Джонсона
106-111	F6.2	мсд	Ошибка прямого восхождения ($\cdot \cos \delta$)
113-118	F6.2	мсд	Ошибка склонения
120-125	F6.2	мсд	Ошибка параллакса
127-132	F6.2	мсд/год	Ошибка собственного движения $\mu_\alpha \cos \delta$
134-139	F6.2	мсд/год	Ошибка собственного движения μ_δ
436-447	A10		Спектральный класс

та СПбГУ, так как сотрудники института принимали участие в работе над проектом Hipparcos, и копии их доступны всем желающим.

12.2.1 Программы чтения каталога

Напишем программный модуль (листинг 1), читающий из основного каталога Hipparcos только те поля, которые наиболее часто используются в звездно-кинематических исследованиях (табл. 12.2).

Основное изложение проведем на языке Fortran-90, широко используемом в научной среде.

Хранить прочитанные из полной версии каталога Hipparcos данные о звезде мы будем в структуре. Такой способ организации данных есть во всех современных языках программирования. Это позволяет манипулировать прочитанной записью о звезде как единым целым. Для учета пустых полей применим стандартный подход – битовую маску – целочисленную переменную, установка отдельных битов которой обозначает наличие тех или иных данных. С помощью логической операции AND и набора констант будет легко осуществить контроль прочитанной информации. Забегая вперед, скажем, что «полноценных» звезд,

для которых заполнено большинство полей в Hipparcos – 117955, для 263 звезд нет точной астрометрической информации (собственных движений, параллакса) и многих других параметров. Это в основном слабые звезды, использовавшиеся для привязки каталога к системе квазаров.

В начале модуля определены константы, определяющие местоположение каталога и количество звезд в нем.

Модуль экспортирует три функции: OpenHipparcosMain, открывающую каталог, CloseHipparcosMain, закрывающую каталог, ReadHipparcosName, читающую одну запись из каталога, заполняя структуру типа THipparcos.

Функция ReadHipparcosMain читает далеко не все поля каталога, однако нет никаких трудностей в дополнении записи THipparcos другими полями и по приведенному образцу прочитать их значения из текстового буфера hs.

Программа TestHip (листинг 2) подсчитывает: сколько звезд в каталоге Hipparcos не имеют данных о точных координатах, собственных движениях и параллаксах. Результат работы программы покажет, что во всех случаях 263 звезды не имеют данных о точных координатах, собственных движениях и параллаксах.

Листинг 1. Модуль HipMain чтения каталога Hipparcos

```
MODULE HipMain
IMPLICIT NONE

! Расположение полной версии каталога Hipparcos
CHARACTER(*), PARAMETER :: HipparcosName = 'D:\HIP\hip_main.dat'

INTEGER, PARAMETER :: HipNumOfStars = 118218 ! Число звезд

INTEGER, PARAMETER :: u = 10 ! Номер файла

TYPE THipparcos
SEQUENCE
INTEGER(4) :: HIP ! Номер звезды по Hipparcos
```

```

! Астрометрическая информация
REAL(8) :: RAdeg,DEdeg ! экваториальные координаты в градусах
REAL(8) :: Plx          ! тригонометрический параллакс в мсд
REAL(8) :: pmRa,pmDE   ! собственные движения  $\mu\alpha\cos(d)$  и  $\mu\delta$ 
CHARACTER(1) :: AstroRef ! Флаг для кратных систем

! Фотометрическая информация
REAL(4)  :: VMag      ! Звездная вел. по шкале Джонсона
REAL(4)  :: B_V      ! Показатель цвета B-V по шкале Джонсона

! Ошибки соответствующих величин
REAL(8)  :: sigma_RAdeg,sigma_DEdeg
REAL(8)  :: sigma_Plx
REAL(8)  :: sigma_pmRa,sigma_pmDE

CHARACTER(10) Sp ! Развернутый спектральный класс

LOGICAL NoRaDe ! Нет данных о точных координатах
LOGICAL NoPlx  ! Нет данных о параллаксе
LOGICAL NoRpm  ! Нет данных о собственных движениях
LOGICAL NoVMag ! Нет данных о звездной величине
LOGICAL NoB_V  ! Нет данных о показателе цвета

END TYPE THipparcos

CONTAINS

SUBROUTINE OpenHipparcosMain ! Открытие файла каталога
  OPEN(u, file = HipparcosName)
END SUBROUTINE OpenHipparcosMain

SUBROUTINE CloseHipparcosMain ! Закрытие файла каталога
  CLOSE(u)
END SUBROUTINE CloseHipparcosMain

```

```

LOGICAL FUNCTION ReadHipparcosMain(s) ! Чтение данных о звезде
TYPE(THipparcos), INTENT(out) :: s
CHARACTER(450) hs ! Запись строки каталога

IF (EOF(u)) THEN
  ReadHipparcosMain=.false.
  RETURN
ELSE
  ReadHipparcosMain=.true.
END IF

READ(u,'(A450)') hs ! Чтение одной строки каталога

! Сбрасываем флаги событий
s.NoRaDe = .False.
s.NoPlx  =.False.
s.Nopm   =.False.
s.NoVMag =.False.
s.NoB_V  =.False.

! Интерпретация с 12 байт, начиная с 3-го - это номер HIP
read(hs(3:14),*) s.hip

! Чтение координат: по 12 байт с 52 и с 65 позиции
! Функция TRIM удаляет из строки пробелы, а LEN возвращает длину
! строки, соответственно, если это 0, то в строке только пробелы
IF (LEN(TRIM(hs(52:63)))) == 0) THEN
  s.NoRaDe=.true.
  s.RADeg=0.0 ! на всякий случай записываем 0
ELSE
  READ(hs(52:63),*) s.RAdeg
END IF

IF (LEN(TRIM(hs(65:76)))) == 0) THEN
  s.NoRaDe=.true.

```

```
s.DEdeg=0.0
ELSE
  read(hs(65:76),*) s.DEdeg
END IF
```

```
! Чтение параллакса - 7 байт с 80-й позиции
```

```
IF (LEN(TRIM(hs(80:86)))) == 0) THEN
```

```
  s.NoPlx=.true.
```

```
  s.Plx=0.0
```

```
ELSE
```

```
  read(hs(80:86),*) s.Plx
```

```
END IF
```

```
! Чтение собственных движений: по 8 байт с 88 и с 97 позиции
```

```
IF (LEN(TRIM(hs(88:95)))) == 0) THEN
```

```
  s.NoPM=.true.
```

```
  s.pmRA=0.0
```

```
ELSE
```

```
  read(hs(88:95),*) s.pmRA
```

```
END IF
```

```
IF (LEN(TRIM(hs(97:104)))) == 0) THEN
```

```
  s.NoPM=.true.
```

```
  s.pmDE=0.0
```

```
ELSE
```

```
  read(hs(97:104),*) s.pmDE
```

```
END IF
```

```
s.AstroRef=hs(78:78) ! Флаг кратной звезды
```

```
! Чтение зв.величины и показателя цвета B-V по шкале Джонсона
```

```
IF (LEN(TRIM(hs(42:46)))) == 0) THEN
```

```
  s.NoVMag=.true.
```

```
  s.VMag=0.0
```

```
ELSE
```

```
  read(hs(42:46),*) s.VMag
```

```

END IF

IF (LEN(TRIM(hs(246:251))) == 0) THEN
  s.NoB_V=.true.
  s.B_V=0.0
ELSE
  read(hs(246:251),*) s.B_V
END IF

! Данные об ошибках всегда есть, если присутствуют сами величины
IF (.NOT. s.NoRADE) THEN
  read(hs(106:111),*) s.sigma_RAdeg
  read(hs(113:118),*) s.sigma_DEdeg
ENDIF

IF (.NOT. s.NoPlx) THEN
  read(hs(120:125),*) s.sigma_Plx
END IF

IF (.NOT. s.Nopm) THEN
  read(hs(127:132),*) s.sigma_pmRA
  read(hs(134:139),*) s.sigma_pmDE
END IF

s.Sp=hs(436:445) ! Чтение данных о спектральном классе

END FUNCTION ReadHipparcosMain

END MODULE HipMain

```

Листинг 2. Программа TestHip. Подсчет звезд без данных о координатах, собственных движениях и параллаксах

```

PROGRAM TestHip
USE HipMain

INTEGER(4) :: NoCoord = 0 ! Счетчик звезд без точных координат

```

```
INTEGER(4) :: NoProp = 0 ! Счетчик звезд без собств. движений
INTEGER(4) :: NoPar = 0 ! Счетчик звезд без параллаксов
```

```
TYPE(THipparcos) :: s
```

```
CALL OpenHipparcosMain
```

```
DO WHILE (ReadHipparcosMain(s))
  ! Сравнение логических переменных
  IF (s.NoRADE) NoCoord= NoCoord+1
  IF (s.NoPm) NoProp = NoProp+1
  IF (s.NoPlx) NoPar = NoPar+1
END DO
```

```
CALL CloseHipparcosMain
```

```
print *, 'No coord ', NoCoord
print *, 'No PM ', NoProp
print *, 'No Par ', NoPar
```

```
END PROGRAM TestHip
```

12.2.2 Программа отбора звезд

Мы можем реализовать несложные критерии отбора звезд. Например, напишем программу, которая построила бы распределение звезд Hipparcos по абсолютной звездной величине с шагом в одну величину для звезд, относительная точность определения параллаксов которых лучше, чем 50%. Программа AbsMagDistrib (листинг 3) решает поставленную задачу. Результат, обработанный в электронной таблице, представлен на рис. 12.1.

Листинг 3. Программа AbsMagDistrib. Вычисление распределения звезд по абсолютной звездной величине

```
PROGRAM AbsMagDistrib
USE HipMain

INTEGER, PARAMETER :: LOW = -12, HIGH=+12
TYPE(Hipparcos) :: s;
INTEGER(4) :: a(-12:+12) = 0 ! статистика
INTEGER(4) :: i ! вспомогательная переменная
REAL(8) :: r ! расстояние
REAL(8) :: m ! абсолютная звездная величина

CALL OpenHipparcosMain();
DO WHILE (ReadHipparcosMain(s))
  IF (s.NoPlx) CYCLE ! нет данных о паралл.
  IF (s.Plx<=0.0) CYCLE ! неположительный параллакс
  IF (s.sigma_plx/s.plx>0.5) CYCLE ! точность хуже 50%
  r=1000.0/s.plx; ! Вычисление расстояния в пк
  m=S.VMag-5.0*log10(r)+5.0 ! Вычисл. абсолютной звезд. величины
  i=FLOOR(m+0.5) ! Определение индекса ячейки массива
  IF ( (i>=low) .and. (i<=high)) a(i)=a(i)+1 ! ув.на 1
END DO
CALL CloseHipparcosMain()
PRINT '(I3,1X,I7)',(i,a(i),i=-12,12)
END PROGRAM
```

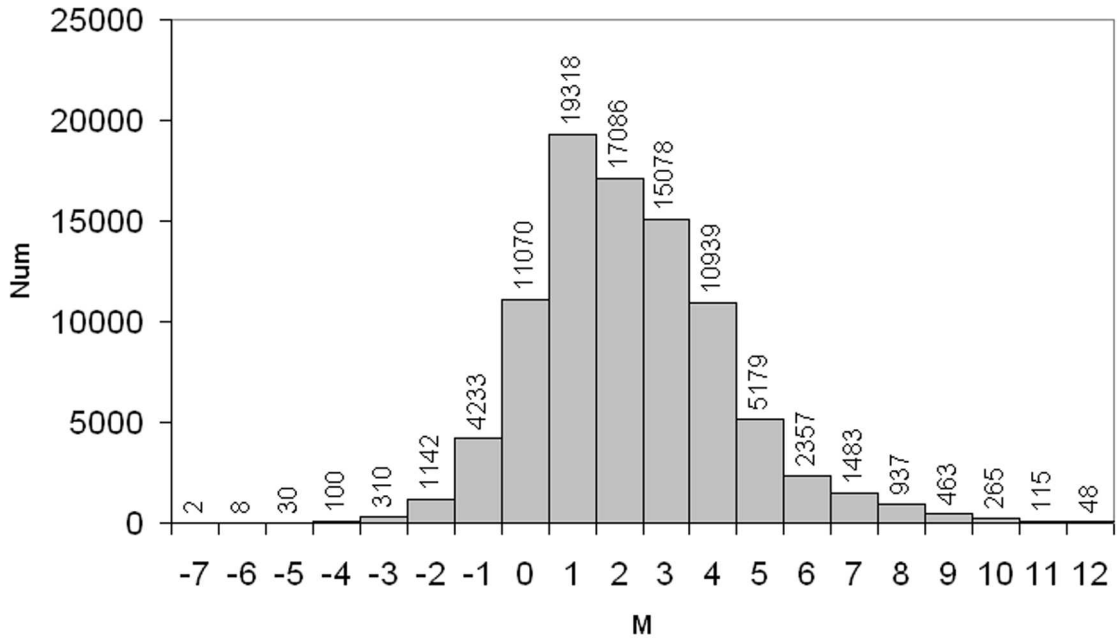



Рис. 12.1: Распределение звезд каталога Hipparcos по абсолютной звездной величине

12.2.3 Программа распределения звезд каталога Hipparcos на небесной сфере

Для построения распределения звезд на небесной сфере широко используется проекция Хаммера–Айтофа, она была принята в качестве основной в описании к каталогу Hipparcos. Следующие формулы описывают проекцию Хаммера–Айтофа для сферической галактической системы координат:

$$\begin{aligned}
 x &= -\frac{2 \cos b \sin \frac{l}{2}}{\sqrt{1 + \cos b \cos \frac{l}{2}}}, \\
 y &= -\frac{\sin b}{\sqrt{1 + \cos b \cos \frac{l}{2}}}, \quad l \in [-\pi, +\pi].
 \end{aligned}
 \tag{12.24}$$

Здесь

l, b – галактические координаты, выраженные в радианах, причем долготу l следует привести в диапазон $[-\pi, +\pi]$;

x, y – декартовы координаты на плоскости; x будет находиться в диапазоне $[-1, +1]$, а y – в диапазоне $[-2, +2]$, начало координат $(0, 0)$ соответствует направлению на центр Галактики.

Напишем программу, которая строит изображения звезд в этой проекции. Для начала напишем две процедуры Aitoff и AitoffGrid (листинг 4). Первая будет переводить сферические галактические координаты в декартовы по формулам (12.24), а вторая – наносит координатную сетку. Хотя она несколько громоздка, но никаких алгоритмических сложностей в ней нет. Следует отметить, что перевода в экранные целочисленные координаты не требуется, поскольку в стандартной библиотеке языка FORTRAN можно выбрать любую удобную декартову систему с вещественными значениями координат.

Листинг 4. Процедуры перевода координат и нанесения координатной сетки

```

MODULE Projection
USE DFLIB

IMPLICIT NONE

REAL(8), PARAMETER :: PI = 3.1415926535897932384626433832795

CONTAINS

SUBROUTINE Aitoff(l,b,x,y)
  REAL(8), INTENT(IN) :: l,b ! Сферические координаты в радианах
  REAL(8), INTENT(OUT) :: x,y ! Декартовы координаты
  REAL(8) :: s, l1 ! Вспомогательные переменные
  IF (l>PI) THEN ! Приведение l в диапазон -Pi до +Pi
    l1=l-2*PI
  ELSE
    l1=l
  END IF
  S=sqrt(1.0+cos(b)*cos(l1/2)) ! Знаменатель формул (4.1)
  x=-2*cos(b)*sin(l1/2)/s
  y=sin(b)/s
END SUBROUTINE Aitoff

```

```

REAL(8) FUNCTION radi(x) ! Перевод градусов в радианы
INTEGER, INTENT(IN) :: x
  radi=x/180.0*PI
END FUNCTION radi

REAL(8) FUNCTION rad(x) ! Перевод градусов в радианы
REAL(8), INTENT(IN) :: x
  rad=x/180.0*PI
END FUNCTION rad

SUBROUTINE AitoffGrid (Step,Gr)

  INTEGER, INTENT(IN) :: Step ! Шаг сетки в градусах
  LOGICAL, INTENT(IN) :: Gr ! Флаг - в градусах или в часах

  INTEGER :: i,j ! Переменные циклов do
  REAL(8) :: l,b ! Галактические координаты
  REAL(8) :: x,y ! Декартовы координаты
  CHARACTER(8) s ! Строка для подписей
  INTEGER :: h ! Для разметки осей

  TYPE (wxycord) wxu
  INTEGER(2) :: status2
  INTEGER(4) :: status4

  ! Нанесение сетки меридианов

  status4 = SetColorRGB(#00FF00)

  DO i=-180,+180,Step
    l=radi(i) ! Перевод в радианы

    DO j=-90,+90,5 ! Цикл построения вдоль меридиана
      ! Вычисление точки меридиана
      b=radi(j) ! Перевод в радианы широты
      CALL Aitoff(l,b,x,y) ! Перевод в декартовы координаты
    END DO
  END DO

```

```

! Если точка первая (j=-90), то помещаем графический курсор
! в точку (x,y) функцией MoveTo_W, если точка не первая, то
! "прочерчиваем" курсором линию из предыдущей точки
! в точку (u,v) функцией LineTo_W.
IF (j== -90) THEN
    CALL MoveTo_W(x,y,wxy)
ELSE
    status2=LineTo_W(x,y);
END IF
END DO ! j

```

```

END DO ! i

```

```

! Нанесение сетки параллелей - аналогично предыдущему
DO j=-90,+90,Step
    b=radi(j)
    DO i=-180,+180,5 ! цикл построения вдоль параллели
        l=radi(i)
        CALL Aitoff(l,b,x,y);
        IF (i== -180) THEN
            CALL MoveTo_W(x,y,wxy)
        ELSE
            status2=LineTo_W(x,y)
        END IF
    END DO ! i
END DO ! j

```

```

status2=SetFont('t' 'Arial' 'h10')
status4 = SetColorRGB(#FFFFFF)

```

```

! Подписи меридианов вдоль экватора
DO i=-180,+180,Step
    ! Вычисление координаты точки вывода надписи
    l=Radi(i);
    CALL Aitoff(l,0.0_8,x,y)
    ! Если Gr истина, то разметка в градусах, иначе - в часах

```

```

IF (Gr) THEN
  h=i
ELSE
  h=i/15
  IF (h<0) h=h+24;
END IF
write(s,'(I4)') h ! Преобразование значения h в текст. строку
Call MoveTo_W(x, y, wxy)
Call OUTGTEXT(s)
END DO

! Подписи параллелей вдоль нулевого меридиана - аналогично
DO j=-90,+90,Step
  IF (j /= 0) THEN ! Экватор не подписываем
    b=Radi(j);
    CALL Aitoff(0.0_8,b,x,y)
    write(s,'(I4)') j
    Call MoveTo_W(x, y, wxy)
    Call OUTGTEXT(s)
  END IF
END DO
END SUBROUTINE AitoffGrid

SUBROUTINE Galaxy(a,d,l,b)

! Перевод экваториальных координат в галактические

REAL(8), INTENT(in) :: a,d ! Экваториальные координаты (рад.)
REAL(8), INTENT(out) :: l,b ! Галактические координаты (рад.)
REAL(8) :: a1,sa,ca,sd,cd

REAL(8), PARAMETER :: Leo = 4.936829261 ! 282.85948083
REAL(8), PARAMETER :: L0 = 0.57477039907 ! 32.931918056
REAL(8), PARAMETER :: si = 0.88998807641 ! sin 62.871748611
REAL(8), PARAMETER :: ci = 0.45598379779 ! cos 62.871748611

a1=a-Leo

```

```

sa=sin(a1); ca=cos(a1)
sd=sin(d); cd=cos(d)
b=asin(sd*ci-cd*si*sa)
l=atan2(sd*si+cd*ci*sa,cd*ca)+L0

```

END SUBROUTINE Galaxy

END MODULE

Если мы хотим построить проекции звезд Hipparcos в галактической системе координат, то нам необходимо перевести экваториальные координаты, приведенные в каталоге, в галактические. Это можно сделать по формулам

$$\begin{aligned}
 b &= \arcsin(\sin \delta \cos i - \cos \delta \sin i \sin(\alpha - \Omega)), \\
 l &= \arctg \frac{\sin \delta \sin i + \cos \delta \cos i \sin(\alpha - \Omega)}{\cos \delta \cos(\alpha - \Omega)} + L_0. \quad (12.25)
 \end{aligned}$$

Здесь:

α, δ – экваториальные координаты;

$i = 62^\circ 52' 18.295''$ – наклон галактического экватора;

$\Omega = 282^\circ 51' 34.131''$ – долгота восходящего узла галактического эк-ватора;

$L_0 = 32^\circ 55' 54.905''$ – долгота направления на центр Галактики;

l, b – галактические координаты.

Значения констант приведены на эпоху J1991.25. Во второй формуле подразумевается круговой арктангенс – числитель интерпретируется как синус угла, а знаменатель – как косинус.

Наконец, перейдем к главной программе. Решим такую задачу: отобразить распределение звезд ранних спектральных классов по небесной сфере, причем звезды спектральных классов O выделить голубым цветом, B – белым.

Текст программы, выполняющей построение распределение звезд по небесной сфере, приведен в листинге 5, а результат ее работы – на рис. 12.2.

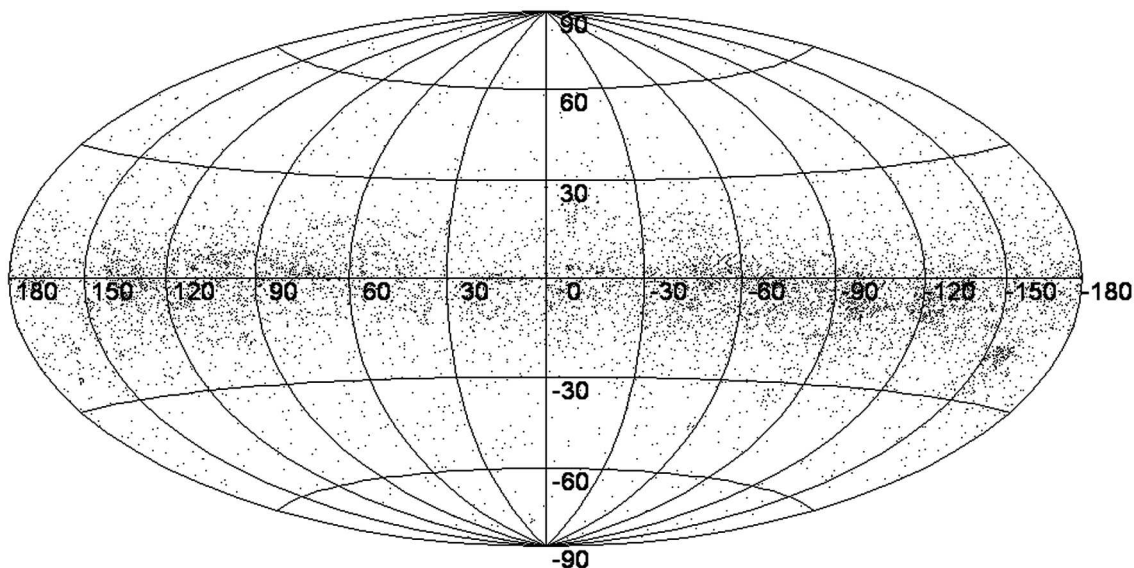


Рис. 12.2: Распределение O-B звезд по небесной сфере (галактическая система координат)

В основном цикле `while` происходит чтение данных о звезде, определение цвета вывода точки в операторе `case`. Далее происходит преобразование координат в галактические, затем в декартовы координаты проекции. Для простоты изложения мы ставим точку процедурой `SetPixel`, но можно нарисовать и другую геометрическую фигуру (ромб, круг).

Листинг 5. Построение распределения звезд по небесной сфере

```
Program Main
```

```
USE DFLIB
```

```
USE HipMain
```

```
USE Projection
```

```
IMPLICIT NONE
```

```
! Физическое разрешение окна
```

```
INTEGER, PARAMETER :: MaxX = 1000, MaxY = 500
```

```
REAL(8), PARAMETER :: LowX = -2.1 , LowY = -1.05 ! Логические
```

```
REAL(8), PARAMETER :: HighX= +2.1 , HighY= +1.05 ! координаты
```

```

REAL(8) :: l, b ! Галактические координаты
REAL(8) :: x, y ! Декартовы координаты

LOGICAL :: status1 ! Вспомогательные величины
INTEGER(2) :: status2
INTEGER(4) :: status4

INTEGER(4) :: color ! Цвет звезды

TYPE(Hipparcos) :: s

TYPE (windowconfig) :: wc ! Свойства графического окна
TYPE (wxycord) :: wxycord ! Вспомогательная величина

wc.numxpixels = MaxX ! Заполнение структуры свойств окна
wc.numypixels = MaxY
wc.numtextcols = -1
wc.numtextrows = -1
wc.numcolors = -1
wc.title = "Aitoff"C
wc.fontsize = #0008000C ! 10 X 12

status1 = SETWINDOWCONFIG(wc) ! Инициализация графики
IF (.NOT. status1) status1 = SETWINDOWCONFIG(wc)
status2=SetWindow(.TRUE.,LowX, LowY, HighX, HighY)
status2=INITIALIZEFONTS( )

CALL AitoffGrid(30,.TRUE.)

CALL OpenHipparcosMain() ! Открытие каталога и

DO WHILE (ReadHipparcosMain(s)) ! Цикл чтения звезд

SELECT CASE(S.SP(1:1)) ! Определение цвета звезды
CASE ('O')
    color = RGBTOINTEGER(90,64,255)
CASE ('B')

```



```

        color = RGBTOINTEGER(255,255,255)
CASE default
    color=0
END SELECT

! Перевод экваториальных координат в радианы,
  а затем в галактические координаты
CALL Galaxy(rad(s.RADeg),rad(s.DEDeg),l,b)
! Вычисление декартовых координат проекции Айтофа
CALL Aitoff(l,b,x,y)
! Поставить точку (можно заменить на круг)
status4=SetPixelRGB_w(x,y,color)

END DO

CALL CloseHipparcosMain()

! Сохранить изображение в файле
status4=SaveImage("Aitoff.bmp",0,0,MaxX-1,MaxY-1)

END PROGRAM

```

12.2.4 Построение диаграммы Герцшпрунга–Рессела

На космическом аппарате *Hipparcos* проводились измерения блеска звезд в двух полосах B_T , V_T в собственной фотометрической системе *TucHo*. Имеются формулы для пересчета этих величин в стандартный показатель цвета $B - V$, но для удобства эта величина уже внесена в каталог. Всего такая фотометрия была сделана для 114 820 звезд в *Hipparcos*, кроме этого для 2117 звезд фотометрические данные были взяты из наземных источников. Поле Н39 (позиция 259) несет информацию об источнике $B - V$ (символ G или T – наземные наблюдения или *TucHo*). Для 115 180 звезд имеются данные и о спектральном классе. Индивидуальные параллаксы позволяют вычислить абсолютную звездную величину M_V . Действительно, пренебрегая межзвездным погло-

щением, для этой величины имеем:

$$M_V = m + 5 \lg \pi + 5, \quad (12.26)$$

где через m обозначена видимая звездная величина.

Таким образом, имеется все необходимое для построения диаграммы Герцшпрунга–Рессела. Каталог Hipparcos дает уникальную возможность построить диаграмму для любой выборки звезд. До появления этого каталога это было невозможно из-за плохого знания расстояний. Диаграммы удавалось строить только для тех звезд, для которых имелась косвенная информация, что они находятся от нас приблизительно на одинаковом расстоянии, например, для звезд одного звездного скопления.

Алгоритм построения диаграммы достаточно прост и может быть легко дополнен программистом для решения более конкретных задач, связанных с использованием диаграммы Герцшпрунга–Рессела.

В начале программы определяются константы, описывающие охват прямоугольника диаграммы, а также отступ рамки диаграммы от края графического окна и максимальную относительную ошибку параллакса. Далее идет описание двух глобальных переменных – масштабных множителей, которые используются в процедуре XY, а вычисляются в главной программе. Процедура XY переводит $B - V$ и M_V звезды в экранные координаты x, y .

Главная программа начинается с создания графического окна и определения масштабных множителей в соответствии с разрешением экрана. Затем рисуется обрамляющий прямоугольник диаграммы и происходит разметка осей штрихами и подписями с шагом 0.5^m по $B - V$ и 5^m по M_V .

Собственно цикл нанесения звезд на диаграмму является весьма простой процедурой. В начале тела цикла проверяется наличие у звезды всех необходимых для диаграммы Герцшпрунга–Рессела параметров.

Диаграмма строится точками разных цветов для звезд разных спектральных классов. Следует заметить, что использование цветовых выделений по каким-либо признакам является весьма информативным подходом.

Результат работы программы (листинг 6) представлен на рис. 12.3.

Листинг 6. Построение диаграммы Герцшпрунга–Рессела

```
PROGRAM HRDiagramm
USE HipMain
USE DFLIB

IMPLICIT NONE

! Диапазон по AbsMag
REAL(4), PARAMETER :: MagLow =15.0, MagHi =-10.0
! Диапазон по B-V
REAL(4), PARAMETER :: BVLow =-0.5, BVHi = 2.0
INTEGER, PARAMETER :: Border = 50 ! Отступ от края окна
REAL(4), PARAMETER :: RelErr = 0.5 ! Относительная точность
! определения параллакса
INTEGER, PARAMETER :: MaxXY = 600

REAL(8) :: ScaleMg ! Масштаб по оси абс. зв. величин }
REAL(8) :: ScaleBV ! Масштаб по оси спектров

! Для инициализации графики
TYPE (windowconfig) wc
TYPE (xycoord) t
INTEGER(1) :: status1
INTEGER(2) :: status2
INTEGER(4) :: status4

CHARACTER(5) buf ! Буфер для формирования текстовых строк
TYPE (THipparcos) star
REAL(4) :: r ! Расстояние в пк
REAL(4) Mag ! Абсолютная звездная величина
REAL(4) BV ! Показатель цвета для разметки
INTEGER(4) :: x,y,x1,y1 ! Экранные координаты
INTEGER(4) :: color ! Цвет точки
INTEGER(2) :: i

! Инициализация графического окна
wc.numxpixels = MaxXY
```

```

wc.numypixels = MaxXY
wc.numtextcols = -1
wc.numtextrows = -1
wc.numcolors = -1
wc.title = "HR-diagram"C
wc.fontsize = #0008000C ! 10 X 12

status1 = SETWINDOWCONFIG(wc)
IF (.NOT. status1) status1 = SETWINDOWCONFIG(wc)

status2=INITIALIZEFONTS()
status2=SetFont('t''Arial''h14')

! Определение масштабов по осям
ScaleMg=(MaxXY-2*Border)/(MagLow-MagHi)
ScaleBV=(MaxXY-2*Border)/(BVHi-BVLow)

! Нанесение обрамляющей рамки
CALL XY(BVLow,MagHi,x,y)
CALL XY(BVHi,MagLow,x1,y1)
status2=Rectangle($GBORDER,x,y,x1,y1);

! Разметка оси B-V
BV=BVLow
DO WHILE (BV<=BVHi)
  CALL XY(BV,15.0,x,y)
  CALL MoveTo(x,y,t); status2=LineTo(x,y+3)
  WRITE(buf,'(F4.1)') BV
  CALL MoveTo(x-10,y+5,t); CALL OutGText(buf)
  BV=BV+0.5
END DO

! Разметка оси абс. зв. величин
DO Mag=MgHi,MgLow,5.0
  CALL XY(BVLow,Mag,x,y)
  CALL MoveTo(x,y,t); status2=LineTo(x-3,y)
  WRITE(buf,'(I3)') FLOOR(Mag)

```

```

CALL MoveTo(x-25,y-5,t); CALL OutGText(buf)
END DO

CALL OpenHipparcosMain

DO WHILE (ReadHipparcosMain(star))

IF (star.NoB_V .or. star.NoVMag .or. star.NoPlx) CYCLE
if (star.plx<=0.0) CYCLE ! "плохой" параллакс
IF (star.sigma_Plx/star.plx>RelErr) CYCLE ! низкая точность

r=1000.0/star.plx ! Вычисление расстояния в пк
Mag=star.VMag-5.0*log10(r)+5.0 ! Вычисл. абс. звезд. величины

SELECT CASE (star.SP(1:1)) ! Определение цвета точки
CASE('O', 'B')
    color=RGBTOINTEGER(0,255,255)
CASE('A')
    color=RGBTOINTEGER(255,255,255)
CASE('F', 'G')
    color=RGBTOINTEGER(255,255,0)
CASE('K', 'M')
    color=RGBTOINTEGER(255,0,0)
CASE DEFAULT
    color=RGBTOINTEGER(0,255,0)
END SELECT

CALL XY(Star.B_V,Mag,x,y)
status4=SetColorRGB(color)
status2=SetPixel(x,y)

END DO

CALL CloseHipparcosMain
status4=SaveImage("HR.bmp"C,0,0,MaxXY,MaxXY)

CONTAINS

```

```

! Процедура пересчета B-V и M в экранные координаты
SUBROUTINE XY(B_V, Mag, x, y )
REAL(4), INTENT(IN) :: B_V, Mag
INTEGER(4), INTENT(OUT) :: x, y
  x=Border+FLOOR((B_V-BVLow)*ScaleBV+0.5)
  y=Border++FLOOR((Mag-MagHi)*ScaleMg+0.5)
END SUBROUTINE

END PROGRAM

```

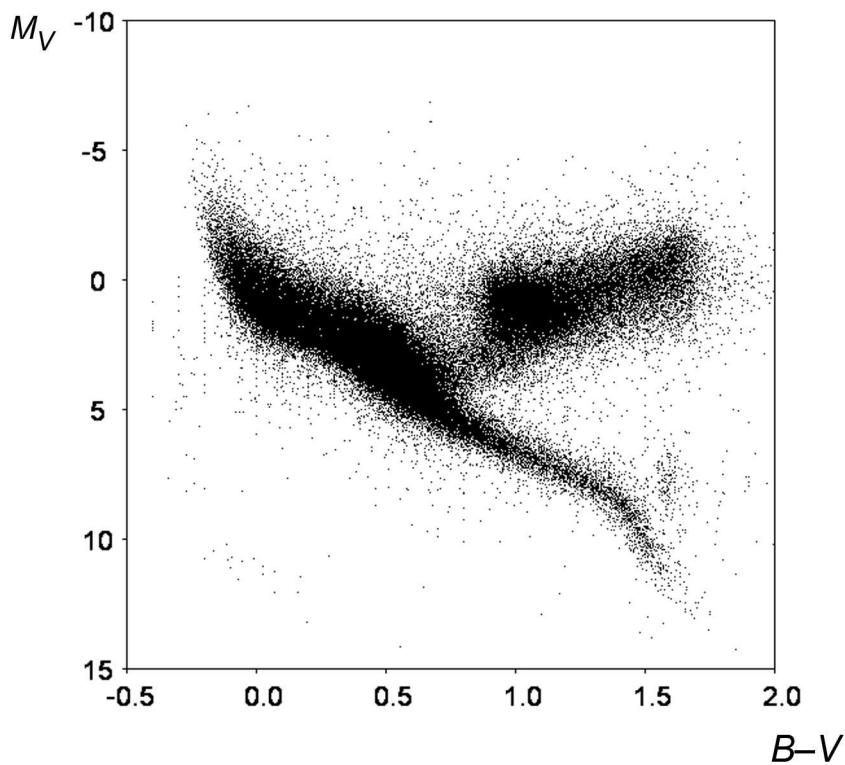


Рис. 12.3: Диаграмма Герцшпрунга-Рессела для звезд, относительная точность определения расстояний которых лучше 50%. По оси абсцисс отложен показатель цвета $B - V$, по оси ординат – абсолютная звездная величина M_V .

12.3 Упражнения к главе

1. Узнайте, сколько звезд в каталоге Hipparcos имеют показатель цвета $B - V$ меньше -0.5 . Постройте распределение та-

ких звезд по небесной сфере в галактической системе координат.

2. Создайте «книгу рекордов» каталога Hipparcos: самая близкая звезда, самая быстрая, самый точный параллакс, самая «красная», самая «голубая» звезда и т. п.
3. Постройте распределения звезд каталога Hipparcos по модулю собственных движений, по абсолютной и относительной ошибке собственных движений.
4. Постройте распределения звезд каталога Hipparcos по расстояниям, относительной точности расстояния. Исследуйте и построьте диаграмму зависимости относительной ошибки параллакса от расстояния до звезд.
5. Постройте картины распределения звезд каталога Hipparcos по небесной сфере для разных классов светимости, а также для звезд различных спектральных классов.
6. Постройте диаграмму Гецшпрунга–Рессела для звезд различных диапазонов расстояний: 0-50, 50-100, 100-200, 200-400, 400-600, 600-800, 800-1000 пк.
7. Постройте диаграмму Гецшпрунга–Рессела на основе спектральных данных. Выделите классы светимости (если они есть) цветами.

Литература

- [1] Астрономический Ежегодник (на текущий год). Изд. ИПА РАН.
- [2] С.Н.Блажко. Курс практической астрономии, изд. 3-е. М.: Наука, 1979.
- [3] А.М.Гижицкий. Пособие по определению астрономических пунктов. Л.: ЛГУ, 1955.
- [4] Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. М.: ИПРЖР, 1998.
- [5] В.С.Губанов. Обобщенный метод наименьших квадратов. СПб.: НАУКА, 1997.
- [6] В.Е.Жаров. Сферическая астрономия. Фрязино, 2006.
- [7] А.А. Киселев. Теоретические основания фотографической астрометрии. М., 1989.
- [8] Ж. Ковалевский. Современная астрометрия. Перевод с английского под редакцией В.Е.Жарова, Фрязино, 2004.
- [9] И.Г.Колчинский, А.А.Корсунь, М.Г.Родригес. Астрономы. Биографический справочник. Киев: Наукова думка, 1977.
- [10] А.Н.Кузнецов. Геодезическая астрономия. М.: Недра, 1966.
- [11] Матвеев Л.И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г.Б. О радиоинтерферометре с большой базой// Известия. вузов. Радиофизика, 1965, вып. 8 (4). с. 651-654.
- [12] Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. М.: Техносфера, 2002.
- [13] Официальный сайт Международной службы IGS:
<http://igscb.jpl.nasa.gov/>
- [14] Официальный сайт Международной службы вращения Земли IERS: <http://www.iers.org/>

- [15] В.В.Подобед, В.В.Нестеров. Общая астрометрия. М., 1983.
- [16] В.В.Подобед, Фундаментальная астрометрия. М., 1962.
- [17] Соловьёв Ю. А. "Спутниковая навигация и её приложения". М.: Эко-Тендз, 2003.
- [18] О.А. Титов. Математические методы обработки наблюдений: учебное пособие. СПб.: СПбГУ, 2001.
- [19] А.С.Цветков. Практическое руководство по работе с каталогом Hipparcos: учебно-метод. пособие. СПб.: СПбГУ, 2005.
- [20] А.С.Цветков. Руководство по работе с каталогом Tycho-2: учебно-метод. пособие. СПб.: СПбГУ, 2006.
- [21] К.А. Цветков, Практическая астрономия. Москва, 1951.
- [22] В.С. Яценков, Основы спутниковой навигации. М.: Горячая линия – Телеком, 2005.
- [23] G.F. Amelio, M.F. Tompsett and G.E. Smith. Experimental verification of the charge coupled concept. Bell System Technical Journal, 1970, April, v.49, pp.593-600.
- [24] W.S. Boyle, G.E. Smith. Charge Coupled Semiconductor Devices. Bell Systems Technical Journal, 1970, April, v.49, pp.587-593.
- [25] The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. V.1–16. ESA, 1997.
- [26] James Janesick, Tom Elliott. History and advancements of large area array scientific CCD imagers. - Astronomical Society of Pacific Conference Series, '91, Tucson, AZ.
- [27] S. Howell. Handbook of CCD astronomy. Cambridge, 2000
- [28] D.D. McCarthy, G.Petit - eds), IERS Conventions 2003, IERS Technical Notes 32, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodesie 2004).
- [29] Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces. Arinc research corporation, 2000.
- [30] H.G.Walter, O.J.Sovers. Astrometry of Fundamental Catalogues. Springer, 2000.

.

Учебное издание

Витязев Вениамин Владимирович

Гусева Ирина Степановна

Кияев Владимир Ильич

Мищенко Мария Прокофьевна

Петров Сергей Дмитриевич

Титов Олег Александрович

Цветков Александр Станиславович

НЕБЕСНЫЕ И ЗЕМНЫЕ КООРДИНАТЫ

Учебное пособие

по астрометрической практике

Печатается без издательского редактирования

Подписано к печати 28.10.2010. Формат 60 х84 1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 17.68. Тираж 300 экз. Заказ 131.

Издательство СПбГУ,

199004, Санкт-Петербург, В.О., 6-я линия, д. 11/ 21

Тел/факс. (812) 328-4422

E-mail: editor@unipress.ru

www.unipress.ru

Типография Издательства СПбГУ

199061, Санкт-Петербург, С.Петербург, Средний пр., д. 41