

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Центр классического образования
Физический факультет
Кафедра астрономии и геодезии

Учебная практика

Астрометрия

Учебно-методическое пособие для студентов 2-го курса

Старший преподаватель
кафедры астрономии и геодезии
А. Б. Островский

Екатеринбург
2011

Оглавление

1	Эфемеридные вычисления	5
1.1	Расчет продолжительности времени наблюдений	5
1.1.1	Специфика астрометрических наблюдений. Сумерки	5
1.1.2	Методика расчета времени наблюдений	6
1.2	Эфемериды для наблюдения Полярной звезды	7
1.2.1	Методика расчета эфемерид наблюдений	7
1.3	Эфемеридные вычисления для меридианных наблюдений	8
1.3.1	Определение высот и азимутов объектов	8
1.3.2	Методика расчета эфемерид наблюдений	9
1.4	Эфемеридные вычисления для способа равных высот	11
1.4.1	Определение поправки хронометра способом равных высот	11
1.4.2	Методика расчета эфемерид наблюдений	13
1.5	Типовые вопросы	15
2	Служба времени	17
2.1	Реализация службы времени методами спутниковой навигации	18
2.1.1	Использование систем глобальной спутниковой навигации в целях службы времени	18
2.1.2	Методика использования спутникового оборудования	19
2.2	Шкалы времени	21
2.2.1	Использование шкал времени	21
2.2.2	Применение механического хронометра	24
2.3	Типовые вопросы	24
3	Широтно-долготная программа (полевые наблюдения)	27
3.1	Подготовка к наблюдениям. Поверки и юстировки инструмента	28
3.1.1	Ось цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга должна быть перпендикулярна к вертикальной оси вращения прибора	29
3.1.2	Правильность установки сетки нитей трубы	30
3.1.3	Визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси ее вращения (коллимация)	31
3.1.4	Место нуля МО (зенита MZ) вертикального круга	33
3.2	Определение широты по Полярной звезде	34
3.2.1	Методика ориентации инструмента	34
3.2.2	Определение широты по наблюдениям Полярной	35
3.3	Определение широты по звездам в меридиане	35
3.3.1	Определение широты по наблюдениям звезд в меридиане	35
3.4	Определение долготы и поправки хронометра по наблюдениям звезд на равных высотах методом Цингера	36

3.4.1	Методика определения поправки хронометра по наблюдениям методом Цингера	36
3.5	Типовые вопросы	36
4	Обработка и анализ данных наблюдений (камеральная обработка)	39
4.1	Методы обработки программ наблюдений	39
4.1.1	Определение широты по наблюдениям Полярной звезды	40
4.1.2	Определение широты по наблюдениям пар звезд в меридиане при одном положении вертикального круга	40
4.2	Вычисление поправки хронометра по наблюдениям пар звезд на равных высотах методом Цингера	43
4.3	Типовые вопросы	44
	Литература	47
A	Приложение	49
A.1	Список контрольных тестов	49
A.2	Принципиальная схема устройства ввода сигналов	55
A.3	Журнал наблюдений Полярной звезды	56
A.4	Журнал наблюдений пар звезд в меридиане	57
A.5	Журнал наблюдений пар Цингера	58

1

Эфемеридные вычисления

Эфемериды — таблицы, содержащие как функцию времени наблюдений сведения о положении небесных светил на небе, скоростях их движения, звездных величинах и другие данные, необходимые для проведения астрономических наблюдений. Эфемериды составляются для будущих моментов времени по результатам выполненных ранее наблюдений и их теоретического анализа. При вычислении эфемерид используются теории движения небесных светил, законы изменения их блеска (например, у переменных звезд) и т. п.

Для эфемеридных вычислений используются приближенные значения координат объектов и приближенные значения географических координат пункта наблюдения. Необходимая точность вычисления эфемерид определяется, как правило полем зрения инструмента и погрешностью его ориентирования. Инструменты, применяемые на учебной практике имеют поле зрения порядка 1° ; точность ориентирования инструмента по Полярной звезде — несколько угловых минут. Исходными данными при вычислении эфемерид являются экваториальные координаты объектов и момент звездного времени. Учитывая ограничения, при вычислении эфемерид исходные данные берутся из Астрономического ежегодника со следующей точностью по прямому восхождению и склонению:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \pm 0.1^m, \\ \Delta\delta &= \pm 1'.\end{aligned}\tag{1.1}$$

В частном случае наблюдений на Учебной обсерватории кафедры астрономии и геодезии берутся следующие приближенные географические координаты места наблюдения:

$$\begin{aligned}\varphi &\simeq +56^\circ 50', \\ \lambda &\simeq 04^h 02^m \text{ в. д.}\end{aligned}\tag{1.2}$$

Конечными результатами при эфемеридных вычислениях являются зенитное расстояние (высота) и азимут объекта на некоторый момент времени. Точность вычислений z и A должна составлять $\pm 1'$. Момент времени в эфемериде указывается с точностью $\pm 1^m$.

Превышать указанную точность не нужно, поскольку это приведет к усложнению процедуры наблюдений, но не повысит их точность. Также очевидно, что промежуточные операции при вычислении эфемерид следует производить с точностью на порядок более высокой.

1.1 Расчет продолжительности времени наблюдений

1.1.1 Специфика астрометрических наблюдений. Сумерки

Сумерки — это переход от дневного к ночному (или наоборот) периоду освещенности неба. Сумеречное освещение объясняется рассеянием света Солнца компонентами атмосферы.

сферы — газами, парами, и аэрозолями различного происхождения — земного и космического. Сильнее всего рассеивают свет наиболее плотные приземные слои. Из наблюдений следует, что при погружении Солнца под горизонт на $5\text{--}6^\circ$ граница земной тени над пунктом проходит высоте $30\text{--}35$ км.

По степени яркости неба после захода (перед восходом) Солнца различают три типа сумерек: гражданские, навигационные и астрономические.

Гражданские сумерки — длятся с момента захода Солнца до его погружения под горизонт на $6\text{--}7^\circ$. При ясном безоблачном небе во время таких сумерек не требуется уличное освещение.

Навигационные сумерки — длятся при изменении угла погружения от 7 до 12° . В это время в портах включают маяки.

Астрономические сумерки — являются продолжением навигационных сумерек и длятся до погружения Солнца на угол 18° . Только тогда наступает максимальная темнота и в обсерваториях с помощью мощных телескопов проводятся наиболее точные астрофизические наблюдения слабых космических объектов. При дальнейшем увеличении зенитного расстояния Солнца освещенность ночного неба практически не изменяется.

Вычислим приближенную высоту Солнца на широте города Екатеринбурга ($\varphi = 56^\circ 49'$) в момент нижней кульминации на одну из дат для летнего периода, например 01 июля. В этот время склонение Солнца $\delta_\odot \approx +23^\circ$. Тогда получаем

$$h_\odot = \varphi + \delta_\odot - 90^\circ = -10^\circ \quad (1.3)$$

Это значит, что даже в полночь на нашей широте не завершаются навигационные сумерки.

Важно учитывать и добавочное освещение земной атмосферы Луной. Правда, в летнее время помехи со стороны Луны, в особенности для высоких широт, невелики, поскольку ее суточный путь проходит низко над горизонтом. И все же перед началом астрометрических наблюдений полезно из АЕ, либо из Астрономического календаря найти информацию о фазах Луны.

1.1.2 Методика расчета времени наблюдений

Астрономические наблюдения ярких звезд даже в небольшие инструменты можно проводить и в сумеречный период времени. При расчете сумерек (их начала и конца) на данной широте необходимо вычислить часовые углы Солнца, используя формулу

$$\cos z_\odot = \sin \varphi \sin \delta_\odot + \cos \varphi \cos \delta_\odot \cos t_\odot. \quad (1.4)$$

Широту места наблюдения φ при эфемеридных вычислениях следует принять равной $56^\circ 50'$. Минимальную глубину погружения Солнца под горизонт, при которой возможно наблюдение звезд в трубу инструмента (могут быть не видны невооруженным глазом), взять равной 7° ($z_\odot \cong 97^\circ$).

Экваториальные координаты α_\odot , δ_\odot приводятся в таблицах АЕ «Солнце». При вычисленном часовом угле Солнца местное звездное время для начала (конца) наблюдений в заданную дату равно

$$\begin{aligned} S_H &= \alpha_\odot + t_\odot, \\ S_K &= \alpha_\odot - t_\odot. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Здесь S_H — вечернее время начала наблюдений, S_K — утреннее время их окончания по звездному времени. Этим и будут определены прямые восхождения звезд, которые в течение «ночного» времени будут кульминировать в южной (верхняя кульминация), либо в северной части неба (нижняя кульминация) части неба.

Задание

Используя рассмотренную методику, вычислите моменты начала и конца времени наблюдений по звездному и летнему декретному времени для всех дат наблюдений в течение практики. Процедура пересчета звездного момента времени в средний описана в последующих разделах. Для расчетов используйте экваториальные координаты Солнца из таблицы АЕ «Эфемерида Солнца». Результаты расчетов поместите в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Моменты начала и конца наблюдений

Дата	s_H ч м	T_H ч м	s_K ч м	T_K ч м
28.06	16 26	00 02	20 25	04 00
...
07.07	16 54	23 54	21 12	04 11

1.2 Эфемериды для наблюдения Полярной звезды

Полярная звезда является удобным объектом для ориентации инструмента в меридиане и определения широты места наблюдения. Ориентация инструмента проводится минимум один раз при каждой установке инструмента на место наблюдения. Ориентацию инструмента необходимо делать заново, если во время наблюдений происходит механическое смещение инструмента, либо если вследствие неправильных действий с теодолитом сбивается выставленное значение азимута точки юга. Эфемериды Полярной звезды составляются с выбранным шагом по времени на весь диапазон звездного времени наблюдений и используются для ориентации инструмента и для проведения наблюдений по программе определения широты места по Полярной звезде.

1.2.1 Методика расчета эфемерид наблюдений

Для составления эфемерид Полярной звезды необходимо взять максимальный промежуток звездного времени наблюдений из табл. 1.1 для всего периода учебной практики:

$$s_H^{min} \leq s \leq s_K^{max}. \quad (1.6)$$

Звездное время начала наблюдений округлить до ближайшего меньшего значения, кратного 10^m . Начиная с этого момента времени и с шагом в 10^m определить зенитное расстояние и астрономический азимут Полярной звезды с точностью до одной угловой минуты и поместить результаты в табл. 1.2. Высоты и азимуты Полярной на выбранные моменты времени берутся из таблицы АЕ «Таблица высот и азимутов Полярной». Краткое описание правил пользования таблицей приводится в ней самой. Обратите внимание, что табличные значения широты места и моментов времени не совпадают с требуемыми значениями, что делает необходимым интерполяцию табличных значений. Применяйте простую линейную интерполяцию.

Задание

Составить таблицу эфемерид Полярной звезды в соответствии с приведенными выше правилами.

Таблица 1.2 – Эфемериды для наблюдений Полярной звезды

s	$z_{\alpha U Min}$	$A_{\alpha U Min}$

1.3 Эфемеридные вычисления для меридианных наблюдений

Каждый оборот Земли вокруг оси сопровождается *моментами верхней и нижней кульминаций* того или иного светила (далее в тексте ВК и НК соответственно), когда мы наблюдаем светило на небесном меридиане, т. е. в наиболее высоком или наиболее низком положении относительно горизонта. Особое значение имеют наблюдения верхних кульминаций. В этот момент плоскость данного географического меридиана оказывается обращенной к светилу. Регистрация моментов верхних кульминаций светил с известными экваториальными координатами (α , δ) используется при ориентировании угломерных инструментов по азимуту, определении широт и времени. Более того, наблюдения космических объектов в периоды времени, близкие к верхней кульминации, используются при проведении самых различных наблюдений и исследований, в том числе и астрофизических.

1.3.1 Определение высот и азимутов объектов

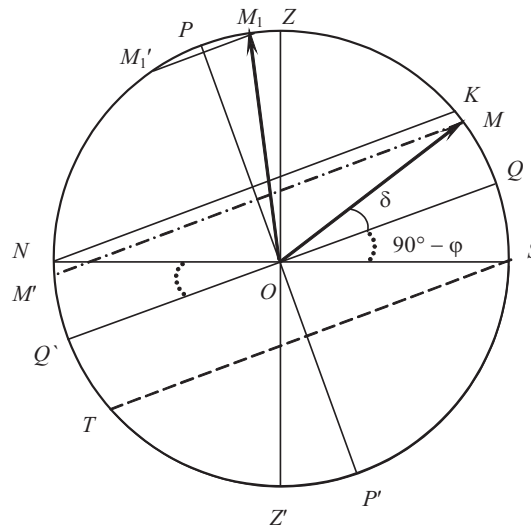


Рисунок 1.1 – Положение звезд в моменты верхней и нижней кульминации

На рис. 1.1 показана плоскость небесного меридиана, в которой расположены ось мира, отвесная линия места наблюдения, а также линии пересечения суточных параллелей светил, имеющих разные склонения с плоскостью меридиана. $\angle NOP = \angle QOZ = \varphi$.

Здесь отмечены положения двух звезд в момент их верхней (M и M_1) и нижней кульминаций (соответственно M' и M'_1). В момент верхней кульминации светил их часовой угол $t = 0^h(0^\circ)$, а местное звездное время $s = \alpha_*$. В нижней кульминации часовой угол $t = 12^h(180^\circ)$, а местное звездное время $s = \alpha_* + 12^h$. В зависимости от склонения светила его прохождение через меридиан по-разному наблюдается относительно зенита в пункте

наблюдения — к югу или северу, что сказывается на значении астрономического азимута светила. В первом случае $A = 0^\circ$, а во втором — $A = 180^\circ$. Рассмотрим различные случаи наблюдения светил в меридиане.

1. **Верхняя кульминация к югу от Z** (светило M). Как видно, его склонение $\delta < \varphi$. Тогда зенитное расстояние светила $z_{BK} = \varphi - \delta$, а высота в момент ВК:

$$\begin{aligned} h_{BK} &= 90^\circ - \varphi + \delta, \\ A_{BK} &= 0^\circ. \end{aligned} \quad (1.7)$$

2. **Верхняя кульминация светила (M_1) к северу от Z** . Склонение такого светила $\delta > \varphi$. В этом случае $z_{BK} = \delta - \varphi$, а высота в момент верхней кульминации

$$\begin{aligned} h_{BK} &= 90^\circ + \varphi - \delta, \\ A_{BK} &= 180^\circ. \end{aligned} \quad (1.8)$$

3. **Верхняя кульминация в зените** происходит на данной широте у тех светил, склонение которых $\delta = \varphi$. Эти светила в данный момент времени ($t = 0^h$, $S = \alpha_*$) не являются указателями азимута.

4. **В нижней кульминации** ($t_* = 12^h 00^m$ и $A = 180^\circ$) светило занимает самое низкое положение над горизонтом или скрывается за горизонт.

$$\begin{aligned} z_{HK} &= \sphericalangle ZM' = \sphericalangle PZ + \sphericalangle PM' = (90^\circ - \varphi) + (90^\circ - \delta) = 180^\circ - (\varphi + \delta), \\ h_{HK} &= \sphericalangle NP - \sphericalangle PM' = \varphi - (90^\circ - \delta) = (\varphi + \delta) - 90^\circ, \\ A_{HK} &= 180^\circ. \end{aligned} \quad (1.9)$$

По характеру суточного движения в пункте с известной широтой светила можно разделить на несколько типов:

1. **Незаходящими** считаются те светила, у которых обе кульминации происходят над горизонтом. Предельную (граничную) параллель таких светил NK описывают светила, у которых нижняя кульминация происходит в точке севера N . Высота таких светил в момент нижней кульминации $h_{HK} = 0^\circ$, а их склонение $\delta = 90^\circ - \varphi$. На северном полюсе Земли все светила северного полушария являются незаходящими, а их высоты над горизонтом определяются их склонением;
2. **Невосходящими** называются те светила, у которых даже верхние кульминации не удастся наблюдать на данной широте. Граничная параллель таких светил ST проходит через точку юга S ;
3. **Восходящими (заходящими)** будут те светила, суточные пути которых пересекаются с горизонтом, а их время пребывания над горизонтом, определяемое посредством часовых углов в момент восходов и заходов, зависит от их склонения.

1.3.2 Методика расчета эфемерид наблюдений

Наблюдения звезд в меридиане используются для выполнения программ наблюдений по определению широты места, астрономического азимута земного предмета и азимутальной лично-инструментальной разности (АЛИР). Эфемериды прохождения звезд в меридиане являются рабочими эфемеридами для наблюдений по определению широты места

и астрономического азимута земного предмета. Эфемериды для определения АЛИР рассчитываются на основе эфемерид для наблюдения звезд в меридиане.

Для каждого пункта подготавливают рабочие эфемериды пар северных и южных звезд. Выбор звезд по блеску ограничивается их видимостью в данных физико-географических условиях. Пары звезд должны удовлетворять следующим условиям (обратите внимание, что одни и те же звезды могут входить в несколько пар).

1. Видимая звездная величина звезды m должна быть меньше 4.5.
2. Зенитные расстояния должны быть в пределах от 45 до 70°.
3. Разность зенитных расстояний не более 6°.
4. Прямое восхождение южной звезды пары должно находиться в максимальном для периода наблюдений диапазоне звездных времен начала и конца наблюдений (см. табл. 1.1); для северной звезды (нижняя кульминация) со сдвигом $\pm 12^h$:

$$\begin{aligned} s_H^{min} &\leq \alpha_s \leq s_K^{max}, \\ s_H^{min} \pm 12^h &\leq \alpha_n \leq s_K^{max} \pm 12^h. \end{aligned} \quad (1.10)$$

5. Разность моментов кульминаций не более $\pm 30^m$, минимальная разность моментов между кульминациями должна быть равна времени наблюдения одной звезды плюс время, затрачиваемое на переход к наблюдениям второй звезды данной пары (не менее $\pm 12^m$).

Задание

Рассчитать эфемериды для наблюдения звезд в меридиане. Использовать приведенную выше методику. Экваториальные координаты звезд взять из таблицы АЕ «Средние места звезд (J2000.0)». Для составления эфемерид можно использовать только те звезды из таблицы средних мест, для которых существуют соответствующие записи в таблице АЕ «Видимые места звезд». Результаты вычислений поместить в две таблицы. В первую таблицу (см. табл. 1.3) поместить все звезды, удовлетворяющие условиям 1, 2, 4, отсортированные по виду кульминации (азимуту) и звездному времени кульминации. Во вторую таблицу (рабочие эфемериды для определения широты по наблюдениям звезд в меридиане) поместите пары звезд, удовлетворяющие всем вышеуказанным критериям. Сами пары и звезды внутри пары должны быть отсортированы по звездному времени (см. табл. 1.4).

Таблица 1.3 – Звезды, проходящие меридиан места наблюдения в выбранный диапазон звездного времени

№	№ по АЕ	Название	m	α hh mm	δ ° '	s кульминации hh mm	$z_{\text{КЛ}}$ ° '	$A_{\text{КЛ}}$ ° '	$z_{\text{КП}}$ ° '	$A_{\text{КП}}$ ° '
01	378	bet Ser	3.65	15 46	+15 23	15 46	41 27	0 0	318 33	180 0
...

Таблица 1.4 – Рабочие эфемериды для определения широты по наблюдениям звезд в меридиане

№ пары	№ звезды по АЕ	Название	m	s кульминации hh mm	$z_{\text{КЛ}}$ ° ’	$A_{\text{КЛ}}$ ° ’	$z_{\text{КП}}$ ° ’	$A_{\text{КП}}$ ° ’
01	401	lam Oph	3.82	16 32	54 53	0 0	305 07	180 0
	129	alp Cam	4.26	16 55	56 49	180 0	303 11	0 0
...

1.4 Эфемеридные вычисления для способа равных высот

Определение местного времени при определении координат пунктов из астрономических наблюдений производится преимущественно по способу Цингера. Этот метод по своим достоинствам получил всеобщее признание как весьма точный и вместе с тем простой при экспедиционных работах.

В 1874 г. адъютант-астроном Пулковской обсерватории Николай Яковлевич Цингер опубликовал свою работу «Об определении времени по соответствующим высотам различных звезд», в которой дал изящное и весьма удобное, с практической точки зрения, решение следующей задачи: «Зная широту места, *определить звездное время*, когда две звезды $\sigma_1(\alpha_1, \delta_1)$ и $\sigma_2(\alpha_2, \delta_2)$ достигают одинаковой высоты; найти также азимуты этих звезд и их высоту в этот момент».

Легко показать, что к решению задачи Н. Я. Цингера сводятся все задачи, связанные с определением времени по соответствующим высотам двух звезд, когда известны широта места φ и интервал времени Δs между моментами, в которые каждая из звезд достигает некоторой общей для них высоты.

В самом деле, пусть s_1 и s_2 — два момента, по звездному времени следующие один за другим через некоторый интервал времени Δs , в которые, соответственно, звезды σ_1 и σ_2 находятся на одной и той же высоте. Если α_1 и α_2 — прямые восхождения этих звезд, то их часовые углы в моменты этих одновременных явлений будут, соответственно,

$$t_1 = s_1 - \alpha_1; \quad t_2 = s_2 - \alpha_2.$$

Выражение для t_2 можно написать так:

$$t_2 = s_1 - \alpha_2 + (s_2 - s_1) = s_1 - (\alpha_2 - \Delta s).$$

Последнее равенство показывает, что достаточно уменьшить прямое восхождение второй звезды на разность времен Δs , чтобы можно было говорить об одновременности наблюдений обеих звезд. Этот прием приведения разновременных наблюдений к одному моменту был указан еще Гауссом.

1.4.1 Определение поправки хронометра способом равных высот

Метод равных высот основан на наблюдениях звезд на одном и том же альмукантарате, т. е. в те моменты, когда звезды программы достигают последовательно некоторой общей высоты над горизонтом. Наиболее целесообразны такие методы равных высот, при которых из наблюдений нужно получать лишь моменты прохождения звезд через этот альмукантарат, а само значение высоты или зенитного расстояния подлежит исключению

или уточнению опять-таки по наблюдаемым моментам. Таким образом, отпадает необходимость в измерении вертикальных углов и тем самым наблюдения освобождаются от ошибок, связанных с отсчетами разделенного круга. Однако существенным для всех способов равных высот является контроль за постоянством высоты визирной линии трубы. Метод равных высот предполагает симметричность влияния рефракции относительно зенита. Наименьшей комбинацией наблюдаемых звезд являются две звезды, поэтому рассмотрим сначала методы равных высот, основанные на наблюдениях пар звезд.

Предположим сначала, что при помощи целесообразного инструмента наблюдаем моменты прохождения какой-либо звезды до и после ее кульминации через один и тот же альмукуантарат, не заботясь о точном измерении ее высоты. Пусть координаты звезды α и δ , а T_e и T_w — моменты по звездному хронометру, когда звезда находится на одинаковом зенитном расстоянии на восток и на запад от меридиана, u_e и u_w — поправки хронометра в эти моменты. Допуская, что рефракция при обоих наблюдениях одинакова и что изменениями α и δ за время от T_e и T_w можно пренебречь, заключаем, что не только наблюдаемые, но и истинные, т. е. свободные от влияния рефракции, зенитные расстояния в оба момента одинаковы, а следовательно, равны и часовые углы, считающиеся от меридиана в обе стороны, т. е.

$$\alpha - (T_e + u_e) = (T_w + u_w) - \alpha,$$

откуда получаем

$$\frac{1}{2}(u_e + u_w) = \alpha - \frac{1}{2}(T_e + T_w).$$

Поскольку ход хронометра можно считать равномерным, то полусумма

$$\frac{1}{2}(u_e + u_w)$$

равна поправке хронометра в момент

$$\frac{1}{2}(T_e + T_w)$$

и, следовательно, ее можно вычислить по полученной формуле.

Это по идее очень простой способ определения поправки часов, так как он не требует измерения высоты и, следовательно, отсчета круга, но он очень неэкономичен в смысле затраты времени. Звезду нужно наблюдать подальше от меридиана, когда скорость изменения ее высоты достаточно велика, лучше всего, как и при определении времени по абсолютным высотам, близ первого вертикала. Поэтому между двумя наблюдениями должно протекать несколько часов, и при неустойчивой ясности неба есть риск, что второе наблюдение не состоится из-за облаков, а следовательно, и первое окажется напрасным.

Можно сделать способ определения поправки часов по наблюдениям равных высот двух звезд очень практичным, если найти на небе такую пару звезд, у которой склонения обеих звезд были бы равны, а разность прямых восхождений была бы такова, чтобы они проходили через одно и то же зенитное расстояние, вблизи первого вертикала, одна на востоке, другая на западе, вскоре (через несколько минут) одна после другой. Пусть α_e и δ — координаты восточной звезды, а α_w и δ — координаты западной; T_e и T_w — моменты, когда та и другая достигают некоторой, в точности неизвестной, но одинаковой высоты; u — поправка хронометра в средний момент. Суточный ход хронометра всегда достаточно хорошо известен или так мал, что можно пренебречь им за несколько минут; за это время изменение рефракции тоже может быть лишь незначительным.

При равенстве склонений звезд их часовые углы, считающиеся от меридиана к востоку и к западу, должны быть равны в моменты наблюдений и, следовательно,

$$\alpha_e - (T_e + u_e) = (T_w + u_w) - \alpha_w,$$

откуда получаем

$$u = \frac{1}{2}(\alpha_e + \alpha_w) - \frac{1}{2}(T_e + T_w).$$

Однако пар звезд с совершенно одинаковыми склонениями на небе нет, но зато можно найти достаточно таких пар звезд, у которых разница склонений не велика и которые в то же время по положению на небе вполне удобны для наблюдения на востоке и западе, не очень далеко от первого вертикала при заданной широте места наблюдения. Ясно, что при малой разности склонений звезд в такой паре выражение поправки часов будет отличаться от последнего выражения лишь на небольшую величину r :

$$u = \frac{1}{2}(\alpha_e + \alpha_w) - \frac{1}{2}(T_e + T_w) + r, \quad (1.11)$$

причем r тем ближе к нулю, чем меньше разность склонений, потому что при $\delta_e = \delta_w$ имеем $r = 0$.

Выражение (1.11) показывает, что вычисление поправки хронометра и сводится к нахождению величины r , называемой приведением, или редукцией, как функции координат звезд и моментов прохождений звезд через некоторый альмукантарат. Практический способ определения редукции приведен в разделе, посвященном камеральной обработке наблюдений.

1.4.2 Методика расчета эфемерид наблюдений

Основная идея метода — наблюдения пары звезд на одном и том же альмукантарате с небольшой разностью склонений. Следовательно, первым критерием отбора является малая разность склонений звезд, то есть $\Delta\delta \leq \Delta\delta_{max}$, а вторым, естественно, нахождение звезд на одном зенитном расстоянии, при одном и том же звездном времени:

$$\begin{aligned} \sin \varphi \sin \delta_e + \cos \varphi \cos \delta_e \cos(\alpha_e - S) &= \\ &= \sin \varphi \sin \delta_w + \cos \varphi \cos \delta_w \cos(S - \alpha_w). \end{aligned}$$

И проделав преобразования, что делались ранее, получим:

$$\begin{aligned} \sin(S - \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2}) + \cos(S - \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2}) \operatorname{tg}(\frac{\delta_w + \delta_e}{2}) \operatorname{tg}(\frac{\delta_w - \delta_e}{2}) \operatorname{ctg}(\frac{\alpha_e - \alpha_w}{2}) &= \\ &= \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg}(\frac{\delta_w - \delta_e}{2}) \operatorname{cosec}(\frac{\alpha_e - \alpha_w}{2}), \end{aligned}$$

или

$$\sin(S - \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2}) + \cos(S - \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2}) \operatorname{tg} m = \frac{\sin n}{\cos m},$$

где углы m и n соответственно равны:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} m &= \operatorname{tg}(\frac{\delta_w + \delta_e}{2}) \operatorname{tg}(\frac{\delta_w - \delta_e}{2}) \operatorname{ctg}(\frac{\alpha_e - \alpha_w}{2}), \\ \sin n &= \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg}(\frac{\delta_w - \delta_e}{2}) \operatorname{cosec}(\frac{\alpha_e - \alpha_w}{2}) \cos m; \end{aligned}$$

и тогда

$$S = n - m + \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2}.$$

В итоге имеем следующую систему формул для поиска звездного времени, когда пара звезд находится на одном зенитном расстоянии:

$$\left\{ \begin{array}{l} S = n - m + \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2}, \\ \sin n = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \left(\frac{\delta_w - \delta_e}{2} \right) \operatorname{cosec} \left(\frac{\alpha_e - \alpha_w}{2} \right) \cos m; \\ \operatorname{tg} m = \operatorname{tg} \left(\frac{\delta_w + \delta_e}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\delta_w - \delta_e}{2} \right) \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha_e - \alpha_w}{2} \right), \end{array} \right. \quad (1.12)$$

Ранее по тексту отмечалось, что наилучшие условия наблюдения – наблюдение звезд вблизи первого вертикала, то есть азимуты этих звезд должны равняться примерно 90° для западной и 270° восточной звезды, или часовые углы примерно равны, соответственно, 6^h и 18^h . Это и есть третий критерий для отбора пары Цингера, то есть $t_w^{\min} < t_w < t_w^{\max}$ и $t_e^{\min} < t_e < t_e^{\max}$.

Теперь рассмотрим ограничения, связанные с инструментом, с помощью которого производятся наблюдения. То есть, если инструмент, укомплектован прямой трубой, то для удобства наблюдений приходится использовать сравнительно низкие альмукантараты. Следовательно, четвертым критерием отбора является ограничения по зенитным расстояниям: $z_{\min} < z < z_{\max}$.

Формулы для подсчета зенитного расстояния z :

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_w + \cos \varphi \cos(S - \alpha_w) \quad (1.13)$$

или

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_e + \cos \varphi \cos(S - \alpha_e),$$

и азимутов A_w, A_e :

$$\operatorname{tg} A_w = \frac{\sin(S - \alpha_w)}{\sin \varphi \cos(S - \alpha_w) - \operatorname{tg} \delta_w \cos \varphi},$$

$$\operatorname{tg} A_e = \frac{\sin(S - \alpha_e)}{\sin \varphi \cos(S - \alpha_e) - \operatorname{tg} \delta_e \cos \varphi}. \quad (1.14)$$

Возможен и пятый критерий отбора звезд — звездная величина, то есть в летнее время на сумеречном небе, да еще в городских условиях наблюдение слабых звезд практически невозможно, значит необходимо учитывать звездную величину, при подборе пары: $m \leq m_{\max}$.

Параметры отбора пар выбраны следующим образом:

- глубина погружения Солнца за горизонт 3° ;
- разность моментов прохождений в минутах — 10;
- ограничение по звездной величине (max) — 4.7;
- разность склонений звезд в градусах — 5;
- ограничения на часовые углы (min—max) в часах — 4.5—7.5;
- ограничения по зенитным расстояниям (min—max) в градусах — 50—70.

Для реализации изложенного алгоритма используется компьютерная программа, входящая в состав программно-аппаратного комплекса обеспечения учебной практики по астрометрии. Программа создает текстовые файлы эфемерид наблюдений по входным файлам экваториальных координат Солнца и звезд из АЕ.

1.5 Типовые вопросы

1. Объясните, по какой причине эфемериды для астрономических наблюдений рассчитываются как функция звездного времени? Возможно ли использование того или иного вида солнечного времени для построения эфемерид?
2. Почему требуемая точность вычисления эфемерид обычно определяется именно величиной углового поля зрения инструмента?
3. Поясните, на каких этапах эфемеридных вычислений и с какой целью, используется процедура интерполяции табличных значений?
4. Объясните суть процедуры линейной интерполяции.
5. Поясните, по какой причине порядок интерполирования при двумерной линейной интерполяции не имеет значения?
6. Рассчитайте время прохождения звезды через поле зрения теодолита GeoBox TE-02 для среднего склонения звезд, кульминирующих к югу и северу от зенита (в нижней кульминации) для широты Екатеринбурга.
7. Рассчитайте время полного захода Солнца под горизонт (от нижнего до верхнего края) для даты середины учебной практики. Зависит ли это время от склонения Солнца?
8. Покажите, влияет ли рефракция на время полного погружения Солнца под горизонт.
9. Рассчитайте величину погрешности при использовании начальной аналитической модели рефракции в сравнение с использованием таблиц рефракции АЕ. Расчет сделайте для предельных высот наблюдений.
10. Сколько требуется среднего времени, чтобы Солнце после полного погружения под горизонт ушло на глубину более 6° ? Расчет проведите для даты начала учебной практики.
11. Рассчитайте время погружения Солнца под горизонт на 6° для дат начала и конца практики.
12. Рассчитайте момент истинной полуночи по звездному и среднему времени для дат начала и конца практики.
13. Определите условия видимости Луны для всего промежутка практики.
14. Определите, возможно ли во время практики наблюдать покрытие ярких звезд Луной?
15. Каким образом можно определить для эфемеридных звезд, не будут ли в поле зрения инструмента одновременно видны несколько звезд?
16. Можно ли наблюдать кульминации Полярной звезды в течение учебной практики?
17. Рассчитайте, на сколько изменяется высота Полярной звезды на промежутке времени в 10^8 . Расчет проведите для полуночи по гражданскому времени для даты середины практики. Оцените, как ошибка фиксации момента времени наблюдения Полярной звезды может влиять на точность определения широты.

18. При наблюдениях в каких местах суточной параллели Полярной звезды можно получить максимальную точность определения широты места?
19. Рассчитайте, в какой момент звездного времени происходят элонгации Полярной звезды. Видны ли они в период наблюдений?
20. Какой знак имеет ошибка определения широты при наблюдении прохождений звезд вблизи меридиана вследствие неточной ориентации инструмента в меридиане?
21. Рассчитайте, насколько изменяется высота звезды со склонением $\delta = 0^\circ$, при ее прохождении через меридиан, если она проходит полное поле зрения теодолита GeoVox TE-02.
22. Определите минимально возможный промежуток времени относительно эфемеридного момента кульминации северной звезды, чтобы ее можно было пронаблюдать на всех трех нитях инструмента. Взять звезды с максимальным и минимальным из возможных склонений северных звезд.
23. Выше или ниже наблюдаются звезды пар Цингера относительно высоты, которую они проходят в одно и тоже время?
24. Рассчитайте время прохождения звезд пар Цингера через нити инструмента. Рассмотрите случай со средней высотой пары и прохождением альмукантарата точно в первом вертикале.
25. Возможно ли наблюдение по методу Цингера в меридиане?
26. Опишите характер видимого движения звезд пар Цингера в поле зрения инструмента вблизи первого вертикала.
27. Насколько меняется скорость движения звезды, выбранной для наблюдения по методу Цингера, по азимуту и высоте при прохождении от одного края поля зрения инструмента до другого? Для расчета возьмите характерное склонение звезд, образующих пары Цингера для широты и долготы Екатеринбурга.
28. Допустимо ли усреднять наблюдаемые моменты времени прохождения звездами пар Цингера нитей инструмента для последующего расчета поправки хронометра? Обоснуйте ответ.

2

Служба времени

Любые астрометрические наблюдения требуют точной временной привязки и одним из важных разделов практики является служба времени. Соответственно, одним из важнейших приборов на практике являются высокоточные часы. Не менее важен и протокол их применения, который должен минимизировать дополнительные погрешности, связанные, в основном, с человеческим фактором.

На примере азимутальной программы, как одной из наиболее требовательных к точности измерений, определим необходимую точность фиксации моментов времени. Ошибка определения азимута направления на земной объект вычисляется по следующей формуле

$$\Delta A = \cos q \frac{\cos \delta}{\sin z} \Delta t - \sin A \frac{\cos z}{\sin z} \Delta \varphi + \frac{\sin q}{\sin z} \Delta \delta, \quad (2.1)$$

где $\Delta t = \Delta T + \Delta u - \Delta \alpha$, ΔT — ошибка в фиксации момента наблюдения светила по часам, когда оно имеет часовой угол t , Δu — ошибка в известной поправке хронометра относительно местного времени, $\Delta \alpha$ — ошибка в значении координаты [1]. Для оценки можно считать $\Delta \alpha$, $\Delta \delta$, $\Delta \varphi$ равными нулю, т. к. точность каталожных данных достаточно высока, чтобы гарантировать низкую погрешность результата. Поскольку для азимутальной программы проводятся наблюдения в основном южных звезд в меридиане (для нашей широты это их верхние кульминации), параллактический угол q будет равен 0. С учетом широты места наблюдения и допустимого диапазона высот в верхней кульминации, склонение объектов в среднем близко к нулю.

Используемые на практике электронные теодолиты Geobox TE-02 обеспечивают точность измерения углов на уровне $\pm 2''$ и разрешающую способность трубы — $3.5''$. Исходя из этого, можно принять предельную требуемую погрешность определения азимута $\Delta A = \pm 4''$.

Подставим все значения в 2.1 и получим, что предельная погрешность фиксации момента времени составляет $\Delta T \approx 0.1 - 0.2^s$. С другой стороны ошибка определения поправки хронометра в методе Цингера вблизи первого вертикала оценивается как $\Delta u \sim \Delta T$ [1]. Определение поправки хронометра традиционным приемом сигналов точного времени по методу «глаз—ухо» (см. ниже) позволяет получать точность поправки на уровне нескольких сотых временной секунды. Соответственно и точность отсчета моментов времени должна быть порядка этой величины.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что желательная точность фиксации моментов времени должна быть порядка 0.01^s

Точные часы должны обеспечивать:

1. Качественную синхронизацию с эталонным временем.
2. Точность снятия отсчетов не меньше одной сотой секунды.

3. Равномерность хода.
4. Возможность фиксации моментов времени через кнопку или иное подходящее устройство фиксации для исключения метода «глаз—ухо», как требующего высокой квалификации наблюдателя и промежуточных этапов при фиксации моментов времени.

2.1 Реализация службы времени методами спутниковой навигации

Источником точного времени могут служить:

- отдельные высокоточные часы;
- встроенные в компьютер аппаратные часы;
- время, передаваемое глобальными системами спутниковой навигации, с которым могут быть синхронизированы компьютерные часы.

Отдельные высокоточные часы, так называемые рабочие эталоны единиц времени и частоты, могли бы быть хорошим вариантом. Они обеспечивают высокую точность, но они требуют периодической сверки с эталонами, являются сложным и дорогостоящим оборудованием, и их использование в полевых условиях затруднено.

Поскольку желательно обеспечить компьютерную фиксацию моментов времени (для уменьшения роли человеческих ошибок), то очевидным было бы использование встроенных в компьютеры аппаратных часов. Ход компьютерных часов определяется характеристиками обычного нетермостатированного кварцевого генератора, что не позволяет получить относительную точность хода автономных часов компьютера лучше, чем 10^{-4} — 10^{-5} . Использование компьютерных часов возможно при регулярной (и достаточно частой) их синхронизации с каким-либо эталоном времени.

Возможно использование компьютерных часов, синхронизированных с интернет-серверами точного времени по протоколу NTP (Network Time Protocol). Точность синхронизация порядка 0.1^s может быть достигнута при наличии стабильной связи с сервером времени в сети. Но обеспечить необходимую точность синхронизации в реальных условиях трудно.

Технически доступным и стабильным является вариант использования времени, передаваемого спутниковыми навигационными системами [2] (собственная погрешность $\Delta t \sim 10^{-9}$ с), с которым могут быть периодически синхронизированы компьютерные часы.

2.1.1 Использование систем глобальной спутниковой навигации в целях службы времени

Для решения задач практики используется специализированный высокоточный приемник службы времени Trimble[©] Acutime Gold GPS Smart Antenna. GPS-приемник имеет два интерфейса: PPS (Pulse Per Second) и COM-порт (RS-422). После включения питания, он автоматически отслеживает сигналы навигационных спутников, генерирует секундную метку (1PPS) и посылает сообщение на COM-порт, содержащее привязку метки к UTC в пределах ± 15 нс. Реально нет необходимости для задач практики реализовывать столь высокую точность синхронизации. Другой вариант работы с приемником заключается в

подключении СОМ-порта к компьютеру без дополнительной обработки pps-сигнала. Производитель приемника предоставляет программу, которая позволяет периодически синхронизировать компьютерные часы с часами приемника. Заявленная производителем точность синхронизации составляет порядка 0.001 с. Наличие в комплекте оборудования преобразователя сигналов интерфейса RS-422 в сигналы USB-порта позволяет подключить приемник сигналов спутниковой навигационной системы к любому современному компьютеру.

2.1.2 Методика использования спутникового оборудования

Технические характеристики приемника службы времени Trimble® Acutime Gold GPS Smart Antenna описаны в [3] и на официальном сайте компании Trimble <http://www.trimble.com/timing/acutime-gold-gps-antenna.aspx?dtID=overview>. Внешний вид приемника без модуля преобразования интерфейса приведен на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Приемник службы времени Trimble® Acutime Gold GPS Smart Antenna

Приемник следует закрепить на стойке, так, чтобы была обеспечена максимальная видимость верхней полусферы. Ветви кустов и деревьев могут создавать помехи прохождению сигналов. Приемник необходимо подсоединить к комплектному кабелю, а сам кабель к модулю преобразования интерфейса RS-422 \Leftrightarrow USB. USB кабель от модуля подключить к свободному порту компьютера; комплектный блок питания подключить к модулю преобразования интерфейса и включить в сеть электропитания. Выключателем питания включить модуль преобразования интерфейса.

Для нормальной работы модуля преобразования интерфейса на компьютере должны быть установлены драйверы для работы с преобразователями интерфейса фирмы Future Technology Devices International Limited® (FTDI). В случае их отсутствия, драйверы следует установить до подключения устройства. Драйверы можно получить по адресу <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>.

Для того, чтобы подключенный приемник службы времени мог выполнять свою основную функцию: периодически синхронизировать встроенные часы компьютера с высокоточной шкалой атомного времени, передаваемой с сигналами глобальной системы спутникового позиционирования, на компьютере должно быть установлено и запущено специализированное программное обеспечение. Оно может быть получено по адресу http://www.trimble.com/timing/acutime-gold_support.asp?Nav=Collection-68392. Для работы с приемником необходима программа Trimble GPS Studio®. Все подробности работы

с Trimble GPS Studio[©] описаны в [4]. Для подключения, инициализации и использования приемника службы времени необходимо последовательно выполнить операции, описанные в главе «Using GPS Studio With GPS Timing Receivers». После этого в программе Trimble GPS Studio[©] в меню Tools выбрать пункт TimeKeeper и активировать периодическую синхронизацию компьютерных часов в режиме UTC с периодом 5–10 мин.

Ввод информации о моменте времени пересечения звездой нити в поле зрения трубы реализован с помощью специального устройства, подключаемого к компьютеру по шине USB. Оно позволяет одновременно обрабатывать информацию от восьми независимых кнопочных пультов и получить доступ к этой информации из внешних программ. Реализация кнопочного ввода информации о моменте времени наблюдателем позволяет уменьшить количество промежуточных этапов в передаче и фиксации данных. Также такой способ позволяет получить погрешность фиксации момента, зависящую от человеческого фактора на уровне характерного времени психофизиологических реакций человека (порядка 0.01 с), что соответствует необходимой точности фиксации моментов времени для задач практики.

Устройство ввода сигналов реализовано с применением программируемого преобразователя интерфейсов FTDI Mini Module FT2232H. Это модуль преобразователя протокола шины USB в стандартные последовательные и параллельные интерфейсы на основе специализированной микросхемы FT2232H — высокоскоростного двухпортового USB-моста, реализующего весь физический уровень и протоколы USB шины. FTDI Mini Module FT2232H показан на рис. 2.2. Для использования модуля совместно с проводными кнопочными пультами с проводами большой длины (10–15 м), модуль дополнен входными формирователями сигналов, защищенными от маломощных высоковольтных (до 3–5 кВ) входных помех и от дребезга контактов кнопочных пультов. Принципиальная схема устройства ввода приведена в Приложении А.2. Устройство подключается к любому свободному USB порту компьютера.



Рисунок 2.2 – Внешний вид FTDI Mini Module FT2232H

Для нормальной работы устройства ввода сигналов на компьютере должны быть установлены драйверы для работы с преобразователями интерфейса фирмы Future Technology Devices International Limited[®] (см. выше). Для работы с устройством ввода сигналов от кнопочных пультов реализована программа Chr, работающая под управлением Microsoft[®] Windows, версии от XP и выше. Программа фиксирует моменты нажатия кнопок на пультах и выводит значения моментов времени в отдельные для каждого пульта области вы-

вода с точностью до сотых долей секунды. Далее эти значения переносятся в журналы наблюдений. Тестирование программы в течение летней практики на ноутбуке с операционной системой Microsoft® Windows 7 показало, что она выполняет все необходимые функции, но для бесперебойной работы должны быть отключены возможности операционной системы по гибернации и уходу в «сон», а также хранитель экрана.

Обратите внимание, что программно-аппаратный комплекс приема сигналов времени от спутниковых навигационных систем и устройство фиксации моментов времени нажатия кнопок на кнопочных пультах выдает конечные результаты в системе поясного UTC времени. Для обработки наблюдений все эти моменты должны быть переведены в звездное время на дату наблюдения.

2.2 Шкалы времени

При выполнении задач практики необходимо оперировать разными шкалами времени. Все эфемеридные вычисления и алгоритмы обработки обработки используют шкалу звездного времени. Программно-аппаратный комплекс приема сигналов времени от спутниковых навигационных систем и устройство фиксации моментов времени нажатия кнопок на кнопочных пультах работает со средним поясным временем (точнее — в системе UTC с учетом поясного времени). Вследствие этого необходимо четко понимать особенности различных шкал времени и способы перехода от одной шкалы к другой.

2.2.1 Использование шкал времени

Одноименные промежутки времени, отнесенные к различным шкалам времени (звездной или среднесолнечной), неодинаковы. Это связано с неравенством одноименных единиц времени. Кроме того, шкала звездного времени непрерывно смещается относительно шкалы солнечного времени, вследствие этого начало звездных суток ($S = t\gamma = 0^h 0^m$) в разные дни года приходится на различные моменты солнечных суток.

Как осуществляется связь между основными системами времени — средней и звездной? Исходя из действительного числа звездных и средних солнечных суток в тропическом году, можно определить соотношение между единицами звездного и среднего времени:

$$365.2422 \dots \text{ средних суток} = 366.2422 \dots \text{ звездных суток.} \quad (2.2)$$

Таким образом, в единице среднего времени (сутки, час, минута, секунда) содержится $\frac{366.2422 \dots}{365.2422 \dots}$ соответствующих единиц звездного времени, или, в более общей формулировке: в любом произвольном промежутке времени, измеренном в средних единицах, содержится в $\frac{366.2422 \dots}{365.2422 \dots}$ раз больше звездных единиц. Соответственно, в любом произвольном промежутке времени, измеренном в звездных единицах, содержится в $\frac{365.2422 \dots}{366.2422 \dots}$ раз меньше средних единиц. Приведенные рассуждения позволяют осуществить перевод *промежутков времени*, выраженных в одних единицах, в *те же* промежутки времени, но выраженные в других единицах.

Только что мы рассмотрели связь между единицами звездного и среднего времени. А теперь нам надо узнать, как устанавливается связь между основными системами времени. Нуль-пункты шкал звездного и среднего времени (начала соответствующих суток) являются «скользящими» — они непрерывно смещаются друг относительно друга в течение года. Для связи шкал звездного и среднего времени в Астрономическом Ежегоднике на каждую дату приводятся значения звездного времени в 0^h всемирного времени, т. е. в момент нижней кульминации среднего солнца на начальном меридиане. Обозначим эту величину через $S_0 = s(M = 0^h)$, который характеризует часовой угол точки весеннего

равноденствия в указанный физический момент. Для связи шкал воспользуемся схемой, изображенной на рис. 2.3, представляющей своеобразную временную ось.

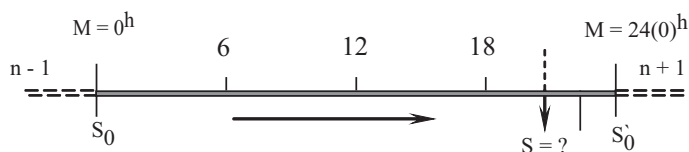


Рисунок 2.3 – Связь шкал звездного и среднего времени

Пусть по верхней линейке течет среднее время, а по нижней — звездное время. Жирной линией здесь выделены средние сутки. По среднему времени мы отмечаем не только время, но и меняем даты (например, дата n , а также две другие, смежные с заданной — $(n - 1)$ и $(n + 1)$). Вертикальными штрихами на схеме отмечены моменты $M = 0^h$ даты n и последующей даты $(n + 1)$; для каждого из этих моментов указано звездное время S_0 и S_0' в среднюю гринвичскую полночь (см. табл. АЕ «Звездное время»).

На практике приходится решать два вида задач по переходу от одной шкалы времени к другой. Решение обоих видов задач проще осуществить при помощи редукции на начальный меридиан.

Первым и наиболее часто встречающимся на практике видом задач является задача вычисления звездного времени s в пункте с долготой λ в фиксированный момент декретного (поясного) солнечного времени $T_d(T_N)$ в заданную дату.

Решение задачи осуществляется в следующем порядке:

1. Осуществить переход от декретного (зимнего или летнего) времени к поясному времени:

$$\begin{aligned} T_N &= T_{sd} - 2^h \text{ для летнего декретного времени,} \\ T_N &= T_{wd} - 1^h \text{ для зимнего декретного времени.} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2. Перейти от поясного времени T_N к всемирному времени (среднему солнечному времени начального меридиана) $UT(M)$:

$$UT = T_N - N. \quad (2.4)$$

3. Всемирное время UT суть промежуток времени ΔM , прошедший с момента средней гринвичской полночи до момента времени UT , измеренный в средних солнечных единицах. Переводим этот промежуток времени в звездные единицы и получим промежуток времени, прошедший с момента средней гринвичской полночи ($UT = 0^h, M = 0^h$), в звездных единицах Δs :

$$\Delta s = \Delta M \frac{366.2422...}{365.2422...} \equiv UT \frac{366.2422...}{365.2422...}. \quad (2.5)$$

4. Звездное время в среднюю гринвичскую полночь $s(M = 0^h) = S_0$ получаем из АЕ на заданную дату (обратите внимание на возможную смену даты на Гринвиче при переходе от поясного времени к гринвичскому времени). Используя ранее полученное значение Δs , вычисляем звездное время на Гринвиче в заданный момент всемирного времени UT :

$$S = S_0 + \Delta s. \quad (2.6)$$

5. Осуществляем обратный переход от начального меридиана к пункту с заданной долготой λ и, используя правило «разность времен есть разность долгот», получаем искомое значение местного звездного времени s :

$$s = S + \lambda \text{ для пунктов восточнее Гринвича.} \quad (2.7)$$

Рассмотренная последовательность операций может быть выражена как

$$s(\lambda, T_N) = S_0 + (T_N - N) \frac{366.2422\dots}{365.2422\dots} + \lambda, \quad (2.8)$$

где T_N должно быть определено по зимнему или летнему декретному времени (если вычисления проводятся для территории России).

Вторым видом задач является определение местного среднего времени или поясного времени по звездному времени s в пункте наблюдения с долготой λ . Так, по сути дела, находят среднее время, поскольку оно непосредственно из наблюдений не определяется. Такую задачу решают в пунктах с хорошо известной долготой (ими являются астрономические обсерватории) посредством наблюдений кульминаций звезд с высокоточными значениями их прямых восхождений.

Решение задачи осуществляется в следующем порядке:

1. Производим редукцию местного звездного времени s на начальный меридиан используя правило «разность времен есть разность долгот» и получаем звездное время на Гринвиче S :

$$S = s - \lambda \text{ для пунктов восточнее Гринвича.} \quad (2.9)$$

2. Разность между звездным временем на Гринвиче S и звездным временем в среднюю гринвическую полночь S_0 суть интервал времени, прошедшего с момента средней гринвической полночи, выраженный в звездных единицах времени. Переводя его в средние единицы времени, получим интервал времени, прошедшего с момента средней гринвической полночи, выраженный в средних единицах времени ΔM или всемирное время UT :

$$\Delta M \equiv UT = (S - S_0) \frac{365.2422\dots}{366.2422\dots}. \quad (2.10)$$

3. По всемирному времени UT получаем поясное и соответствующее декретное время:

$$\begin{aligned} T_N &= UT + N, \\ T_{wd} &= T_N + 1^h, \\ T_{sd} &= T_N + 2^h. \end{aligned} \quad (2.11)$$

4. Местное среднее солнечное время m определяется используя правило «разность времен есть разность долгот» по всемирному времени UT и известной долготе заданного пункта λ :

$$m = UT + \lambda \text{ для пунктов восточнее Гринвича.} \quad (2.12)$$

Рассмотренная последовательность операций может быть выражена как

$$\begin{aligned} T_N(s, \lambda) &= (s - \lambda - S_0) \frac{365.2422\dots}{366.2422\dots} + N, \\ T_{wd} &= T_N + 1^h, \\ T_{sd} &= T_N + 2^h, \\ m(s, \lambda) &= (s - \lambda - S_0) \frac{365.2422\dots}{366.2422\dots} + \lambda. \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.2.2 Применение механического хронометра

На настоящее время использование имеющихся механических морских хронометров непосредственно для обеспечения службы времени при наблюдениях представляется по ряду причин неэффективным и даже невозможным. Возраст хронометров превышает сто лет, что привело к потере стабильности суточного хода, высокой чувствительности к изменению температуры и влажности. Уменьшение количества радиостанций, передающих сигналы службы времени, резкое усложнение электромагнитной обстановки по шумам в эфире и отсутствие специализированных радиоприемных устройств с блоками сравнения сигналов точного времени и хронометров делает практически невозможной точную сверку хронометров с эталонным сигналом. Вследствие этого невозможно определить ход хронометров с необходимой для наблюдений точностью. Поэтому механический звездный хронометр выполняет на практике вспомогательную роль. Он используется для определения момента звездного времени, указанного в эфемеридах наблюдений, что удобнее, чем пересчитывать звездные моменты в средние отдельно для каждого суток наблюдений. Таким образом, моменты наблюдений тех или иных звезд определяются по показаниям звездного хронометра. Процедура наблюдений предусматривает заблаговременное выставление инструмента на эфемериды выбранной звезды. Поэтому высокая точность показаний звездного хронометра не требуется. Допустима погрешность его показаний вплоть до одной—двух минут. Хронометр выставляется по синхронизированным с точным временем компьютерным часам, для чего выбранный момент среднего времени пересчитывается в звездное время и оно выставляется на звездном хронометре с точностью до секунды. Учитывая, что ход звездного хронометра составляет около 0.2—0.3 с/ч, новая установка показаний звездного хронометра при регулярном его заводе может понадобится примерно через десять суток.

2.3 Типовые вопросы

1. Объясните, чем определяется то, что для разных программ астрометрических наблюдений требуется различная точность фиксации моментов времени.
2. Каким фактором ограничивается предельная точность фиксации моментов времени, в случае, если то или иное событие наблюдается человеком?
3. Какой из факторов оказывает сильное влияние на точность фиксации момента времени: рефракция, атмосферное размытие?
4. С чем связан тот факт, что для звезд с различными экваториальными координатами требуется различная точность фиксации моментов времени для получения требуемой итоговой точности наблюдений, либо при одной точности фиксации моментов, наблюдения окажутся неравноточными?
5. Опишите, какие источники точного времени (часы) могут практически применяться при полевых наблюдениях. Укажите их достоинства и недостатки.
6. Какие еще преимущества, кроме высокой точности, дает использование спутниковых навигационных систем в качестве источника времени?
7. Укажите внешние факторы, которые могут осложнить, либо сделать невозможным применение спутниковой навигационной системы в реальных условиях.
8. Сделайте оценку, с какой точностью должны быть взяты звездное время на Гринвиче в среднюю гринвичскую полночь и опорная долгота пункта, чтобы при пересчете

среднего времени, полученного от спутниковой навигационной системы, в звездное, погрешность перевода не превысила 0.01 с.

9. Сделайте оценку, аналогичную заданной в вопросе 36, для коэффициента перевода средних промежутков времени в звездные промежутки времени $\left(\frac{366.2422\dots}{365.2422\dots}\right)$.
10. Что такое критическая дата, и попадает ли хотя бы одна из таких дат на период летней учебной практики?
11. Опишите алгоритм выбора звездного времени на Гринвиче на момент средней гринвичской полночи из таблиц АЕ, на текущее время наблюдения.
12. Укажите, при каких ограничениях и в каких задачах возможно применение средних часов вместо звездных при наблюдениях.
13. На какую величину за время проведения практики сместится шкала звездного времени относительно среднего времени. Приведите числовые примеры для начала и конца практики.
14. Докажите аналитически, что разность средних либо звездных времен пунктов с произвольными выбранными долготами всегда равна разности долгот этих пунктов.
15. Покажите, какую погрешность в определении момента звездного времени по кульминации звезды с известными координатами можно получить, если разрешающая способность трубы инструмента составляет 3".
16. Является ли шкала звездного времени равномерной шкалой?
17. Опишите способ приближенного определения звездного времени на произвольный момент среднего времени без использования таблиц АЕ.
18. Опишите практические методы синхронизации часов.
19. На какой угол Земля поворачивается за 1^h звездного и среднего времени.
20. Дайте общее определение понятия сутки.
21. Покажите причину разной продолжительности года в звездных и средних сутках.
22. Определите моменты истинной и средней полуночи для даты середины практики. Каково в этот день уравнение времени?
23. Насколько среднее солнечное время отличается от поясного времени для Учебной астрономической обсерватории?
24. Укажите, как определить звездное время на момент истинного полудня в заданную дату?
25. Рассчитайте абсолютную погрешность григорианского календаря.
26. Насколько разойдутся среднее и звездное время за время прохождения звезды через поле зрения инструмента при наблюдении южной кульминации звезды с нулевым склонением?
27. На сколько могут различаться моменты кульминации при переносе инструмента из крайней восточной в крайнюю западную точки учебной обсерватории?

3

Широтно-долготная программа (полевые наблюдения)



Рисунок 3.1 – Общее устройство и внешний вид электронного цифрового теодолита GeoBox TE-02

Применяемые на практике электронные цифровые теодолиты Geobox TE-02 (см. рис. 3.1) имеют настраиваемые режимы работы горизонтального и вертикального кругов. Перед проведением любых видов измерений следует убедиться и, при необходимости, настроить следующие режимы (см. [5]):

1. Вертикальный круг должен находиться в режиме измерения зенитных расстояний.
2. Для горизонтального круга установите такой вариант снятия отсчетов с круга (кнопкой R/L на пульте прибора (см. рис. 3.2) выбор между круг право (КП) и круг лево (КЛ)), чтобы при физически левом положении вертикального круга относительно наблюдателя, отсчеты по горизонтальному кругу увеличивались при повороте алидадной части инструмента по часовой стрелке.

При осуществлении программ, содержащих в себе измерение зенитного расстояния объекта, необходимо обязательно снять показания термометра и барометра, которые в дальнейшем будут использованы для вычисления поправки за рефракцию. Показания



Рисунок 3.2 – Отсчетное устройство и пульт управления теодолитом GeoBox TE-02

термометра и барометра должны быть записаны в журнал наблюдений соответствующей программы.

На всех журналах наблюдений обязательно должны быть указаны дата наблюдений, номер теодолита и фамилии наблюдателей. Делать исправления в журналах запрещено. Допускается только зачеркивание неверной записи и добавление верной.

3.1 Подготовка к наблюдениям. Поверки и юстировки инструмента

Перед началом измерений теодолит необходимо тщательно осмотреть и проверить, так как даже серийно выпускаемые приборы имеют свои индивидуальные особенности. В первую очередь производят проверку и регулировку его механических деталей, обращая внимание на состояние и работу всех винтов прибора: подъемных, зажимных и наводящих винтов лимба и алидады, наводящего винта уровня вертикального круга, исправительных (юстировочных) винтов уровней, колонок, сетки нитей и т. п. Вращение лимба и алидады должно быть плавным, без заеданий и колебаний. Горизонтальный и вертикальный угломерные круги не должны иметь механических повреждений; изображения делений шкал и сетки нитей должны быть четкими. Зрительная труба должна быть уравновешенной и иметь свободное вращение.

Присутствие пыли и грязи на оптических деталях прибора не допускается. После внеш-

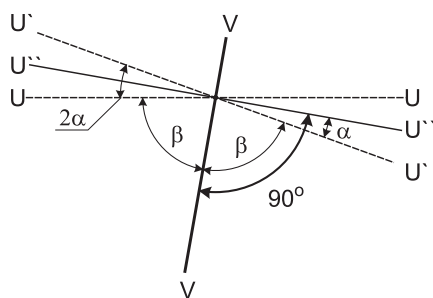


Рисунок 3.4 – Проверка положения оси цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга теодолита. VV — вертикальная ось вращения теодолита; UU — положение оси цилиндрического уровня, выставленного «на середину»; $U'U'$ — положение оси цилиндрического уровня после поворота алидады на 180° ; $U''U''$ — положение оси цилиндрического уровня после юстировки исправительными винтами уровня

Предварительно плоскость лимба приводят в горизонтальное положение по невыверенному уровню, для чего поворотом алидады устанавливают цилиндрический уровень параллельно линии, соединяющей два подъемных винта, и вращая их в противоположные стороны, приводят пузырек уровня в нуль-пункт. Затем алидаду поворачивают на 90° и вращением третьего винта приводят пузырек уровня в нуль-пункт. При этом ось цилиндрического уровня занимает горизонтальное положение UU , образуя с осью вращения VV прибора угол β (см. рис. 3.4). К отсчету по горизонтальному кругу прибавляют 180° и полученное значение поворотом алидады устанавливают на горизонтальном круге, т. е. поворачивают алидаду на 180° . При этом ось цилиндрического уровня, сохраняя с осью вращения угол β , занимает положение $U'U'$ и отклоняется от горизонтального положения на угол 2α . На рис. 3.4 $2\alpha + 2\beta = 180^\circ$, а $\alpha + \beta = 90^\circ$, т. е. биссектриса $U''U''$ угла 2α перпендикулярна к оси вращения прибора.

Для юстировки половину отклонения следует устранить юстировочными винтами уровня, а затем повторить проверку. Проверку и юстировку следует выполнять до тех пор, пока после поворота алидады на 180° пузырек уровня будет отклоняться не более чем на 0.5 деления уровня. Проверку и юстировку уровней, расположенных под углом 90° , следует проводить поочередно.

Следует заметить, что ошибка в отсчете по горизонтальному кругу из-за невыполнения этого условия, т. е. из-за наклона вертикальной оси теодолита, не исключается при выводе среднего из результатов измерений при круге лево и круге право.

При наличии круглого уровня в теодолите должно выполняться следующее условие: ось круглого уровня должна быть параллельна вертикальной оси вращения теодолита. Юстировка круглого уровня производится его исправительными винтами после точной установки вертикальной оси теодолита по выверенному цилиндрическому уровню.

3.1.2 Правильность установки сетки нитей трубы

Правильность установки сетки нитей трубы проверяют после приведения оси вращения теодолита в отвесное положение с помощью отъюстированного уровня при алидаде.

При проверке трубу наводят на хорошо видимую точку. Если изображение точки при вращении трубы вокруг горизонтальной оси, пройдя вдоль вертикального штриха, будет находиться посередине между штрихами биссектора, то сетка установлена правильно. Если будет замечено смещение изображения точки более чем на треть величины биссектора, то сетку необходимо развернуть. Для этого следует снять колпачок, закрывающий юстиро-

вочные винты сетки, слегка отпустить винты, скрепляющие окуляр с корпусом трубы, и развернуть окуляр вместе с сеткой. После этого проверка повторяется вновь. При выполнении проверки допускается также наводить на выбранную точку горизонтальную нить сетки, смещая затем изображение точки в поле зрения наводящим винтом алидады.

Вертикальность бисектора (вертикальной нити) сетки можно проверить, совмещая его с изображением нити отвеса, опущенного своей нижней частью в ведро с маслом (машинным, трансформаторным) или с водой, смешанной с просеянными опилками.

3.1.3 Визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси ее вращения (коллимация)

Как известно, визирная ось трубы должна проходить через оптический центр объектива и перекрестие сетки нитей. Если указанное условие выполняется, то при вращении трубы вокруг горизонтальной оси визирная ось образует коллимационную плоскость. При несоблюдении условия визирная ось будет описывать не плоскость, а две конические поверхности. Угол C между фактическим положением визирной оси OK' и требуемым положением OK (см. рис. 3.5) называется коллимационной погрешностью. Следует понимать, что в полосности горизонтального круга инструмента угол $K'OK$ будет равен коллимационной погрешности только в том случае, если визирная ось находится в плоскости истинного горизонта. В противном случае, на точность измерения горизонтального угла будет оказывать не сама величина коллимационной погрешности C , а ее проекция на плоскость горизонта $x = C \cos(h)$, где h — высота наблюдаемого объекта над плоскостью горизонта. Другими словами, наблюдения объектов вблизи зенита практически не искажаются коллимацией, а точное определение коллимации следует производить при наблюдении объектов лежащих вблизи плоскости горизонта.

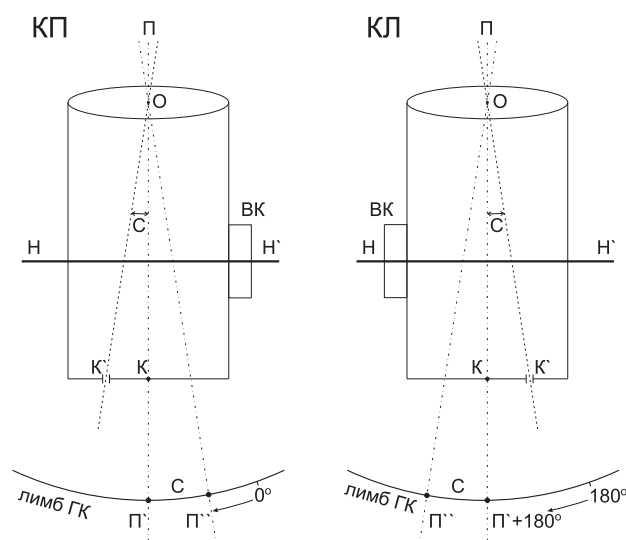


Рисунок 3.5 – Определение коллимационной погрешности теодолита

Как видно из рис. 3.5, при КП отсчет по лимбу Π'' будет меньше правильного отсчета Π' на величину x , а при КЛ отсчет Π'' будет больше правильного отсчета¹ $\Pi' \pm 180^\circ$ на ту

¹знак «-» выбирается, если значение КЛ – КП положительно и близко к 180° ; знак «+» выбирается, если значение КЛ – КП отрицательно и близко к -180°

же величину x , т. е.

$$\Pi' = \text{КП} + x, \quad (3.1)$$

$$\Pi' \pm 180^\circ = \text{КЛ} - x, \quad (3.2)$$

где отсчет Π' при круге право обозначен как КП, а при круге лево — КЛ. Следовательно

$$\Pi' = \frac{(\text{КП} + \text{КЛ}) \pm 180^\circ}{2}, \quad (3.3)$$

$$x = \frac{(\text{КЛ} - \text{КП}) \pm 180^\circ}{2}. \quad (3.4)$$

Для проверки теодолита с *двухсторонней* отсчетной системой по лимбу необходимо:

1. привести ось вращения прибора в отвесное положение;
2. навести зрительную трубу на удаленную, отчетливо видимую цель и сделать отсчет КЛ по горизонтальному кругу;
3. перевести трубу через зенит, навести ее на ту же цель и вновь сделать отсчет КП по горизонтальному кругу.

Разность отсчетов КЛ — КП, полученных при двух положениях вертикального круга, должна быть равна 180° . Отклонение разности от 180° , согласно формуле (3.4), равно двойной коллимационной погрешности.

В теодолитах с *односторонней* системой отсчетов по лимбу разность отсчетов КЛ — КП будет искажена не только влиянием коллимационной погрешности C , но и влиянием эксцентриситета алидады, величина которого в отдельных образцах теодолитов может достигать $\pm 1'$. Определение двойной коллимационной погрешности указанных теодолитов следует выполнять следующим образом.

Приводят ось вращения теодолита в отвесное положение, визируют на одну и ту же точку при двух положениях вертикального круга и получают по горизонтальному кругу разность отсчетов $\text{КЛ}_1 - \text{КП}_1$.

Затем открепляют винт подставки, поворачивают теодолит в подставке на 180° , приводят вертикальную ось вращения прибора в отвесное положение, вновь наводят **на ту же точку** и получают разность $\text{КЛ}_2 - \text{КП}_2$. Величина двойной коллимационной погрешности равна²

$$2C = \frac{(\text{КЛ}_1 - \text{КП}_1 \pm 180^\circ) + (\text{КЛ}_2 - \text{КП}_2 \pm 180^\circ)}{2} \quad (3.5)$$

Фактически по формуле (3.5) вычисляется величина $2x$, а не $2C$. Для повышения точности определения коллимации следует наблюдать объекты расположенные максимально близко к плоскости горизонта.

Для того, чтобы исправить коллимацию, необходимо выставить на горизонтальном круге «истинный» отсчет (точка Π' на рис. 3.5), то есть отсчет, исправленный за коллимацию. Определение «истинного» отсчета для теодолитов с двухсторонней системой снятия отсчетов по горизонтальному кругу осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} 2C &= \text{КЛ} - \text{КП} \pm 180^\circ, \\ 2C - 2C &= \text{КЛ} - \text{КП} \pm 180^\circ - 2C, \\ 0^\circ &= (\text{КЛ} - C) - (\text{КП} + C) \pm 180^\circ, \end{aligned} \quad (3.6)$$

²правило выбора знака см. в сноске 1

а для теодолитов с односторонней системой отчетов вычисляется как

$$\begin{aligned} 4C &= (КЛ_1 - КП_1 \pm 180^\circ) + (КЛ_2 - КП_2 \pm 180^\circ), \\ 4C - 4C &= (КЛ_1 - КП_1 \pm 180^\circ) + (КЛ_2 - КП_2 \pm 180^\circ) - 4C, \\ 0^\circ &= (КЛ_1 - C) - (КП_1 + C) \pm 180^\circ - (КЛ_2 - C) - (КП_2 + C) \pm 180^\circ. \end{aligned} \quad (3.7)$$

«Истинным» отсчетом для обоих случаев является значение $(КЛ - C)$ для КЛ и $(КП + C)$ для КП. Величина C входит в эти соотношения с учетом своего знака. После выставления исправленного отсчета для соответствующего круга, объект-марка сместиться с креста сетки нитей. Объект необходимо вернуть в крест сетки нитей. Для этого отвернуть колпачок и шпилькой при слегка отпущенных вертикальных исправительных винтах переместить оправу сетки при помощи боковых исправительных винтов до совмещения перекрестия сетки с изображением наблюдаемой точки. Затем снова производится полная процедура определения коллимации. Точная установка перпендикулярности осей, то есть исправление коллимации, обычно достигается в несколько приемов.

3.1.4 Место нуля МО (зенита MZ) вертикального круга

Местом зенита называют отсчет по вертикальному кругу, который соответствует направлению визирной оси трубы в истинный зенит. Для идеального инструмента $MZ = 90^\circ$.

Место нуля МО (зенита MZ) вертикального круга следует определить при тех же условиях, что и коллимационную ошибку. Перед взятием отсчетов приводят пузырек уровня при вертикальном круге на середину (за исключением приборов с компенсатором). Вычисление и исправление МО (MZ) производят одновременно с определением и исправлением коллимации. Значение МО определяется по отсчетам вертикального круга в двух положениях инструмента при наведении на один предмет.

$$МО = \frac{КП + КЛ}{2}. \quad (3.8)$$

Если величины МО у теодолита получились более установленной величины, то, значение МО вертикального круга теодолита уменьшают перемещением сетки в вертикальном направлении юстировочными винтами сетки нитей. Для юстировки МО устанавливают на вертикальном круге отсчет, равный $КЛ - МО$ и $МО - КП$, и юстировочными винтами перемещают оправу с сеткой до совмещения горизонтальной нити с изображением выбранной цели. После этого необходимо убедиться в том, что визирная ось трубы перпендикулярна к оси вращения трубы и горизонтальная нить сетки перпендикулярна к вертикальной оси вращения теодолита. Юстировку МО в теодолитах с компенсаторами производят только в условиях мастерских смещением специальной юстировочной призмы.

Для теодолита GeoVox TE-02 обязательными ежедневными поверками являются поверки цилиндрического уровня при алидаде, коллимации и места нуля вертикального круга. Поверки должны вестись в соответствии с паспортом инструмента [5]. Поверку коллимационной погрешности, в случае, если нет возможности обеспечить две длинные базы измерений, можно проводить по методике описанной выше, в варианте двусторонней отсчетной системы. Проверку места зенита вертикального круга необходимо проводить исходя из соотношения:

$$КП + КЛ = 360^\circ, \quad (3.9)$$

которое выполняется для случая идеального инструмента. Таким образом, отличие суммы отсчетов по вертикальному кругу при различных положениях круга от 360° и будет удвоенным местом зенита инструмента.

3.2 Определение широты по Полярной звезде

3.2.1 Методика ориентации инструмента

При выходе на наблюдения инструмент устанавливается, горизонтируется. После этого производятся текущие поверки инструмента [5] (коллимация и место зенита) с целью убедиться в его работоспособности и пригодности к наблюдениям. Взамен окуляра к инструменту присоединяется насадка для наблюдений на малых зенитных расстояниях (см. рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Насадка для наблюдений на малых зенитных расстояниях теодолита GeoBox TE-02

Подбираем ближайший момент времени из эфемерид Полярной звезды по звездному времени. За 10 минут до этого момента выставляем на горизонтальном круге отсчёт, равный соответствующему эфемеридному азимуту (работаем только при одном круге лево). Для этого выполняем следующие операции:

1. Открыв горизонтальный круг зажимным винтом горизонтального наведения, выставляем поворотом алидады максимально близкое к эфемеридному значение азимута.
2. Закрепив горизонтальный круг зажимным винтом, винтом точного горизонтального наведения выставляем точное эфемеридное значение азимута.
3. Нажатием на кнопку «Hold» блокируем изменение показаний горизонтального круга при повороте алидады.
4. Открыв вертикальный круг зажимным винтом вертикального наведения, грубо выставляем эфемеридное зенитное расстояние Полярной звезды.

5. Закрепив вертикальный круг зажимным винтом вертикального наведения, винтом точного вертикального наведения устанавливаем точное значение эфемеридного зенитного расстояния Полярной звезды.
6. Открыв горизонтальный круг зажимным винтом, поворачивая инструмент по азимуту, наводим трубу на Полярную звезду. Загоняем звезду в центр креста нитей, закрепляем горизонтальный круг, и, действуя винтом точного горизонтального наведения и винтом точного вертикального наведения, удерживаем звезду в кресте нитей.
7. При совпадении эфемеридного момента со звездным временем по вспомогательному хронометру, помощник дает команду на прекращение ведения Полярной звезды винтами точного наведения.
8. Повторное нажатие на кнопку «Hold» разблокирует изменение показаний горизонтального круга при повороте алидады.
9. Если в дальнейшем не планируется наблюдать Полярную звезду, то следует заменить зенитную окулярную насадку на рабочий окуляр.

После осуществления всей последовательности действий отсчет по ГК должен быть равен азимуту Полярной. Это обеспечивает отсчет равный 0° на юге. После этого наводимся на какой-либо предмет тем же КЛ и снимаем отсчет по ГК, получив, тем самым, азимут этого предмета. Таким образом, мы привязали наш инструмент к ориентиру и, если случайно произойдет сбой, можем проконтролировать ориентацию инструмента. Все данные записываются в журнал наблюдений.

Внимание: после ориентации инструмента в течение всей ночи наблюдений **запрещается** нажимать кнопку L/R, меняющую направление отсчета по ГК и кнопку «Hold». Если подобное произойдет, то процедуру ориентации инструмента по Полярной звезде необходимо повторить!

3.2.2 Определение широты по наблюдениям Полярной

По эфемеридам выставляем азимут и высоту Полярной для выбранного момента времени и, действуя винтом точного вертикального наведения и винтом точного горизонтального наведения, приводим звезду в центр сетки нитей. Наблюдатель, удерживая Полярную звезду в центре креста нитей, в момент, когда с его точки зрения наведение на звезду является наиболее точным, нажимает на кнопку пульта фиксации момента времени, прекращая ведение звезды по азимуту и высоте. В журнал наблюдений (см. Приложение А.3) записывается этот момент времени, показания горизонтального и вертикального кругов. Далее процедура повторяется необходимое количество раз.

3.3 Определение широты по звездам в меридиане

3.3.1 Определение широты по наблюдениям звезд в меридиане

Внимание: ведение звезды по азимуту **не допускается!**

Наблюдение обеих звезд пары ведется при одном положении круга (как правило, это КЛ).

По вычисленным эфемеридам наблюдения пар звезд в меридиане выбираем удобную по времени звезду и примерно за десять минут выставляем инструмент в меридиан при КЛ (при наведении на южную звезду выставляем на ГК отсчет 0° , на севере — 180°). На

ВК выставляем эфемеридное зенитное расстояние этой звезды. Теодолит имеет прямое изображение и, следовательно, звезда пойдёт слева направо, практически параллельно горизонтальной нити. Когда звезда появляется в поле зрения трубы, подводим звезду на горизонтальную нить винтом точного вертикального наведения.

Непосредственно перед пересечением вертикальной нити наблюдатель прекращает ведение по высоте. В момент пересечения вертикальной нити, наблюдатель нажимает кнопку пульта фиксации момента времени снимает отсчёт по вертикальному кругу и также сообщает его Помощнику для записи в журнал (см. Приложение А.4). Момент времени также фиксируется в журнале наблюдений. Тем временем звезда подходит к следующей нити, и все вышеописанные действия повторяются в том же порядке. Таким образом, фиксируются пересечения всех трёх нитей.

Момент прохождения звездой центральной нити должен быть приблизительно равным эфемеридному моменту. невыполнение этого условия говорит о том, что инструмент сбит по азимуту.

После наблюдения одной из звезд пары производится перевод инструмента на другую звезду путем поворота алидады по азимуту. Переключать трубу через зенит в этой программе нельзя!

3.4 Определение долготы и поправки хронометра по наблюдениям звезд на равных высотах методом Цингера

3.4.1 Методика определения поправки хронометра по наблюдениям методом Цингера

Внимание: ведение звезды по зенитному расстоянию **не допускается!**

После ориентирования инструмента выбираем подходящую по времени пару, выставляем отсчеты по эфемеридам. После этого и до окончания наблюдения обеих звезд пары **недопустимо** откреплять зажимной винт вертикального наведения и пользоваться винтом точного вертикального наведения.

При появлении звезды в поле зрения, подводим ее к вертикальной нити винтом точного горизонтального наведения, но не сажаем звезду на нить, а ведем рядом. Когда звезда пересекает горизонтальную нить, наблюдатель нажимает кнопку пульта фиксации момента времени. Момент времени записывается в журнал (см. Приложение А.5). Всего должно быть три отсчета (по числу нитей у теодолита).

Затем, вращая алидаду по азимуту, поворачиваем инструмент примерно на 180° , закрепляем алидаду и выставляем винтом точного горизонтального наведения точное эфемеридное значение азимута второй звезды пары. Далее действия повторяются, и мы получаем три отсчета моментов времени для второй звезды пары.

3.5 Типовые вопросы

1. Опишите возможности по работе с горизонтальным кругом электронного цифрового теодолита GeoBox TE-02.
2. Сделайте выводы о возможности реализации на теодолите GeoBox TE-02 метода полных круговых приемов для измерения горизонтальных углов.

3. Укажите, при выполнении каких условий возможно корректное измерение вертикальных углов теодолитом GeoBox TE-02.
4. Опишите предварительные этапы подготовки инструмента к работе.
5. Что характеризует величина МО теодолита GeoBox TE-02 в случае, если он полностью исправен и проходит все обязательные поверки.
6. К каким последствиям для измерения вертикальных и горизонтальных углов будет приводить неустранимая коллимационная погрешность инструмента?
7. Что может приводить к большому значению коллимационной ошибки?
8. Рассчитайте, какую погрешность в ориентации инструмента по азимуту даст неучтенная поправка механического хронометра в 1^m .
9. Каким способом должно производиться ведение Полярной звезды при ориентации инструмента?
10. Учитывая, что для определения широты по Полярной звезде, необходимо измерить высоту Полярной, укажите, в какой части суточной параллели звезды это выгоднее всего делать?
11. С какой целью определение широты по наблюдениям пар звезд в меридиане ведется при одном положении круга инструмента?
12. Какая поверка обязательно должна выполняться и контролироваться в течение ночи наблюдений, чтобы были выполнены главные условия метода Цингера?
13. С чем связано, что метод Цингера реализуется при одном положении круга инструмента?
14. Допустимо ли ведение звезды по азимуту в методе Цингера, есть ли причины ограничивающие это ведение?
15. Как влияет на коллимационную погрешность рост влажности в течение ночи наблюдений?
16. Какие действия с теодолитом могут привести к необходимости повторного ориентирования инструмента?
17. На каких этапах наблюдений необходимо проверять и выводить фокусировку трубы?
18. Почему фокусировку инструмента необходимо проверять в темное время суток?
19. Что может приводить к самопроизвольному смещению цилиндрического уровня исправного инструмента?
20. Опишите возможные процедуры определения углового расстояния боковых нитей от средней с максимальной точностью.
21. Какова процедура исправления МО у теодолита GeoBox TE-02?
22. По какой координате необходимо вести трубу инструмента непосредственно перед пересечением звездой нити в меридианных наблюдениях?

23. В какую сторону следует вращать наводящие винты инструмента для получения максимально стабильных результатов?
24. Как проверить стабильность установки инструмента при наблюдениях?
25. Возможно ли провести ориентацию инструмента не по Полярной звезде?
26. Возможно ли использовать Полярную звезду для ориентации инструмента только один раз за период практики?
27. Необходимо ли пользоваться центриром инструмента и всегда устанавливать его точно над одной точкой?

4

Обработка и анализ данных наблюдений (камеральная обработка)

При обработке журналов наблюдений существует ряд предварительных операций, которые осуществляются для всех программ наблюдений.

1. Точность хода компьютерных часов (не хуже 10^{-3} с), синхронизированных по атомным эталонам систем спутникового глобального позиционирования, заведомо превышает требуемую для программ наблюдений. Поэтому, никаких дополнительных поправок часов в полученные моменты времени не вводится.
2. В журналах фиксируется время момента наблюдения, полученное от спутниковой навигационной системы в шкале UTC (атомное координированное время, воспроизводящее среднюю солнечную шкалу времени). Алгоритмы обработки программ наблюдений подразумевают использование моментов звездного времени. Поэтому все моменты наблюдений, записанные в журналах, должны быть пересчитаны в моменты звездного времени и только после этого использоваться в алгоритмах обработки наблюдений. Процедура пересчета подробно описана в разделе 2.2.1.
3. Все измеренные зенитные расстояния должны быть исправлены за рефракцию. Поправки за рефракцию берутся из таблиц АЕ (бумажное издание — в электронной версии таблицы рефракции отсутствуют) либо в постоянной части Астрономического календаря [6]. Необходимые таблицы называются «Средняя рефракция» и «Поправки к средней рефракции за температуру T и барометрическое давление B ». Полученные по таблицам поправки должны быть прибавлены к измеренным зенитным расстояниям.
4. При вычислениях, в качестве экваториальных координат звезд следует брать координаты из таблицы АЕ «Видимые места звезд», интерполированные на дату наблюдения. Прямое восхождение брать с точностью до сотых временной секунды, склонение — до десятых угловой секунды.

4.1 Методы обработки программ наблюдений

Внимание: в случае, если измерения в программе наблюдений проводятся для нескольких нитей в поле зрения инструмента, **запрещается** производить усреднение измеренных величин и их приведение на среднюю нить. Результаты наблюдений для каждой нити обрабатываются отдельно. Усреднять допускается только итоговые результаты обработки.

В качестве приближенных значений координат пункта наблюдения (для Учебной астрономической обсерватории кафедры астрономии и геодезии) необходимо использовать следующие величины:

$$\begin{aligned}\varphi &= +56^{\circ}49'40'', \\ \lambda &= 04^h02^m32.68^s \text{ в. д.}\end{aligned}\tag{4.1}$$

4.1.1 Определение широты по наблюдениям Полярной звезды

Для вычисления широты необходимо воспользоваться разделом АЕ «Широта по наблюдениям Полярной». Раздел содержит три таблицы для определения трех поправок к измеренной высоте Полярной звезды над горизонтом. Поэтому измеренные и исправленные за рефракцию зенитные расстояния следует пересчитать в высоту по соотношению $z + h = 90^{\circ}$. Обратите внимание на имеющиеся примечания к таблицам.

Из первой таблицы определяется первая поправка $\Delta\varphi_1$. Для этого табличные значения должны быть интерполированы на момент наблюдений, взятый с точностью минимум до секунд.

По второй таблице определяется вторая поправка $\Delta\varphi_2$, как функция двух переменных: высоты и звездного времени наблюдения. Для получения поправки следует сделать двумерную интерполяцию табличных значений на полученные при наблюдениях высоту и момент времени. Высоту следует брать из журналов наблюдений с точностью до угловых минут, а время — до временных минут.

Третья таблица содержит третью поправку $\Delta\varphi_3$, также как функцию двух переменных: даты наблюдений и момента звездного времени наблюдений. Для получения поправки следует сделать двумерную интерполяцию табличных значений на дату и полученное при наблюдениях время. Время при интерполяции необходимо брать с точностью до десятых долей часа.

По получении всех поправок вычисляется итоговое значение широты

$$\varphi = h + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3.\tag{4.2}$$

Результаты расчетов поместите в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Определение широты по наблюдениям Полярной звезды

Дата дд:мм	s $hh\ mm\ ss.ss$	$z_{\text{изм}}$ ° ' "	Рефр., ρ''	$z_{\text{испр}}$ ° ' "	h ° ' "	$\Delta\varphi_1$ ' "	$\Delta\varphi_2$ ' "	$\Delta\varphi_3$ "	φ ° ' "	Наблюдатель
...

После выполнения расчетов необходимо провести статистическую обработку полученных результатов. Проведите анализ на выпадающие значения, определите среднее значение широты, ее среднеквадратичное отклонение, укажите доверительный интервал для вероятности 0.97.

4.1.2 Определение широты по наблюдениям пар звезд в меридиане при одном положении вертикального круга

Вычисление широты по измеренному зенитному расстоянию звезд в меридиане осуществляется в предположении, что наблюдение звезды производится точно в меридиане.

В реальности, из-за неточности ориентации инструмента и наблюдения на нескольких пространственно разнесенных нитях, это не так. Необходимо исправить измеренные значения высоты за внемеридиональные наблюдения.

Широту вычисляют в следующем порядке. Цикл вычислений проводится для каждой пары из южной и северной звезд. Для вычисления широты осуществите следующие этапы.

1. После обработки журнала наблюдений и выборки из АЕ *видимых* α и δ звезд пары вычисляют часовые углы звезд в моменты каждого измерения их зенитных расстояний (для каждой нити) по формулам

$$\begin{aligned} t_i &= s_i - \alpha, \text{ верхняя кульминация,} \\ t_i &= s_i - \alpha \pm 12^h, \text{ нижняя кульминация,} \end{aligned} \quad (4.3)$$

где s_i — звездное время в момент измерения зенитного расстояния, исправленное за ход хронометра. Таким образом, $s = T + u$, где T — показания звездного хронометра; u — поправка хронометра на момент времени измерений. В случае использования времени спутниковых навигационных систем, оно непосредственно пересчитывается в звездное время, поправка за ход не вводится.

2. Прямые восхождения звезд исправляют поправками за влияние суточной аберрации по формуле

$$\Delta\alpha = 0.0213^s \cos \varphi_0 \sec \delta \cos t \cong \pm 0.0213^s \cos \varphi_0 \sec \delta, \quad (4.4)$$

где φ_0 — приближенное значение широты, используемое при вычислении эфемерид; знак «плюс» берется для южной звезды ($t \simeq 0^h$), знак «минус» — для северной звезды ($t \simeq 12^h$).

3. Для астрономического инструмента, у которого деления вертикального круга нанесены *по ходу часовой стрелки*, измеренное зенитное расстояние z' звезды определяют по формуле

$$z' = M_z - z_{\text{КП}}^{\text{изм}} = z_{\text{КЛ}}^{\text{изм}} - M_z, \quad (4.5)$$

где M_z — место зенита инструмента.

Если деления оцифрованы против хода часовой стрелки, то $z_{\text{КЛ}}^{\text{изм}} - M_z$ заменяется на $M_z - z_{\text{КЛ}}^{\text{изм}}$, а $M_z - z_{\text{КП}}^{\text{изм}}$ заменяется на $z_{\text{КП}}^{\text{изм}} - M_z$.

4. Вычислив видимые зенитные расстояния z' южной и северной звезд, находят поправки за рефракцию ρ_S и ρ_N , пользуясь таблицами рефракции АЕ. Определив ρ_S и ρ_N , находят истинные зенитные расстояния z_i для каждого из моментов наблюдений (нитей сетки) южной и северной звезд пары.

$$z_i = z' + \rho. \quad (4.6)$$

5. Вычисляем величины

$$z_{m_0} = \varphi_0 - \delta_S = \delta_N - \varphi_0 \quad (4.7)$$

для обеих звезд пары.

6. Определяем редукцию близмеридионального зенитного расстояния светила на меридиан для всех нитей

$$\begin{aligned} r_i &= z_i - z_m^i, \text{ верхняя кульминация,} \\ r_i &= z_m^i - z_i, \text{ нижняя кульминация,} \end{aligned} \quad (4.8)$$

где z_m — зенитное расстояние звезды в меридиане. Для принятых обозначений редукция r_i всегда положительна.

Для звезд в верхней кульминации

$$r_i = \frac{2\rho'' \cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin \frac{1}{2}(z_i + z_{m_0})} \sin^2 \frac{t_i}{2}. \quad (4.9)$$

Редукция на меридиан близмеридионального зенитного расстояния для звезды в нижней кульминации может быть вычислена также по формуле (4.9), если часовой угол отсчитывать от нижней (северной) части меридиана.

По формуле (4.9) вычисляется редукция на меридиан r_i^N, r_i^S для наблюдений зенитного расстояния на всех нитях северной и южной звезд пары.

7. Вычислить меридиональные зенитные расстояния для наблюдений зенитного расстояния на всех нитях северной и южной звезд пары

$$\begin{aligned} z_m^i &= z_i - r_i, \text{ верхняя кульминация,} \\ z_m^i &= z_i + r_i, \text{ нижняя кульминация.} \end{aligned} \quad (4.10)$$

8. Для каждой из звезд пары по полученным меридиональным зенитным расстояниям (4.10) вычислить средние меридиональные зенитные расстояния звезд пары z_m^N и z_m^S .

9. По полученным средним меридиональным зенитным расстояниям вычислить широту места для данной пары звезд.

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_N + \varphi_S) = 90^\circ - \frac{1}{2}(\delta_N - \delta_S) + \frac{1}{2}(z_m^S - z_m^N). \quad (4.11)$$

Формула (4.11) верна в случае, когда северная звезда пары наблюдается в нижней кульминации. Для случая верхней кульминации на севере, вычисление ведется по формуле

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_N + \varphi_S) = \frac{1}{2}(\delta_N + \delta_S) + \frac{1}{2}(z_m^S - z_m^N). \quad (4.12)$$

Приведенная выше процедура обработки наблюдений повторяется для всех пар звезд, наблюдавшихся в программе. В завершение расчета производится статистический анализ результатов, полученных по всем наблюдаемым парам звезд: отбрасываются выпадающие значения, находится среднее значение широты, ее среднеквадратичное отклонение, указывается доверительный интервал для вероятности 0.97.

4.2 Вычисление поправки хронометра по наблюдениям пар звезд на равных высотах методом Цингера

В методе Цингера используется следующий прием для вычисления редукции r , определенной в 1.11.

Пусть α_e, δ_e и α_w, δ_w — видимые координаты восточной и западной звезды, T_e и T_w — соответственные моменты наблюдений этих звезд на одной и той же высоте по звездному хронометру, u — поправка хронометра, φ — широта места наблюдения. Так как обе звезды наблюдаются на одной и том же зенитном расстоянии z , то по формулам сферического треугольника имеем:

$$\begin{aligned} \sin \varphi \sin \delta_e + \cos \varphi \cos \delta_e \cos(\alpha_e - T_e - u) &= \\ = \sin \varphi \sin \delta_w + \cos \varphi \cos \delta_w \cos(T_w + u - \alpha_w). \end{aligned} \quad (4.13)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{2}(\delta_w + \delta_e), \\ \varepsilon &= \frac{1}{2}(\delta_w - \delta_e), \\ t &= \frac{1}{2}(\alpha_e - \alpha_w - T_e + T_w), \\ r &= u + \frac{1}{2}(T_e + T_w) - \frac{1}{2}(\alpha_e + \alpha_w). \end{aligned}$$

Тогда получаем

$$\begin{aligned} \delta_w &= \delta + \varepsilon, \\ \delta_e &= \delta - \varepsilon, \\ \alpha_e - T_e - u &= t - r, \\ T_w + u - \alpha_w &= t + r, \end{aligned} \quad (4.14)$$

теперь подставим (4.14) в (4.13) и получаем

$$\begin{aligned} \sin \varphi \sin(\delta - \varepsilon) + \cos \varphi \cos(\delta - \varepsilon) \cos(t - r) &= \\ = \sin \varphi \sin(\delta + \varepsilon) + \cos \varphi \cos(\delta + \varepsilon) \cos(t + r). \end{aligned}$$

Отсюда следует

$$\begin{aligned} \cos \varphi [\cos(\delta - \varepsilon) \cos(t - r) - \cos(\delta + \varepsilon) \cos(t + r)] &= \\ = \sin \varphi [\sin(\delta + \varepsilon) - \sin(\delta - \varepsilon)] \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} \cos \varphi [(\cos \delta \cos \varepsilon + \sin \delta \sin \varepsilon)(\cos t \cos r + \sin t \sin r) - \\ - (\cos \delta \cos \varepsilon - \sin \delta \sin \varepsilon)(\cos t \cos r + \sin t \sin r)] &= \\ = 2 \sin \varphi \sin \varepsilon \cos \delta. \end{aligned}$$

Разделив на $\cos \varphi$, раскрыв скобки и произведя приведения подобных членов, получаем

$$\begin{aligned} 2 \sin \delta \sin \varepsilon \cos r \cos t + 2 \cos \delta \cos \varepsilon \sin r \sin t &= \\ &= 2 \operatorname{tg} \varphi \sin \varepsilon \cos \delta. \end{aligned}$$

Далее, разделив обе части на $2 \cos \delta \cos \varepsilon \sin t$, имеем

$$\sin r + \cos r \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{ctg} t = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{cosec} t.$$

Введем вспомогательные углы m и n тип такие, что

$$\operatorname{tg} m = \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{ctg} t,$$

$$\sin n = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{cosec} t \cos m;$$

тогда

$$\sin r + \cos r \operatorname{tg} m = \frac{\sin n}{\cos m},$$

или

$$\sin r \cos m + \cos r \sin m = \sin n,$$

и, следовательно,

$$\sin(r + m) = \sin n,$$

и

$$r + m = n,$$

а потому

$$r = n - m.$$

Так как ε невелико, а t не близко к нулю, то m и n суть величины небольшие; m , n и t получаются при таком вычислении **в секундах дуги**, и потому окончательная формула для u принимает вид

$$u = \frac{1}{2} (\alpha_e + \alpha_w) - \frac{1}{2} (T_e + T_w) + \frac{1}{15} (n - m). \quad (4.15)$$

В каждой паре звезд расчет ведется отдельно для нитей, воспроизводящих одну высоту (две верхних, две средних, две нижних). Таким образом, для каждой пары рассчитывается три значения поправки хронометра и, при отсутствии выпадающих значений, все они усредняются в одну величину поправки для данной пары. Расчет повторяется для всех наблюдаемых пар. Общее усреднение поправок не делается, поскольку они соответствуют различным моментам времени.

4.3 Типовые вопросы

1. Насколько необходимо исправлять измеренные при наблюдениях высоты за полученное перед наблюдениями МО вертикального круга теодолита GeoBox TE-02?
2. Оцените, какую дополнительную погрешность зенитного расстояния может дать изменение температуры воздуха на 10°C в течение ночи. Давление считать постоянным.
3. Оцените дополнительную погрешность определения широты по парам звезд в меридиане, если вместо видимого склонения в расчетах будет использовано среднее склонение звезды.

4. Оцените дополнительную погрешность определения поправки хронометра по методу Цингера, если вместо видимого склонения и прямого восхождения в расчетах будет использовано среднее склонение и прямое восхождение звезды.
5. Какую систематическую погрешность в определение широты будет вносить отсутствие поправки за рефракцию при наблюдении Полярной звезды?
6. Предложите методику определения широты по наблюдениям Полярной звезды без использования специальных таблиц Астрономического ежегодника.
7. Насколько необходимо отклониться от меридиана по азимуту, чтобы погрешность в определении широты превысила предел разрешения зрительной трубы теодолита GeoBox TE-02?
8. В процедуре расчета определения поправки хронометра по методу Цингера укажите для всех переменных их размерности, наименования и порядки величин, входящих во все формулы расчета.
9. Укажите, как по полученной поправке хронометра получить уточненную долготу пункта наблюдения.
10. Объясните причину, по которой нельзя производить усреднение наблюденных моментов времени в методе Цингера на среднюю нить.
11. Как ведет себя угол наклона суточной параллели звезды по отношению к горизонту в течение звездных суток? Укажите области наибольшего и наименьшего наклонов.
12. Как соотносятся прямые восхождения звезд в паре Цингера, если первая звезда — восточная, а вторая — западная?
13. В каком случае ряды наблюдений могут иметь систематически увеличивающиеся либо уменьшающиеся результаты?
14. Опишите процедуру проверки результатов на выпадающие значения.
15. Что характеризует дисперсия результатов наблюдения?
16. Можно ли считать среднее и дисперсию для ряда наблюдений, полученного разными наблюдателями?
17. Влияет ли рефракция на наблюдения по методу Цингера?
18. Покажите, с какой точностью должны использоваться промежуточные результаты вычислений тригонометрических функций в методе Цингера.

Литература

- [1] *Кузнецов А. Н.* Геодезическая астрономия. — М.: Недра, 1966. — С. 370.
- [2] *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS. — М.: Техносфера, 2002. — С. 400.
- [3] Acutime Gold datasheet. — http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-366428/Acutime_DS.pdf.
- [4] Trimble® GPS Studio Application User guide. — http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-550718/GPSStudioUG_1B_August2011.pdf.
- [5] Электронный теодолит ТЕ-02/05/20. Описание. Инструкция пользователя. — <http://www.geobox.ru/documents/TE020520.pdf>.
- [6] Астрономический календарь. Постоянная часть, Ред. В. К. Абалакин. — М.: Наука, 1981.
- [7] *Бакулин П. И., Блинов Н. С.* Служба точного времени. — М.: Наука, 1977. — С. 352.
- [8] Руководство по астрономическим определениям. ГКИНП-01-153-81. — М.: Недра, 1984.

Приложение А

Приложение

А.1 Список контрольных тестов

1. Объясните, по какой причине эфемериды для астрономических наблюдений рассчитываются как функция звездного времени? Возможно ли использование того или иного вида солнечного времени для построения эфемерид?
2. Почему требуемая точность вычисления эфемерид обычно определяется именно величиной углового поля зрения инструмента?
3. Поясните, на каких этапах эфемеридных вычислений и с какой целью, используется процедура интерполяции табличных значений?
4. Объясните суть процедуры линейной интерполяции.
5. Поясните, по какой причине порядок интерполирования при двумерной линейной интерполяции не имеет значения?
6. Рассчитайте время прохождения звезды через поле зрения теодолита GeoBox TE-02 для среднего склонения звезд, кульминирующих к югу и северу от зенита (в нижней кульминации) для широты Екатеринбурга.
7. Рассчитайте время полного захода Солнца под горизонт (от нижнего до верхнего края) для даты середины учебной практики. Зависит ли это время от склонения Солнца?
8. Покажите, влияет ли рефракция на время полного погружения Солнца под горизонт.
9. Рассчитайте величину погрешности при использовании начальной аналитической модели рефракции в сравнение с использованием таблиц рефракции АЕ. Расчет сделайте для предельных высот наблюдений.
10. Сколько требуется среднего времени, чтобы Солнце после полного погружения под горизонт ушло на глубину более 6° ? Расчет проведите для даты начала учебной практики.
11. Рассчитайте время погружения Солнца под горизонт на 6° для дат начала и конца практики.
12. Рассчитайте момент истинной полуночи по звездному и среднему времени для дат начала и конца практики.

13. Определите условия видимости Луны для всего промежутка практики.
14. Определите, возможно ли во время практики наблюдать покрытие ярких звезд Луной?
15. Каким образом можно определить для эфемеридных звезд, не будут ли в поле зрения инструмента одновременно видны несколько звезд?
16. Можно ли наблюдать кульминации Полярной звезды в течение учебной практики?
17. Рассчитайте, на сколько изменяется высота Полярной звезды на промежутке времени в 10^8 . Расчет проведите для полуночи по гражданскому времени для даты середины практики. Оцените, как ошибка фиксации момента времени наблюдения Полярной звезды может влиять на точность определения широты.
18. При наблюдениях в каких местах суточной параллели Полярной звезды можно получить максимальную точность определения широты места?
19. Рассчитайте, в какой момент звездного времени происходят элонгации Полярной звезды. Видны ли они в период наблюдений?
20. Какой знак имеет ошибка определения широты при наблюдении прохождений звезд вблизи меридиана вследствие неточной ориентации инструмента в меридиане?
21. Рассчитайте, насколько изменяется высота звезды со склонением $\delta = 0^\circ$, при ее прохождении через меридиан, если она проходит полное поле зрения теодолита GeoVox TE-02.
22. Определите минимально возможный промежуток времени относительно эфемеридного момента кульминации северной звезды, чтобы ее можно было пронаблюдать на всех трех нитях инструмента. Взять звезды с максимальным и минимальным из возможных склонений северных звезд.
23. Выше или ниже наблюдаются звезды пар Цингера относительно высоты, которую они проходят в одно и то же время?
24. Рассчитайте время прохождения звезд пар Цингера через нити инструмента. Рассмотрите случай со средней высотой пары и прохождением альмукантарата точно в первом вертикале.
25. Возможно ли наблюдение по методу Цингера в меридиане?
26. Опишите характер видимого движения звезд пар Цингера в поле зрения инструмента вблизи первого вертикала.
27. Насколько меняется скорость движения звезды, выбранной для наблюдения по методу Цингера, по азимуту и высоте при прохождении от одного края поля зрения инструмента до другого? Для расчета возьмите характерное склонение звезд, образующих пары Цингера для широты и долготы Екатеринбурга.
28. Допустимо ли усреднять наблюденные моменты времени прохождения звездами пар Цингера нитей инструмента для последующего расчета поправки хронометра? Обоснуйте ответ.
29. Объясните, чем определяется то, что для разных программ астрометрических наблюдений требуется различная точность фиксации моментов времени.

30. Каким фактором ограничивается предельная точность фиксации моментов времени, в случае, если то или иное событие наблюдается человеком?
31. Какой из факторов оказывает сильное влияние на точность фиксации момента времени: рефракция, атмосферное размытие?
32. С чем связан тот факт, что для звезд с различными экваториальными координатами требуется различная точность фиксации моментов времени для получения требуемой итоговой точности наблюдений, либо при одной точности фиксации моментов, наблюдения окажутся неравноточными?
33. Опишите, какие источники точного времени (часы) могут практически применяться при полевых наблюдениях. Укажите их достоинства и недостатки.
34. Какие еще преимущества, кроме высокой точности, дает использование спутниковых навигационных систем в качестве источника времени?
35. Укажите внешние факторы, которые могут осложнить, либо сделать невозможным применение спутниковой навигационной системы в реальных условиях.
36. Сделайте оценку, с какой точностью должны быть взяты звездное время на Гринвиче в среднюю гринвичскую полночь и опорная долгота пункта, чтобы при пересчете среднего времени, полученного от спутниковой навигационной системы, в звездное, погрешность перевода не превысила 0.01 с.
37. Сделайте оценку, аналогичную заданной в вопросе 36, для коэффициента перевода средних промежутков времени в звездные промежутки времени $\left(\frac{366.2422\dots}{365.2422\dots}\right)$.
38. Что такое критическая дата, и попадает ли хотя бы одна из таких дат на период летней учебной практики?
39. Опишите алгоритм выбора звездного времени на Гринвиче на момент средней гринвичской полночи из таблиц АЕ, на текущее время наблюдения.
40. Укажите, при каких ограничениях и в каких задачах возможно применение средних часов вместо звездных при наблюдениях.
41. На какую величину за время проведения практики сместится шкала звездного времени относительно среднего времени. Приведите числовые примеры для начала и конца практики.
42. Докажите аналитически, что разность средних либо звездных времен пунктов с произвольными выбранными долготами всегда равна разности долгот этих пунктов.
43. Покажите, какую погрешность в определении момента звездного времени по кульминации звезды с известными координатами можно получить, если разрешающая способность трубы инструмента составляет 3".
44. Является ли шкала звездного времени равномерной шкалой?
45. Опишите способ приближенного определения звездного времени на произвольный момент среднего времени без использования таблиц АЕ.
46. Опишите практические методы синхронизации часов.
47. На какой угол Земля поворачивается за 1^h звездного и среднего времени.

48. Дайте общее определение понятия сутки.
49. Покажите причину разной продолжительности года в звездных и средних сутках.
50. Определите моменты истинной и средней полуночи для даты середины практики. Каково в этот день уравнение времени?
51. Насколько среднее солнечное время отличается от поясного времени для Учебной астрономической обсерватории?
52. Укажите, как определить звездное время на момент истинного полудня в заданную дату?
53. Рассчитайте абсолютную погрешность григорианского календаря.
54. Насколько разойдутся среднее и звездное время за время прохождения звезды через поле зрения инструмента при наблюдении южной кульминации звезды с нулевым склонением?
55. На сколько могут различаться моменты кульминации при переносе инструмента из крайней восточной в крайнюю западную точки учебной обсерватории?
56. Опишите возможности по работе с горизонтальным кругом электронного цифрового теодолита GeoBox TE-02.
57. Сделайте выводы о возможности реализации на теодолите GeoBox TE-02 метода полных круговых приемов для измерения горизонтальных углов.
58. Укажите, при выполнении каких условий возможно корректное измерение вертикальных углов теодолитом GeoBox TE-02.
59. Опишите предварительные этапы подготовки инструмента к работе.
60. Что характеризует величина МО теодолита GeoBox TE-02 в случае, если он полностью исправен и проходит все обязательные поверки.
61. К каким последствиям для измерения вертикальных и горизонтальных углов будет приводить неустранимая коллимационная погрешность инструмента?
62. Что может приводить к большому значению коллимационной ошибки?
63. Рассчитайте, какую погрешность в ориентации инструмента по азимуту даст неучтенная поправка механического хронометра в 1^m .
64. Каким способом должно производиться ведение Полярной звезды при ориентации инструмента?
65. Учитывая, что для определения широты по Полярной звезде, необходимо измерить высоту Полярной, укажите, в какой части суточной параллели звезды это выгоднее всего делать?
66. С какой целью определение широты по наблюдениям пар звезд в меридиане ведется при одном положении круга инструмента?
67. Какая поверка обязательно должна выполняться и контролироваться в течение ночи наблюдений, чтобы были выполнены главные условия метода Цингера?

68. С чем связано, что метод Цингера реализуется при одном положении круга инструмента?
69. Допустимо ли ведение звезды по азимуту в методе Цингера, есть ли причины ограничивающие это ведение?
70. Как влияет на коллимационную погрешность рост влажности в течение ночи наблюдений?
71. Какие действия с теодолитом могут привести к необходимости повторного ориентирования инструмента?
72. На каких этапах наблюдений необходимо проверять и выводить фокусировку трубы?
73. Почему фокусировку инструмента необходимо проверять в темное время суток?
74. Что может приводить к самопроизвольному смещению цилиндрического уровня исправного инструмента?
75. Опишите возможные процедуры определения углового расстояния боковых нитей от средней с максимальной точностью.
76. Какова процедура исправления МО у теодолита GeoBox TE-02?
77. По какой координате необходимо вести трубу инструмента непосредственно перед пересечением звездой нити в меридианных наблюдениях?
78. В какую сторону следует вращать наводящие винты инструмента для получения максимально стабильных результатов?
79. Как проверить стабильность установки инструмента при наблюдениях?
80. Возможно ли провести ориентацию инструмента не по Полярной звезде?
81. Возможно ли использовать Полярную звезду для ориентации инструмента только один раз за период практики?
82. Необходимо ли пользоваться центриром инструмента и всегда устанавливать его точно над одной точкой?
83. Насколько необходимо исправлять измеренные при наблюдениях высоты за полученное перед наблюдениями МО вертикального круга теодолита GeoBox TE-02?
84. Оцените, какую дополнительную погрешность зенитного расстояния может дать изменение температуры воздуха на 10°C в течение ночи. Давление считать постоянным.
85. Оцените дополнительную погрешность определения широты по парам звезд в меридиане, если вместо видимого склонения в расчетах будет использовано среднее склонение звезды.
86. Оцените дополнительную погрешность определения поправки хронометра по методу Цингера, если вместо видимого склонения и прямого восхождения в расчетах будет использовано среднее склонение и прямое восхождение звезды.
87. Какую систематическую погрешность в определение широты будет вносить отсутствие поправки за рефракцию при наблюдении Полярной звезды?

88. Предложите методику определения широты по наблюдениям Полярной звезды без использования специальных таблиц Астрономического ежегодника.
89. Насколько необходимо отклониться от меридиана по азимуту, чтобы погрешность в определении широты превысила предел разрешения зрительной трубы теодолита GeoBox TE-02?
90. В процедуре расчета определения поправки хронометра по методу Цингера укажите для всех переменных их размерности, наименования и порядки величин, входящих во все формулы расчета.
91. Укажите, как по полученной поправке хронометра получить уточненную долготу пункта наблюдения.
92. Объясните причину, по которой нельзя производить усреднение наблюденных моментов времени в методе Цингера на среднюю нить.
93. Как ведет себя угол наклона суточной параллели звезды по отношению к горизонту в течение звездных суток? Укажите области наибольшего и наименьшего наклонов.
94. Как соотносятся прямые восхождения звезд в паре Цингера, если первая звезда — восточная, а вторая — западная?
95. В каком случае ряды наблюдений могут иметь систематически увеличивающиеся либо уменьшающиеся результаты?
96. Опишите процедуру проверки результатов на выпадающие значения.
97. Что характеризует дисперсия результатов наблюдения?
98. Можно ли считать среднее и дисперсию для ряда наблюдений, полученного разными наблюдателями?
99. Влияет ли рефракция на наблюдения по методу Цингера?
100. Покажите, с какой точностью должны использоваться промежуточные результаты вычислений тригонометрических функций в методе Цингера.

А.4 Журнал наблюдений пар звезд в меридиане

Журнал наблюдений прохождения южных и северных звезд в меридиане

Дата: _____ Инструмент: _____
 С = _____ МZ = _____
 t°С = _____ P_{мм рт. ст.} = _____
 S_n: _____
 S_к : _____

Наблюдатель: _____ Круг: _____

№ звезды	№ п.п	S	M _(вк)	Z изм.	Примечания
	1				
	2				
	3				

Наблюдатель: _____ Круг: _____

№ звезды	№ п.п	S	M _(вк)	Z изм.	Примечания
	1				
	2				
	3				

Наблюдатель: _____ Круг: _____

№ звезды	№ п.п	S	M _(вк)	Z изм.	Примечания
	1				
	2				
	3				

Наблюдатель: _____ Круг: _____

№ звезды	№ п.п	S	M _(вк)	Z изм.	Примечания
	1				
	2				
	3				

ОРП 1

ОРП 3

ОРП 2

ОРП 4

Рисунок А.3 – Журнал наблюдений южных и северных звезд в меридиане

A.5 Журнал наблюдений пар Цингера

Журнал наблюдений прохождения южных и северных звезд в меридиане

Дата: _____ Инструмент: _____
 С = _____ МZ = _____
 t°с = _____ P_{мм рт. ст.} = _____
 S_n: _____
 S_к : _____

Наблюдатель: _____ Круг: _____

№ звезды	№ п.п	S	M _(вк)	Z изм.	Примечания
	1				
	2				
	3				

Наблюдатель: _____ Круг: _____

№ звезды	№ п.п	S	M _(вк)	Z изм.	Примечания
	1				
	2				
	3				

Наблюдатель: _____ Круг: _____

№ звезды	№ п.п	S	M _(вк)	Z изм.	Примечания
	1				
	2				
	3				

Наблюдатель: _____ Круг: _____

№ звезды	№ п.п	S	M _(вк)	Z изм.	Примечания
	1				
	2				
	3				

ОРП 1

ОРП 3

ОРП 2

ОРП 4

Рисунок А.4 – Журнал наблюдений пар Цингера