



Е.Г. Гиенко

АСТРОМЕТРИЯ И ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

**Новосибирск
СГГА
2011**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

Е.Г. Гиенко

АСТРОМЕТРИЯ И ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Утверждено редакционно-издательским советом академии
в качестве учебного пособия для студентов 3-го курса,
обучающихся по направлению 120100 «Геодезия»

Новосибирск
СГГА
2011

УДК 528.28
Г465

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент СГГА *А.С. Глазунов*
кандидат технических наук, начальник сектора траекторных измерений Сибирского научно-исследовательского института метрологии *В.М. Тиссен*

Гиенко, Е.Г.

Г465 Астрометрия и геодезическая астрономия [Текст]: учеб. пособие / Е.Г. Гиенко. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 168 с.

ISBN 978-5-87693-432-1

Учебное пособие подготовлено кандидатом технических наук, доцентом Е.Г. Гиенко на кафедре астрономии и гравиметрии Сибирской государственной геодезической академии в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования и программами курсов «Астрометрия», «Геодезическая астрономия с основами астрометрии» для направления подготовки дипломированных специалистов 120100 «Геодезия».

Учебное пособие содержит понятия, положения и выводы, составляющие математический аппарат для решения задач астрометрии и геодезической астрономии. Описаны современные методы решения задач астрометрии: определение систем координат и времени, а также установление системы фундаментальных астрономических постоянных.

Учебное пособие рекомендовано к изданию Ученым советом Института геодезии и менеджмента СГГА.

Ответственный редактор – доктор технических наук, профессор, СГГА
К.М. Антонович

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

УДК 528.28

ISBN 978-5-87693-432-1

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия» (СГГА), 2011

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем издании рассматриваются вопросы, относящиеся к специальным дисциплинам «Астрометрия», «Геодезическая астрономия». Изучение этих вопросов предусматривает приобретение студентами теоретических знаний и практических навыков в области сферической, геодезической астрономии и астрометрии. Выпускники направления 120100 «Геодезия» специальностей 120103 «Космическая геодезия», 120102 «Астрономогеодезия» должны не только уметь решать задачи, относящиеся непосредственно к упомянутым выше разделам астрономии, но также применять полученные знания при изучении и практическом использовании теории и методов других специальных дисциплин. К этим дисциплинам относятся «Небесная механика», «Космическая геодезия», «Космическая навигация», «Высшая геодезия», «Теория фигуры Земли и планет» и др.

Задачами изучения курса следует считать возможность использования дипломированными специалистами геодезических специальностей полученных знаний для решения геодезических и геодинамических проблем научного и прикладного характера.

В результате изучения дисциплины «Астрометрия и геодезическая астрономия» дипломированные специалисты должны знать:

- геометрию небесной сферы, явления суточного движения звезд;
- системы координат и системы измерения времени, применяемые в астрономии и астрометрии, и принципы их установления;
- основные задачи астрометрии и методы их решения;
- организацию и работу служб определения параметров вращения Земли и координат полюса;
- теорию и методику астрономических редукций координат, создание звездных каталогов;
- интерполирование видимых мест светил и вычисление их на ПЭВМ;
- устройство астрономических инструментов;
- теорию и практику астрономических определений;
- точные способы определения астрономических координат и азимутов, их назначение;

А также уметь:

- составлять эфемериды светил;
- вычислять видимые места звезд;
- работать с Астрономическим Ежегодником;
- пользоваться бюллетенями служб определения ПВЗ и координат полюса;
- работать с астрономическими инструментами;
- выполнять астрономические наблюдения и их обработку.

Теоретической основой курса является сферическая астрономия – раздел астрономии, в котором рассматриваются математические методы решения задач, связанных с положением светил и видимым их движением, с использованием вспомогательной небесной сферы. В разделе «Сферическая астрономия» рассмотрены системы небесных координат и связь между ними, астрономические системы измерения времени, методы учета изменений координат светил, вызванных различными явлениями.

Астрометрия и геодезическая астрономия были выделены как самостоятельные дисциплины из раздела «Практическая астрономия». Геодезическая астрономия изучает способы определения географических координат точек земной поверхности и азимутов направлений по наблюдению светил. Астрометрия решает фундаментальные задачи установления инерциальной системы координат и создания комплекса астрономических постоянных на основе наблюдений светил, искусственных спутников Земли, космических аппаратов, внегалактических источников. Подробное описание решения задач геодезической астрономии и астрометрии приведено в соответствующих разделах. Здесь значительное место занимает рассмотрение современных методов астрометрии, основанных на наблюдениях Луны, искусственных спутников Земли, галактик и квазаров.

1. СФЕРИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

1.1. Системы координат, используемые в геодезической астрономии

1.1.1. Вспомогательная небесная сфера

Географические широты и долготы точек земной поверхности и азимуты направлений определяются из наблюдений небесных светил – Солнца и звезд. Для этого необходимо знать положение светил как относительно Земли, так и относительно друг друга. Положения светил могут задаваться в целесообразно выбранных системах координат. Как известно из аналитической геометрии, для определения положения светила σ можно использовать прямоугольную декартову систему координат XYZ или полярную – α, β, R (рис. 1.1).

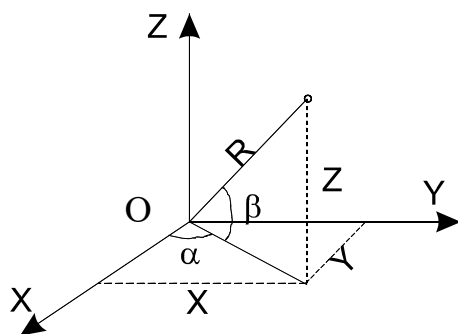


Рис. 1.1. Прямоугольная и полярная системы координат

В прямоугольной системе координат положение светила σ определяется тремя линейными координатами X, Y, Z . В полярной системе координат положение светила σ задается одной линейной координатой, радиусом-вектором $R = O\sigma$, и двумя угловыми: 1) углом α между осью X и проекцией радиуса-вектора на координатную плоскость XOY ; 2) углом β между координатной плоскостью XOY и радиусом-вектором R . Связь прямоугольных и полярных координат описывается формулами:

$$X = R \cos \beta \cos \alpha;$$

$$Y = R \cos \beta \sin \alpha;$$

$$Z = R \sin \beta,$$

$$\text{где } R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}.$$

Эти системы используются в тех случаях, когда линейные расстояния до небесных светил известны (например, для Солнца, Луны, планет, искусственных спутников Земли). Однако для многих светил, наблюдаемых за пределами Солнечной системы, эти расстояния либо чрезвычайно велики, по сравнению с радиусом Земли, либо неизвестны. Чтобы упростить решение астрономических задач и обойтись без расстояний до светил, полагают, что все светила находятся на произвольном, но одинаковом расстоянии от наблюдателя. Обычно это расстояние принимают равным единице, вследствие чего положение светил в пространстве может определяться не тремя, а двумя угловыми координатами α и β полярной системы. Известно, что геометрическое место точек, равноудаленных от данной точки «О», есть сфера с центром в этой точке.

Вспомогательная небесная сфера – воображаемая сфера произвольного или единичного радиуса, на которую проецируются изображения небесных светил (рис. 1.2).

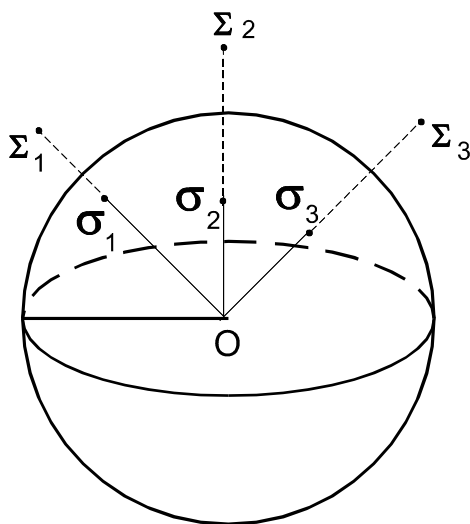


Рис. 1.2. Вспомогательная небесная сфера

Положение любого светила σ на небесной сфере определяется при помощи двух сферических координат, α и β :

$$x = \cos \beta \cos \alpha;$$

$$y = \cos \beta \sin \alpha;$$

$$z = \sin \beta.$$

В зависимости от того, где расположен центр небесной сферы О, различают:

- 1) *топоцентрическую* небесную сферу (центр находится на поверхности Земли);
- 2) *геоцентрическую* небесную сферу (центр совпадает с центром масс Земли);
- 3) *гелиоцентрическую* небесную сферу (центр совмещен с центром Солнца);
- 4) *барицентрическую* небесную сферу (центр находится в центре тяжести Солнечной системы).

Основные круги, точки и линии небесной сферы

Основные круги, точки и линии небесной сферы изображены на рис. 1.3.

Одним из основных направлений относительно поверхности Земли является направление *отвесной линии*, или силы тяжести в точке наблюдения. Это направление пересекает небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках – Z и Z' . Точка Z находится над центром и называется *зенитом*, Z' – под центром и называется *надиром*.

Проведем через центр плоскость, перпендикулярную отвесной линии ZZ' . Большой круг $NESW$, образованный этой плоскостью, – *небесный (истинный), или астрономический горизонт*.

Это есть основная плоскость топоцентрической системы координат. На ней имеются четыре точки: S , W , N , E , где S – *точка Юга*, N – *точка Севера*, W – *точка Запада*, E – *точка Востока*. Прямая NS называется *полуденной линией*.

Прямая $P_N P_S$, проведенная через центр небесной сферы параллельно оси вращения Земли, называется *осью Мира*. Точки P_N – *северный полюс мира*; P_S – *южный полюс мира*. Вокруг оси Мира происходит видимое суточное движение небесной сферы.

Проведем через центр плоскость, перпендикулярную оси мира $P_N P_S$. Большой круг $QWQ'E$, образованный в результате пересечения этой плоскостью небесной сферы, называется *небесным (астрономическим) экватором*. Здесь Q – *верхняя точка экватора* (над горизонтом), Q' – *нижняя точка экватора* (под горизонтом). Небесный экватор и небесный горизонт пересекаются в точках W и E .

Плоскость $P_N Z Q S P_S Z' Q' N$, содержащая в себе отвесную линию и ось Мира, называется *истинным (небесным) или астрономическим меридианом*. Эта плоскость параллельна плоскости земного меридиана и перпендикулярна к плоскости горизонта и экватора. Ее называют начальной координатной плоскостью.

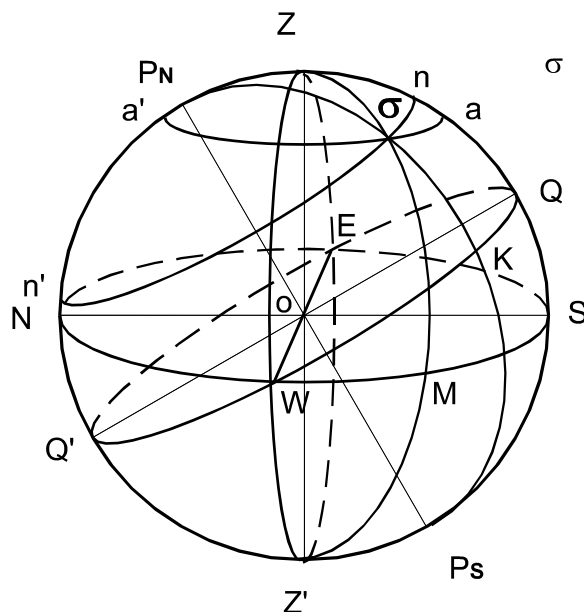


Рис. 1.3. Основные круги, точки и линии небесной сферы

Проведем через ZZ' вертикальную плоскость, перпендикулярную небесному меридиану. Полученный круг $ZWZ'E$ называется *первым вертикалом*.

Большой круг $Z\sigma Z'$, по которому вертикальная плоскость, проходящая через светило σ , пересекает небесную сферу, называется *вертикалом*, или *кругом высот светила*.

Большой круг $P_N\sigma P_S$, проходящий через светило перпендикулярно небесному экватору, называется *кругом склонения светила*.

Малый круг $p\sigma p'$, проходящий через светило параллельно небесному экватору, называется *суточной параллелью*. Видимое суточное движение светил происходит вдоль суточных параллелей.

Малый круг $a\sigma a'$, проходящий через светило параллельно небесному горизонту, называется *кругом равных высот*, или *альмукантаром*.

В первом приближении орбита Земли может быть принята за плоскую кривую – эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Плоскость эллипса, принимаемого за орбиту Земли, называется *плоскостью эклиптики*.

В сферической астрономии принято говорить о *видимом годовом движении Солнца* (рис. 1.4). Большой круг $E\gamma E'\underline{\Omega}$, по которому происходит видимое движение Солнца в течение года, называется *эклиптикой*. Плоскость эклиптики наклонена к плоскости небесного экватора на угол, примерно

равный $23,5^\circ$.

На рис. 1.4. показаны:

γ – точка весеннего равноденствия;

$\underline{\Omega}$ – точка осеннего равноденствия;

E – точка летнего солнцестояния; E' – точка зимнего солнцестояния;

$R_N R_S$ – ось эклиптики;

R_N – северный полюс эклиптики;

R_S – южный полюс эклиптики;

ε – наклон эклиптики к экватору.

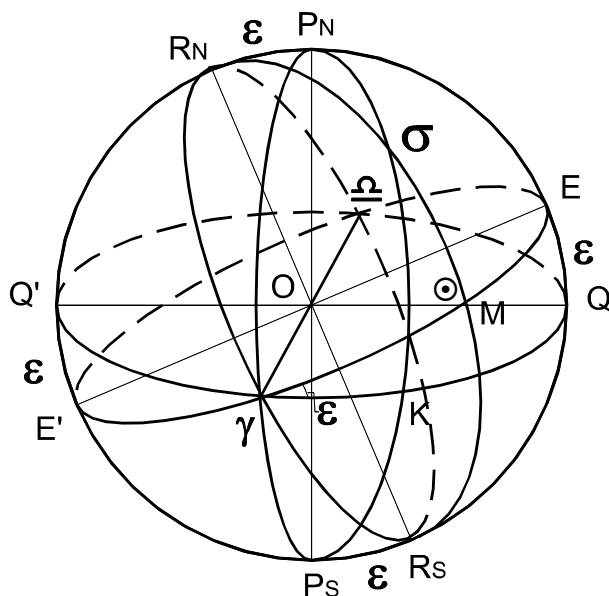


Рис. 1.4. Круги и точки небесной сферы, связанные с видимым годовым движением Солнца

1.1.2. Системы координат на небесной сфере

Для определения сферической системы координат на сфере выбирают два взаимно перпендикулярных больших круга, один из которых называют основным, а другой – начальным кругом системы.

В геодезической астрономии и астрометрии используются следующие системы сферических координат:

- 1) горизонтальная система координат;
- 2) первая и вторая экваториальные системы координат;
- 3) эклиптическая система координат.

Название систем обычно соответствует названию больших кругов, принятых за основной. Рассмотрим эти системы координат подробнее.

Горизонтальная система координат

Горизонтальная система координат изображена на рис. 1.5.

Основной круг в этой системе – астрономический горизонт SMN. Его геометрические полюса – Z (зенит) и Z' (надир).

Начальный круг системы – небесный меридиан ZSZ'N.

Начальная точка системы – точка юга S.

Определяющий круг системы – вертикал светила ZσZ'.

Первая координата горизонтальной системы – высота h , угол между плоскостью горизонта и направлением на светило $\angle MO\sigma$, или дуга вертикала от горизонта до светила $\cup M\sigma$. Высота отсчитывается от горизонта и может принимать значения

$$-90^\circ \leq h \leq 90^\circ.$$

В геодезической астрономии, как правило, вместо высоты h используется зенитное расстояние z – угол между отвесной линией

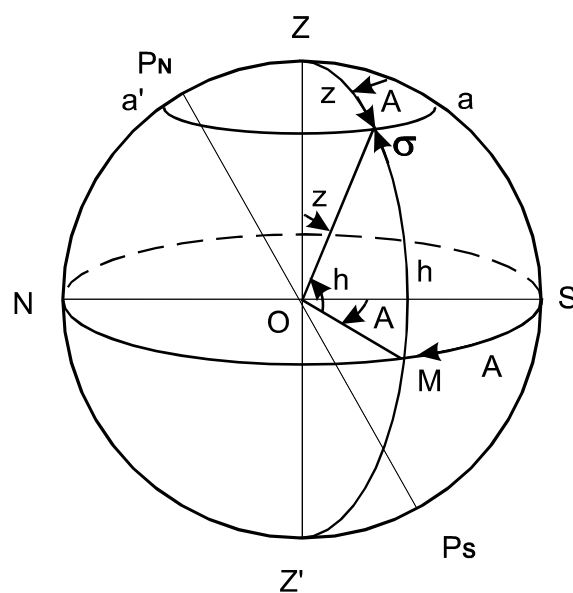


Рис. 1.5. Горизонтальная система координат

и направлением на светило $\angle ZO\sigma$, или дуга вертикала $\cup Z\sigma$. Зенитное расстояние есть дополнение до 90° высоты h :

$$z = 90^\circ - h.$$

Зенитное расстояние светила отсчитывается от зенита и может принимать значения

$$0^\circ \leq z \leq 180^\circ.$$

Вторая координата горизонтальной системы – *азимут* – двугранный угол $SZZ'\sigma$ между плоскостью небесного меридиана (начального круга) и плоскостью вертикала светила, обозначаемый буквой A :

$$A = \text{дв. угол } SZZ'\sigma = \angle SOM = \cup SM = \text{сф. угол } SZM.$$

В астрономии азимуты отсчитываются от точки юга S по ходу часовой стрелки в пределах

$$0^\circ \leq A \leq 360^\circ.$$

Вследствие суточного вращения небесной сферы горизонтальные координаты светила меняются в течение суток. Поэтому, фиксируя положение светил в этой системе координат, нужно отмечать момент времени, к которому относятся координаты h , z , A . Кроме того, горизонтальные координаты являются не только функциями времени, но и функциями положения места наблюдения на земной поверхности. Эта особенность горизонтальных координат обусловлена тем, что отвесные линии в разных точках земной поверхности имеют разное направление.

В горизонтальной системе координат ориентируются геодезические инструменты и выполняются измерения.

Первая экваториальная система координат

Основной круг первой экваториальной системы координат (рис. 1.6) есть *небесный экватор* $Q'KQ$. Геометрические полюса небесного экватора – северный и южный полюсы мира, P_N и P_S .

Начальный круг системы – *небесный меридиан* $P_NQ'P_SQ$.

Начальная точка системы – *верхняя точка экватора* Q .

Определяющий круг системы – *круг склонения* $P_N\sigma P_S$.

Первая координата первой экваториальной системы – *склонение* светила δ , угол между плоскостью небесного экватора и направле-

нием на светило $\angle KO\sigma$, или дуга круга склонения $\cup K\sigma$. Склонение отсчитывается от экватора к полюсам и может принимать значения

$$-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ.$$

Иногда используется величина $\Delta = 90^\circ - \delta$, где $0^\circ \leq \Delta \leq 180^\circ$, называемая *полярным расстоянием*.

Склонение не зависит ни от суточного вращения Земли, ни от географических координат пункта наблюдения ϕ , λ .

Вторая координата первой экваториальной системы – *часовой угол* светила t – двугранный угол между плоскостями небесного меридиана и круга склонения светила, или сферический угол при северном полюсе мира:

$$t = \text{дв. угол } QP_N P_S \sigma = \text{сф. угол } QP_N \sigma = \cup QK = \angle QOK.$$

Часовой угол отсчитывается от верхней точки экватора Q в направлении суточного вращения небесной сферы (по ходу часовой стрелки) от 0° до 360° , как правило, в часовой мере

$$0^h \leq t \leq 24^h.$$

Градусы и часы связаны соотношениями:

$$360^\circ = 24^h, 15^\circ = 1^h, 15' = 1^m, 15'' = 1^s.$$

Вследствие видимого суточного движения небесной сферы часовые углы светил постоянно изменяются. Часовой угол t отсчитывается от небесного меридиана, положение которого определяется направлением отвеса (ZZ') в данном пункте и, следовательно, зависит от географических координат пункта наблюдения на Земле.

Вторая экваториальная система координат

Основной круг второй экваториальной системы (рис. 1.7) – *небесный экватор* $Q\gamma Q'$.

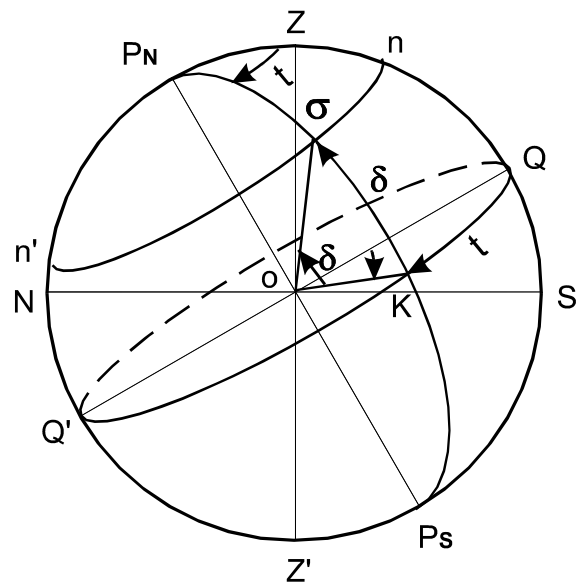


Рис. 1.6. Первая экваториальная система координат

Начальный круг системы – круг склонений точки весеннего равноденствия $P_N \gamma P_S$, называемый *колором равноденствий*.

Начальная точка системы – точка весеннего равноденствия γ .

*Определяющий круг системы –
круг склонения $P_N \sigma P_S$.*

Первая координата – *склонение*
святила δ .

Вторая координата – *прямое восхождение* α , двугранный угол между плоскостями колюра равноденствия и круга склонения светила, или сферический угол $\gamma_{\text{P}_\text{N}\sigma}$, или дуга экватора γ_{K} :

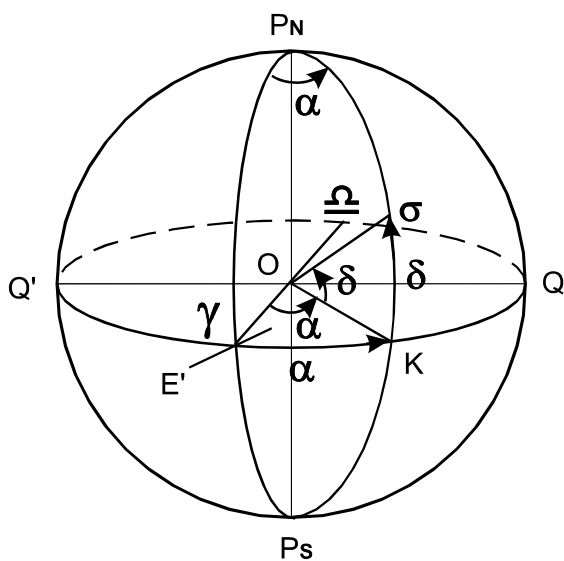


Рис. 1.7. Вторая экваториальная система координат

$$\alpha = \text{дв. угол } \gamma P_N P_S \sigma =$$

$$= \text{сф. угол } \gamma P_N \sigma = \cup \gamma K = \angle \gamma O K.$$

Прямое восхождение α выражается в часовой мере и отсчитывается от точки γ против хода часовой стрелки в направлении, противоположном видимому суточному движению светил:

$$0^h \leq \alpha \leq 24^h.$$

Во второй экваториальной системе координаты α и δ не зависят от суточного вращения светил. Так как эта система не связана ни с горизонтом, ни с меридианом, то α и δ не зависят от положения точки наблюдения на Земле, т. е. от географических координат ϕ и λ .

При выполнении астрономо-геодезических работ координаты светил α и δ должны быть известны. Они используются при обработке результатов наблюдений, а также для вычисления таблиц горизонтальных координат светил (A и h), называемых эфемеридами, с помощью которых можно отыскать астрономическим теодолитом светило в любой заданный момент времени. Экваториальные координаты светил α и δ определяются из специальных наблюдений на астрономических обсерваториях и публикуются в звездных каталогах.

Эклиптическая система координат

Основной круг эклиптической системы (рис. 1.8) – эклиптика $E\gamma E'$.

Начальный круг системы – круг широты точки весеннего равноденствия $R_N\gamma R_S$. Геометрические полюса небесного экватора – северный и южный полюсы эклиптики, R_N и R_S .

Начальная точка системы – точка весеннего равноденствия γ .

Определяющий круг системы – круг широты $P_N\sigma P_S$.

Первая координата – эклиптическая широта β – угол между плоскостью эклиптики и направлением на светило $\angle KO\sigma$, или дуга круга широты $\cup K\sigma$. Эклиптическая широта отсчитывается от экватора к полюсам и может принимать значения:

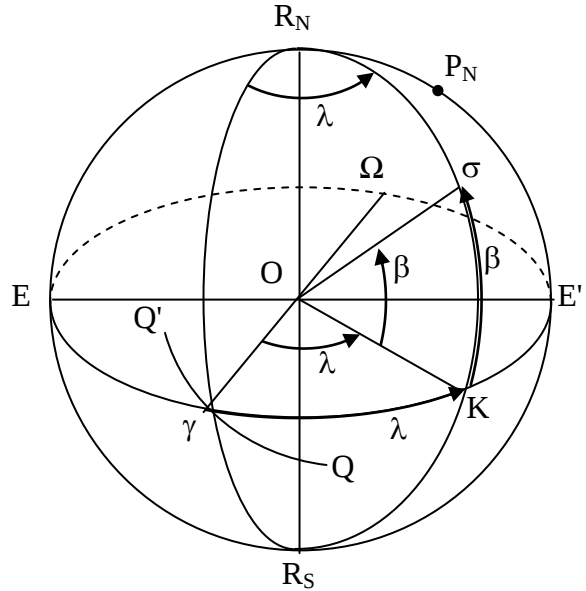


Рис. 1.8. Эклиптическая система координат

$$-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ.$$

Вторая координата – эклиптическая долгота λ , двугранный угол между плоскостями кругов широты точки γ и светила σ , или сферический угол $\gamma R_N \sigma$, или дуга эклиптики γK :

$$\lambda = \text{дв. угол } \gamma R_N R_S \sigma = \text{сф. угол } \gamma R_N \sigma = \cup \gamma K = \angle \gamma OK.$$

Эклиптическая долгота λ отсчитывается от точки γ в направлении видимого годичного движения Солнца,

$$0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ.$$

Эклиптические широты и долготы не изменяются от суточного вращения небесной сферы. Эклиптическая система координат широко используется в теоретической астрономии и небесной механике в теории движения тел солнечной системы. Так как Луна и планеты движутся вблизи плоскости эклиптики, то в эклиптической системе координат заметно упрощается учет возмущений их орбит.

В звездной астрономии используют галактическую систему координат, где основной круг – галактический экватор – большой круг, наиболее совпадающий с серединой Млечного пути. Координаты звезд в этой системе задаются галактической широтой и галактической долготой.

1.1.3. Географические координаты точек на поверхности Земли

Если спроектировать точку M земной поверхности на небесную сферу по направлению отвесной линии ZZ' (рис. 1.9), то сферические

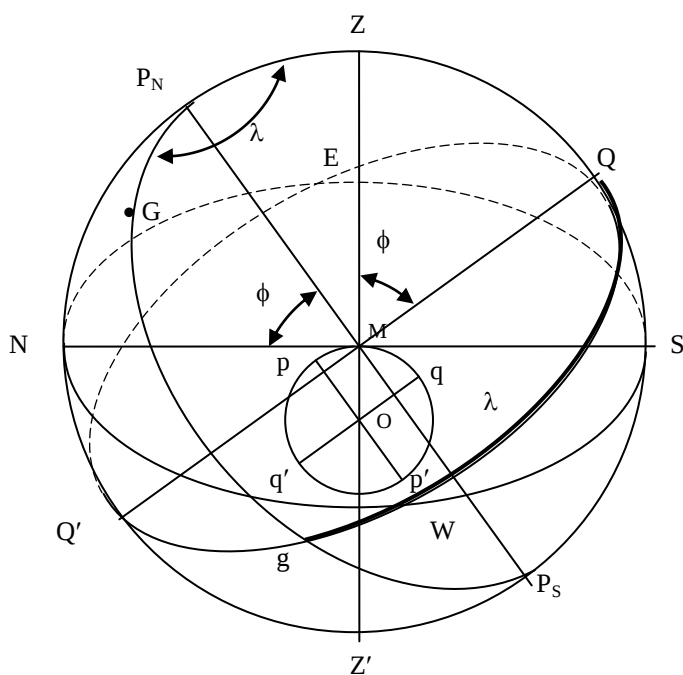


Рис. 1.9. Географическая система координат

координаты зенита Z этой точки называются *географическими координатами*: *географической широтой* ϕ и *географической долготой* λ .

Широта и долгота точек на поверхности Земли задаются относительно *земного экватора* и *начального меридиана*.

Земным экватором называется плоскость, перпендикулярная оси вращения Земли. Ось вращения Земли непрерывно совершает колебания (см. подразд. 1.3.7 «Движение земных полюсов»), поэтому

различают мгновенную ось вращения (мгновенный экватор) и среднюю ось вращения (средний экватор).

Плоскость *астрономического меридиана*, проходящего через произвольную точку земной поверхности, содержит отвесную линию в данной точке и параллельна оси вращения Земли.

Начальный меридиан проходит через центральную точку фундаментального астрометрического инструмента Гринвичской обсерватории (согласно международному соглашению 1883 г.).

Начальная точка, от которой ведется счет долгот, есть точка пересечения начального меридиана с плоскостью экватора.

В геодезической астрономии определяются астрономические широта и долгота, ϕ и λ , а также астрономический азимут направления A .

Астрономическая широта ϕ есть угол между плоскостью экватора и отвесной линией в данной точке. Широта отсчитывается от экватора к северному полюсу от 0° до $+90^\circ$ и к южному полюсу от 0° до -90° .

Астрономическая долгота λ – двугранный угол между плоскостями начального и текущего астрономических меридианов. Долгота отсчитывается от гринвичского меридиана к востоку (λ_E – восточная долгота) и к западу (λ_W – западная долгота) от 0° до 180° или, в часовой мере, от 0 до 12 часов (12^h). Иногда долготу считают в одну сторону от 0 до 360° или, в часовой мере, от 0 до 24 часов.

Астрономический азимут направления A – двугранный угол между плоскостью астрономического меридиана и плоскостью, проходящей через отвесную линию и точку, на которую измеряется направление.

Если *астрономические* координаты связаны с отвесной линией и осью вращения Земли, то *геодезические* – с поверхностью относимости (эллипсоидом) и с нормалью к этой поверхности. Подробно геодезические координаты рассматриваются в рамках дисциплины «Высшая геодезия».

1.1.4. Связь между различными системами координат

Связь между координатами первой и второй экваториальных систем. Формула звездного времени

В первой и второй экваториальных системах склонение δ измеряется одним и тем же центральным углом и одной и той же дугой большого круга, значит, в этих системах δ одно и то же. Рассмотрим связь между t и α . Для этого определим часовой угол точки γ – ее положение в первой экваториальной системе координат:

$$t_\gamma = \angle QO\gamma = \cup Q\gamma.$$

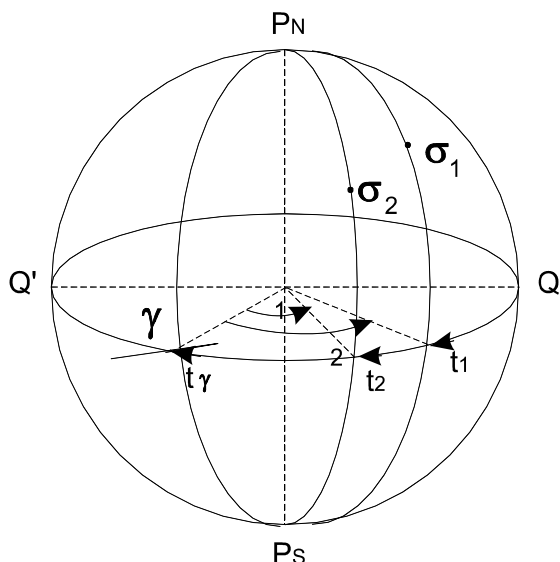


Рис. 1.10. Связь между первой и второй экваториальными системами координат

По рис. 1.10 видно, что для любого светила справедливо равенство

$$t_\gamma = t + \alpha.$$

Часовой угол точки весеннего равноденствия является мерой звездного времени s :

$$s = t_\gamma = t + \alpha.$$

Последняя формула называется *формулой звездного времени*: сумма часового угла и прямого восхождения светила равна звездному времени.

Связь между небесными и географическими координатами

Теорема 1. *Географическая широта места наблюдения численно равна склонению зенита в точке наблюдения и равна высоте полюса мира над горизонтом:*

$$\phi = \delta_z = h_p.$$

Доказательство следует из рис. 1.11. Географическая широта ϕ есть угол между плоскостью земного экватора и отвесной линией

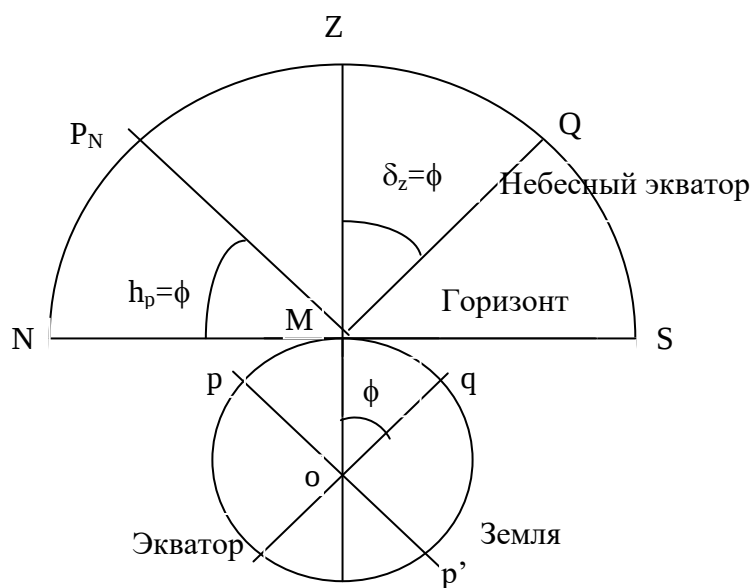


Рис. 1.11. К теореме о высоте полюса мира над горизонтом

в пункте наблюдения, $\angle Moq$. Склонение зенита δ_z есть угол между плоскостью небесного экватора и отвесной линией, $\angle ZMQ$. Склонение зенита и широта равны как соответствующие углы при параллельных прямых. Высота полюса Мира, $h_p = \angle P_NMN$, и склонение зенита δ_z равны между собой как углы между взаимно перпендикулярными сторонами. Итак, теорема

1 устанавливает связь координат географической, горизонтальной и экваториальной систем. Она положена в основу определения географических широт пунктов наблюдения.

Теорема 2. *Разность часовых углов одного и того же светила, измеренная в один и тот же физический момент времени в двух различных точках земной поверхности, численно равна разности географических долгот этих точек на земной поверхности:*

$$t_2 - t_1 = \lambda_2 - \lambda_1.$$

Доказательство следует из рис. 1.9, на котором показаны Земля и описанная вокруг нее небесная сфера. Разность долгот двух пунктов есть двугранный угол между меридианами этих пунктов; разность часовых углов светила σ есть двугранный угол между двумя небесными меридианами этих пунктов. В силу параллельности небесных и земных меридианов, теорема доказана.

Вторая теорема сферической астрономии положена в основу определения долгот пунктов.

Параллактический треугольник

Параллактический треугольник – сферический треугольник с вершинами P_n , Z , σ (рис. 1.12). Он образован пересечением трех больших кругов: небесного меридиана, круга склонения и вертикала светила.

Угол q между вертикалом светила и кругом склонения называется параллактическим.

Элементы параллактического треугольника относятся к трем системам координат: горизонтальной (A , z), первой экваториальной (δ , t) и географической (ϕ). Связь между этими системами координат может быть установлена через решение параллактического треугольника.

Задача 1.

Дано: в момент звездного времени s в пункте с известной широтой ϕ наблюдается светило σ с известными экваториальными координатами α и δ .

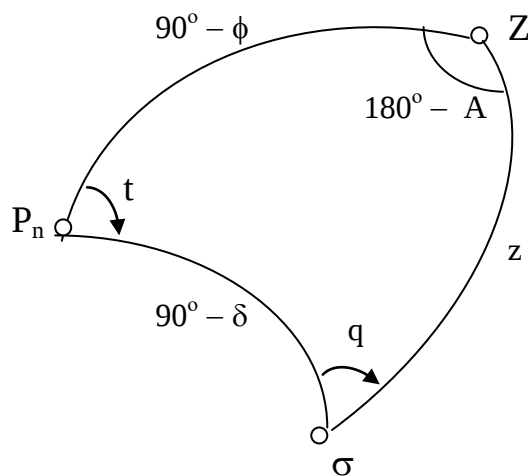


Рис. 1.12. Параллактический треугольник

Требуется: определить горизонтальные координаты – азимут A и зенитное расстояние z .

Решение задачи выполняется по формулам сферической тригонометрии. Формулы косинусов, синусов и пяти элементов применительно к параллактическому треугольнику записываются следующим образом:

$$\cos z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t, \quad (1.1)$$

$$\sin z \sin (180^\circ - A) = \sin(90^\circ - \delta) \sin t, \quad (1.2)$$

$$\sin z \cos(180^\circ - A) = \sin(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ - \delta) - \cos(90^\circ - \phi) \sin(90^\circ - \delta) \cos t, \quad (1.3)$$

где $t = s - \alpha$.

Разделив формулу (1.3) на (1.2), получим:

$$\operatorname{ctg} A = \sin \phi \operatorname{ctg} t - \operatorname{tg} \delta \cos \phi \operatorname{cosec} t. \quad (1.4)$$

Формулы (1.1) и (1.4) являются уравнениями связи в зенитальных и азимутальных способах астрономических определений соответственно.

1.1.5. Видимое суточное вращение небесной сферы

Виды суточного движения звезд

Видимое суточное вращение небесной сферы происходит с востока на запад и обусловлено вращением Земли вокруг оси. При этом светила перемещаются по суточным параллелям. Вид суточного движения относительно горизонта данного пункта с широтой ϕ зависит от склонения светила δ . По виду суточного движения светила бывают:

1) *незаходящие*

$$\delta > \delta_N, \text{ или } \delta > 90^\circ - \phi;$$

2) *имеющие восход и заход*

$$\delta_S \leq \delta \leq \delta_N, \text{ или } -(90^\circ - \phi) \leq \delta \leq (90^\circ - \phi);$$

3) *невидимые*

$$\delta < \delta_S, \text{ или } \delta < -(90^\circ - \phi);$$

4) *элонгирующие* (не пересекающие первый вертикал над горизонтом)

$$\delta > \delta_Z, \text{ или } \delta > \phi;$$

5) *пересекающие первый вертикал*

$$-\delta_Z \leq \delta \leq \delta_Z, \text{ или } -\phi \leq \delta \leq \phi.$$

На рис. 1.13. показаны области, где находятся суточные параллели звезд, удовлетворяющие по виду суточного движения указанным выше условиям.

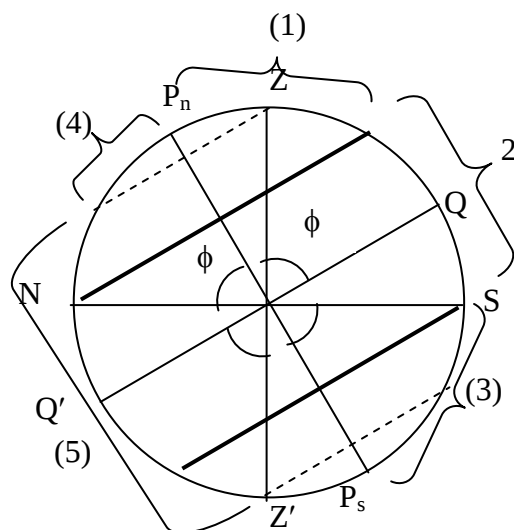


Рис. 1.13. Видимое суточное вращение небесной сферы

Прохождение светил через меридиан. Кульминации

Момент прохождения светила через меридиан называют *кульминацией*. В момент *верхней кульминации* светило занимает самое высокое положение относительно горизонта, в момент *нижней кульминации* светило находится в самом нижнем положении относительно горизонта. Нарисуем чертеж небесной сферы в проекции на меридиан (рис. 1.14). Для всех светил в верхней кульминации часовой угол $t = 0^h$, а в нижней $t = 12^h$. Поэтому в верхней кульминации $s = \alpha$, а в нижней $s = \alpha + 12^h$.

Горизонтальные координаты A, z светил в кульминациях вычисляются по следующим формулам.

Верхняя кульминация (ВК):

а) светило кульминирует к югу от зенита, $(-90^\circ < \delta < \phi)$, суточные параллели 2 и 3,

$$A = 0^\circ, z = \phi - \delta;$$

б) светило кульминирует к северу от зенита, $(90^\circ > \delta > \phi)$, суточная параллель 1,

$$A = 180^\circ, z = \delta - \phi.$$

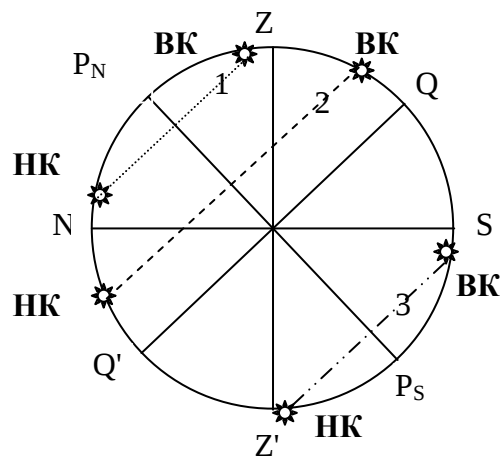


Рис. 1.14. Кульминации

Нижняя кульминация (НК):

а) светило кульминирует к северу от надира, ($90^\circ > \delta > -\phi$), суточные параллели 1 и 2,

$$A = 180^\circ, z = 180^\circ - (\phi + \delta);$$

б) светило кульминирует к югу от надира, ($-90^\circ < \delta < -\phi$), суточная параллель 3,

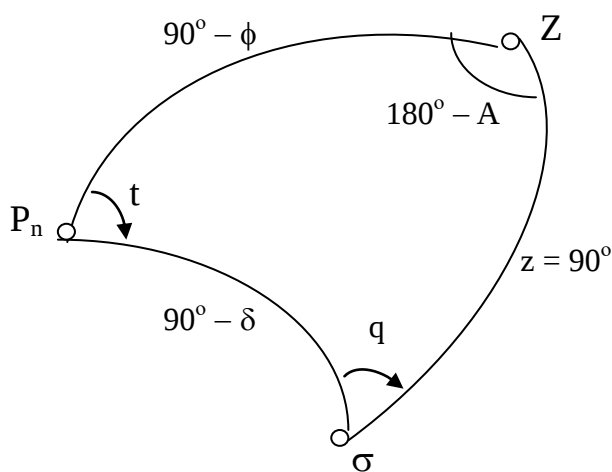
$$A = 0^\circ, z = 180^\circ + (\phi + \delta).$$

Формулы связи между горизонтальными и экваториальными координатами светила в кульминациях используются при составлении рабочих эфемерид для наблюдений светил в меридиане. Кроме того, по измеренному зенитному расстоянию z и известному склонению δ можно вычислить широту пункта ϕ или с известной широтой ϕ определить склонение δ .

Прохождение светил через горизонт

В момент восхода или захода светила с координатами (α, δ) его зенитное расстояние $z = 90^\circ$, и поэтому для пункта с широтой ϕ можно определить часовой угол t , звездное время s и азимут A из решения параллактического треугольника $P_N Z \sigma$, показанного на рис. 1.15. Теорема косинусов для сторон z и $(90^\circ - \delta)$ записывается, как:

$$\begin{aligned} \cos z &= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t, \\ \sin \delta &= \cos z \sin \phi - \sin z \cos \phi \cos A. \end{aligned}$$



Так как $z = 90^\circ$, то $\cos z = 0$, $\sin z = 1$, поэтому

$$\begin{aligned} \cos t &= -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \phi, \quad \cos A = \\ &= -\sin \delta / \cos \phi. \end{aligned}$$

Для северного полушария Земли, т. е. при $\phi > 0$, для светила с положительным склонением ($\delta > 0$) $\cos t < 0$ и $\cos A < 0$, вследствие чего:

Рис. 1.15. Прохождение светил через горизонт

для захода $t_W = 12^h - t_1$, $A_W = 180^\circ - A_1$;

для восхода $t_E = 12^h + t_1$, $A_E = 180^\circ + A_1$,

где t_1 и A_1 – острые положительные углы, т. е. $0^h \leq t_1 \leq 6^h$, $0^\circ \leq A_1 \leq 90^\circ$.

При $\delta < 0$ $\cos t > 0$ и $\cos A > 0$, поэтому

для захода $t_W = t_1$, $A_W = A_1$;

для восхода $t_E = 24^h - t_1$, $A_E = 360^\circ - A_1$.

В каждом случае моменты восхода и захода по звездному времени будут

$$s_W = \alpha + t_W, s_E = \alpha + t_E.$$

Полученные формулы используются для расчета обстоятельств восхода и захода Солнца, планет, Луны и звезд.

Прохождение светил через первый вертикал

Положению светила в первом вертикале соответствует прямоугольный параллактический треугольник (рис. 1.16), который решается с использованием правила Модюи – Непера:

$$\cos z = \sin \delta / \sin \phi, \cos t = \operatorname{tg} \delta / \operatorname{tg} \phi.$$

Для северного полушария Земли ($\phi > 0$), для светила с положительным склонением ($\delta > 0$) $\cos t > 0$, следовательно, часовые углы светила в моменты прохождения западной и восточной частей вертикала будут:

$$t_W = t_1, t_E = 24^h - t_1.$$

При отрицательном склонении ($\delta < 0$) $\cos t < 0$, отсюда

$$t_W = 12^h - t_1, t_E = 12^h + t_1.$$

В этом случае и $\cos z < 0$, т. е. $z > 90^\circ$, следовательно, светило проходит первый вертикал под горизонтом.

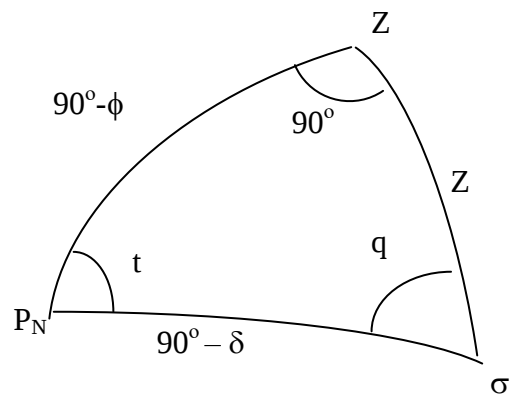


Рис. 1.16. Прохождение светил через первый вертикал

Согласно формуле звездного времени, моменты прохождения светилом первого вертикала будут:

$$s_W = \alpha + t_W, s_E = \alpha + t_E.$$

Азимуты светила в первом вертикале есть $A_W = 90^\circ$, $A_E = 270^\circ$, если отсчет ведется по часовой стрелке от точки юга.

В геодезической астрономии есть ряд способов астрономических определений географических координат, основывающихся на наблюдении светил в первом вертикале. Формулы связи между горизонтальными и экваториальными координатами светила в первом вертикале используются при составлении рабочих эфемерид и для обработки наблюдений.

Вычисление горизонтальных координат и звездного времени для светил в элонгации

В моменты элонгации вертикал светила имеет общую с суточной параллелью касательную прямую, т. е. видимое суточное движение светила происходит вдоль его вертикала. Поскольку круг склонений всегда пересекает суточную параллель под прямым углом, то параллактический угол $P_N\sigma Z$ становится прямым. Решая прямоугольный параллактический треугольник по правилу Модюи – Непера, можно найти выражения для t , z , A :

$$\cos t = \operatorname{tg} \phi / \operatorname{tg} \delta, \cos z = \sin \phi / \sin \delta, \sin A = -\cos \delta / \cos \phi.$$

Для западной элонгации:

$$A_W = 180^\circ - A_1, t_W = t_1, s_W = \alpha + t_W.$$

Для восточной элонгации:

$$A_E = 180^\circ + A_1, t_E = -t_1, s_E = \alpha + t_E.$$

Наблюдение светил в элонгациях выполняют при исследованиях астрономических теодолитов в полевых условиях.

1.1.6. Составление эфемерид светил. Эфемерида Полярной звезды

Эфемеридой светила называется таблица его координат, в которой аргументом служит время. В геодезической астрономии часто со-

ставляют эфемериды в горизонтальной системе координат (z, A) с точностью $\pm 1'$. Такие эфемериды называют рабочими. Рабочие эфемериды звезд с координатами (z, A) составляются на период наблюдений для того, чтобы легко и быстро находить звезду на небесной сфере с помощью астрономического прибора.

При полевых астрономических наблюдениях в северном полушарии для ориентирования инструмента часто используются наблюдения Полярной звезды.

Составление эфемерид Полярной выполняется в следующем порядке.

В пункте с широтой ϕ для наблюдения звезды с координатами α, δ на промежуток времени от s_1 до s_k требуется составить таблицу значений A и z .

Полярное расстояние Полярной Δ не превышает 1° . Поэтому параллактический треугольник представляет собой узкий сферический треугольник (рис. 1.17). Опустим из светила сферический перпендикуляр σK на меридиан. Получим два прямоугольных треугольника: $P_N K \sigma$ (элементарный) и $K \sigma Z$ (узкий). Решая треугольник $P_N K \sigma$ как плоский, можно записать:

$$P_N K = f = \Delta \cos t, \quad \sigma K = x = \Delta \sin t,$$

где $t = s - \alpha$.

Рассмотрим решение прямоугольного треугольника $K \sigma Z$. В нем известны две стороны: $KZ = 90^\circ - (\phi + f)$ и $K\sigma = x$. По правилу Модюи – Непера

$$\operatorname{tg} z = \operatorname{tg}(90^\circ - \phi - f) / \cos A_N.$$

Для вычисления z с ошибкой $1'$ можно принять $1/\cos A \approx 1$, тогда

$$z = 90^\circ - (\phi + f), \text{ или } h = \phi + f.$$

Из треугольника $K \sigma Z$:

$$\sin x = \sin A_N \sin z,$$

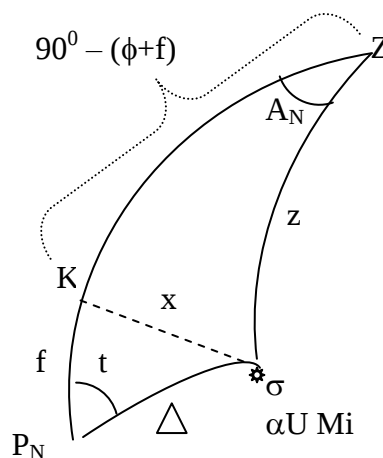


Рис. 1.17. Параллактический треугольник для Полярной

или в виду малости x и A_N при вычислении азимута с точностью до 1' можно записать

$$x = A_N \sin z = A_N \cos(\phi + f).$$

Отсюда

$$A_N = x / \cos(\phi + f) = \Delta \sin(s - \alpha) / \cos(\phi + f).$$

Азимут A_N отсчитывается от точки севера N. Азимуты Полярной, отсчитанные от точки юга S, определяются по формулам:

$$A_W = 180^\circ - A_N;$$

$$A_E = 180^\circ + A_N.$$

Контрольные вопросы

1. Как определяются направления отвесной линии и оси мира?
2. Что такое эклиптика, точка гамма?
3. Назвать параметры (основной, начальный и определяющий круги, начальную точку и полюса) горизонтальной, экваториальных и эклиптической систем координат.
4. В чем принципиальное отличие астрономических и геодезических координат точек на Земле?
5. В каких случаях используются горизонтальная, экваториальные и эклиптическая системы координат?
6. Сформулируйте теоремы, положенные в основу определения географических широт и долгот пунктов.
7. Чему равны азимут, высота, часовой угол и склонение основных точек небесной сферы в пункте с широтой ϕ ?
8. В каком случае формулы решения параллактического треугольника не применимы?
9. Изобразите параллактические треугольники для светил, пересекающих горизонт, первый вертикал в западной и восточной половинах небесной сферы.
10. На каком зенитном расстоянии будет Сириус (склонение равно -16°) в верхней кульминации в Новосибирске (широта равна 55°)?
11. На сколько отличаются высоты светил в верхней и нижней кульминации для наблюдателя, находящегося на полюсе Земли?
12. Чему равно склонение звезды, проходящей в Новосибирске через зенит? (Широта Новосибирска – 55°).
13. Что такое эфемериды звезд и для чего они нужны?

1.2. Измерение времени в астрономии

1.2.1. Общие положения

Одной из задач геодезической астрономии, астрометрии и космической геодезии является определение координат небесных тел в заданный момент времени. Построением астрономических шкал времени занимаются национальные службы времени и Международное бюро времени.

В основе всех известных способов построения непрерывных шкал времени лежат *периодические процессы*, например:

- вращение Земли вокруг своей оси;
- обращение Земли вокруг Солнца по орбите;
- обращение Луны вокруг Земли по орбите;
- качание маятника под действием силы тяжести;
- упругие колебания кристалла кварца под действием переменного тока;
- электромагнитные колебания молекул и атомов;
- радиоактивный распад ядер атомов и другие процессы.

Систему времени можно задать следующими параметрами:

- 1) *механизм* – явление, обеспечивающее периодически повторяющийся процесс (например, суточное вращение Земли);
- 2) *масштаб* – промежуток времени, за который повторяется процесс;
- 3) *начальная точка, нульпункт* – момент начала повторения процесса;
- 4) *способ отсчета* времени.

В геодезической астрономии, астрометрии, небесной механике используются системы *звездного* и *солнечного* времени, основанные на вращении Земли вокруг оси. Это периодическое движение является в высшей степени равномерным, не ограниченным во времени и непрерывным на протяжении всего существования человечества.

Кроме того, в астрометрии и небесной механике используются:

- системы *эфемеридного* и *динамического времени* как идеальное построение равномерной шкалы времени;
- система *атомного времени* – практическая реализация идеально равномерной шкалы времени.

1.2.2. Звездное время

Звездное время обозначается s . Параметрами системы звездного времени являются:

- 1) механизм – вращение Земли вокруг своей оси;
- 2) масштаб – *звездные сутки*, равные промежутку времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия в пункте наблюдения;
- 3) начальная точка на небесной сфере – точка весеннего равноденствия γ , нульпункт (начало звездных суток) – момент верхней кульминации точки γ ;
- 4) способ отсчета. Мера измерения звездного времени – часовой угол точки весеннего равноденствия, t_γ . Измерить его невозможно, но для любой звезды справедливо выражение:

$$s = t_\gamma = \alpha + t,$$

следовательно, зная прямое восхождение звезды α и вычисляя ее часовой угол t , можно определить звездное время s .

Различают *истинную, среднюю и квазиистинную* точки гамма (разделение связано астрономическим фактором *нутацией*, см. подразд. 1.3.9), относительно которых измеряется *истинное, среднее и квазиистинное звездное время*.

Система звездного времени применяется при определении географических координат пунктов на поверхности Земли и азимутов направления на земные предметы, при изучении неравномерностей суточного вращения Земли, при установлении нульпунктов шкал других систем измерения времени. Эта система, хоть и широко применяется в астрономии, в повседневной жизни неудобна. Смена дня и ночи, обусловленная видимым суточным движением Солнца, создает вполне определенный цикл в деятельности человека на Земле. Поэтому издавна счисление времени ведется по суточному движению Солнца.

1.2.3. Истинное и среднее солнечное время. Уравнение времени

Система истинного солнечного времени (или *истинное солнечное время* – $m_\odot$) применяется при астрономических или геодезических наблюдениях Солнца. Параметры системы:

- 1) механизм – вращение Земли вокруг своей оси;
- 2) масштаб – *истинные солнечные сутки* – промежуток времени между двумя последовательными нижними кульминациями центра истинного Солнца;
- 3) начальная точка – центр диска истинного Солнца – $\odot$, нуль-пункт – *истинная полночь*, или момент нижней кульминации центра диска истинного Солнца;
- 4) способ отсчета. Мера измерения истинного солнечного времени – геоцентрический часовой угол истинного Солнца $t_{\odot}$ плюс 12 часов:

$$m_{\odot} = t_{\odot} + 12^h.$$

Единица истинного солнечного времени – секунда, равная $1 / 86\,400$ истинных солнечных суток, не удовлетворяет основному требованию, предъявляемому к единице измерения времени – она непостоянна.

Причинами непостоянства шкалы истинного солнечного времени являются:

- 1) неравномерное движение Солнца по эклиптике вследствие эллиптичности орбиты Земли;
- 2) неравномерное возрастание прямого восхождения Солнца в течение года, так как Солнце движется по эклиптике, наклоненной к небесному экватору под углом примерно $23,5^{\circ}$.

Вследствие этих причин применение системы истинного солнечного времени на практике неудобно. Переход к равномерной шкале солнечного времени происходит в два этапа [3].

Этап 1 – переход к фиктивному *среднему эклиптическому Солнцу*. На данном этапе исключается неравномерность движения Солнца по эклиптике. Неравномерное движение по эллиптической орбите заменяется равномерным движением по круговой орбите. Истинное Солнце и среднее эклиптическое Солнце совпадают, когда Земля проходит через перигелий и афелий своей орбиты.

Этап 2 – переход к *среднему экваториальному Солнцу*, движущемуся равномерно вдоль небесного экватора. Здесь исключается неравномерность возрастания прямого восхождения Солнца, обусловленная наклоном эклиптики. Истинное Солнце и среднее экваториальное Солнце одновременно проходят точки весеннего и осеннего равноденствия.

В результате перечисленных действий вводится новая система измерения времени – *среднее солнечное время*.

Среднее солнечное время обозначается m . Параметрами системы среднего солнечного времени являются:

1) механизм – вращение Земли вокруг оси;
 2) масштаб – *средние сутки* – промежуток времени между двумя последовательными нижними кульминациями среднего экваториального Солнца $\odot_{\text{ЭКВ}}$;

3) начальная точка – среднее экваториальное Солнце $\odot_{\text{ЭКВ}}$, нуль-пункт – *средняя полночь*, или момент нижней кульминации среднего экваториального Солнца;

4) способ отсчета. Мерой измерения среднего времени является геоцентрический часовой угол среднего экваториального Солнца $t_{\odot_{\text{ЭКВ}}}$ плюс 12 часов:

$$m = t_{\odot_{\text{ЭКВ}}} + 12^{\text{h}}.$$

Определить среднее солнечное время непосредственно из наблюдений нельзя, так как среднее экваториальное Солнце – фиктивная точка на небесной сфере. Среднее солнечное время вычисляют по истинному солнечному времени, определенному из наблюдений истинного Солнца. Разность истинного солнечного времени $m_{\odot}$ и среднего солнечного времени m называется *уравнением времени* и обозначается η :

$$\eta = m_{\odot} - m = t_{\odot} - t_{\odot_{\text{ср.ЭКВ.}}} \quad (1.5)$$

Уравнение времени выражается двумя синусоидами с годовым и полугодовым периодами:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 \approx -7,7^{\text{m}} \sin (l + 79^{\circ}) + 9,5^{\text{m}} \sin 2l,$$

где l – эклиптическая долгота среднего эклиптического Солнца.

График η есть кривая с двумя максимумами и двумя минимумами, которая в декартовой прямоугольной системе координат имеет вид, показанный на рис. 1.18.

Значения уравнения времени лежат в пределах от $+14^{\text{m}}$ до -16^{m} .

В Астрономическом Ежегоднике на каждую дату приводится величина E :

$$E = \eta + 12^{\text{h}}.$$

С данной величиной связь между средним солнечным временем и часовым углом истинного Солнца определяется выражением:

$$m = t_{\odot} - E.$$

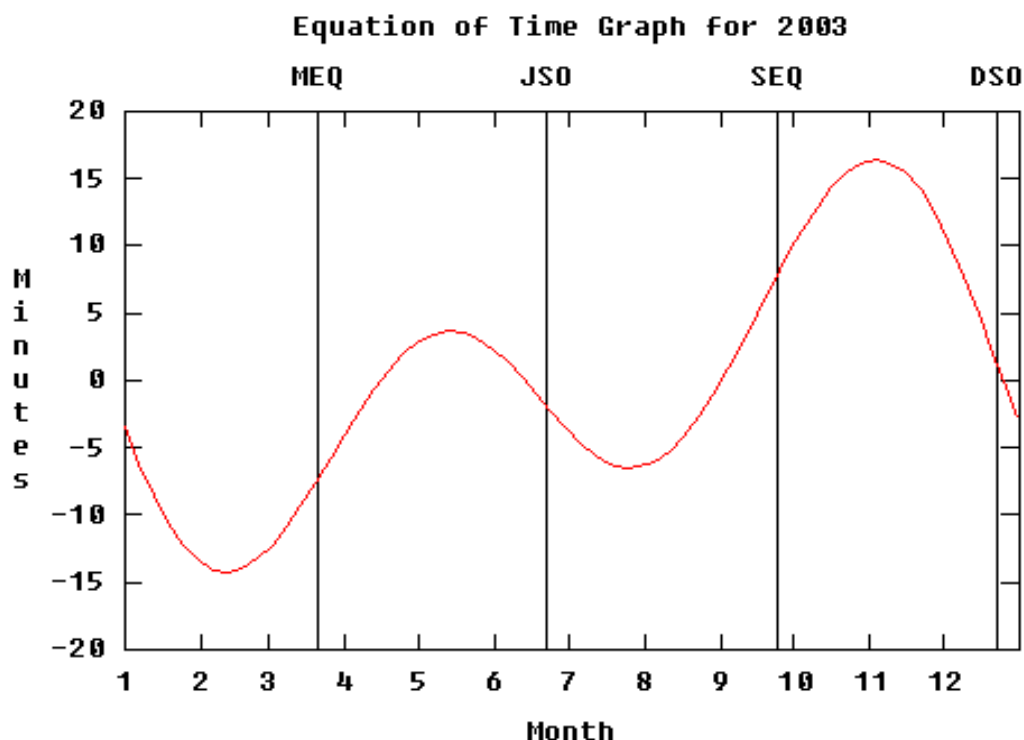


Рис. 1.18. График уравнения времени

1.2.4. Юлианские дни

При точном определении численного значения промежутка времени, заключенного между двумя отдаленными датами, удобно пользоваться непрерывным счетом суток, которые в астрономии называют *юлианскими днями*.

Начало счета юлианских дней – средний гринвичский полдень 1 января 4713 г. до н. э. От начала этого периода ведется счет и нумерация средних солнечных суток так, что каждой календарной дате соответствует определенный юлианский день, обозначаемый кратко JD. Так, эпохе 1900, январь 0,12^hUT соответствует юлианская дата JD2415020,0, а эпохе 2000, январь 1, 12^hUT – JD2451545,0.

Один юлианский год содержит 365,25 средних солнечных суток (средняя продолжительность года в юлианском летоисчислении), юлианское столетие – 36 525 средних солнечных суток.

Юлианские дни входят в так называемый *юлианский период*, равный 7 980 лет. Период был предложен в XVI в. лейденским профессором Иосифом Скалигером. Он его получил как произведение трех периодов: $28 \times 19 \times 15 = 7\,980$ и назвал именем своего отца Юлия. Период в 28 лет называется циклом Солнца, по завершению которого повторяется распределение дней недели по дням года, период 19 лет

называется циклом Луны, по истечении которого повторяется фаза Луны, период 15 лет из римского права.

1.2.5. Местное время на разных меридианах. Всемирное, поясное и декретное время

Время на меридиане данного пункта с долготой λ называется *местным*.

Вторая теорема сферической астрономии о разности часовых углов светила для вспомогательных точек γ , $\odot$, $\odot_{\text{ЭКВ}}$ записывается как

$$\begin{aligned} t_{\gamma A} - t_{\gamma B} &= s_A - s_B = \lambda_A - \lambda_B; \\ t_{\odot A} - t_{\odot B} &= m_{\odot A} - m_{\odot B} = \lambda_A - \lambda_B; \\ t_{\odot_{\text{ЭКВ}} A} - t_{\odot_{\text{ЭКВ}} B} &= m_A - m_B = \lambda_A - \lambda_B. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Отсюда следует, что *разность местных времен в двух пунктах в один физический момент равна разности долгот этих пунктов*.

В географической системе координат *гринвичский меридиан принят за начальный*, $\lambda = 0$. Местное время гринвичского меридиана обозначается большими буквами: S , $M_{\odot}$, M . Среднее солнечное время на меридиане Гринвича M называется *всемирным временем* и обозначается UT (Universal Time).

Из приведенных формул (1.6) следует:

$$\begin{aligned} s - S &= \pm \lambda \mid^E_W; \\ m_{\odot} - M_{\odot} &= \pm \lambda \mid^E_W; \\ m - UT &= \pm \lambda \mid^E_W. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Соотношения (1.7) лежат в основе метода определения долгот полевых пунктов: местное время астроном определяет по часовому углу светила, гринвичское – по радиосигналам точного времени.

В повседневной жизни использование местного времени неудобно, поскольку на разных меридианах – разное местное время, даже в пределах одного города. Поэтому введена система измерения времени по часовым поясам – *поясное время* T_n , где n – номер пояса. На поверхности Земли выбраны 24 меридиана через 15° , с долготами λ_n , равными соответственно $0^h, 1^h, \dots, 23^h$. Эти меридианы – оси 24 часовых поясов с номерами от 0 до 23. В границах всего часового пояса

показания часов ставят по времени осевого меридиана, равного среднему солнечному времени m на этом меридиане:

$$T_n = m(\lambda_n).$$

Разность поясных времен в двух пунктах равна разности долгот осевых меридианов или разности номеров их часовых поясов:

$$T_{n1} - T_{n2} = \lambda_{n1} - \lambda_{n2} = n_1 - n_2.$$

Гринвичский меридиан является осевым в нулевом часовом поясе ($n = 0$), и всемирное время UT есть поясное время нулевого часового пояса:

$$UT = T_0, T_n = T_0 + n = UT + n.$$

С 16 июля 1930 г. декретом Правительства СССР стрелки часов в нашей стране были переведены относительно поясного времени на 1 час вперед. Такое время получило название *декретного*, обозначаемого D_n . С 1980 г. в нашей стране введено *летнее время* (прибавлением 1 часа), которое действует с последнего воскресенья марта по последнее воскресенье октября. Таким образом, декретное время D_n определяется по формуле:

$$D_n = T_n + k,$$

где $k = 2^h$ – для летнего времени; $k = 1^h$ – для зимнего.

Декретное время можно вычислить по следующей формуле:

$$D_n = UT + (n + k) = m + [(n + k) - \lambda_E].$$

Декретное, поясное и всемирное время – варианты системы среднего солнечного времени, образованные лишь смещением нульпунктов на постоянную величину.

1.2.6. Связь между средним солнечным и звездным временем

Системы среднего солнечного времени и звездного времени основаны на суточном вращении Земли, но имеют различный масштаб – различную продолжительность звездных и средних солнечных суток. Различие масштабов обусловлено тем, что Земля, кроме суточного движения вокруг оси, совершает годичное движение вокруг Солнца.

Пусть начала звездных и солнечных суток совпадают (рис. 1.19). Земля участвует в двух движениях (суточном и годичном), поэтому через одни сутки Земля пройдет по орбите расстояние, равное дуге примерно 1° (или 4 мин), и звездные сутки закончатся раньше солнечных на величину, примерно равную 4 мин.

Точное значение величины, на которую отличаются звездные и средние солнечные сутки:

$$24^h / 365,2422 \text{ сут} = 3^m 56,555^s.$$

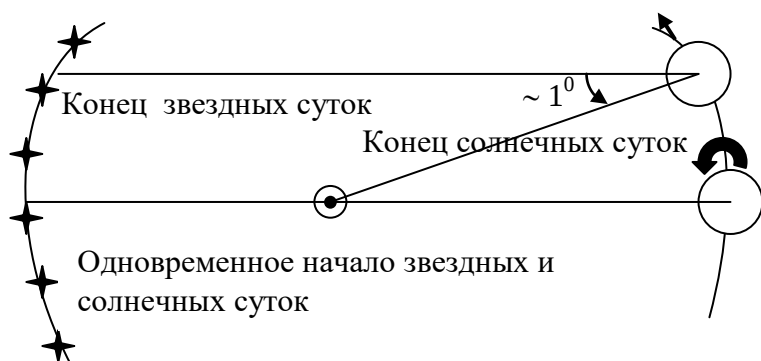


Рис. 1.19. Неравенство звездных и солнечных суток

Тропический год – промежуток времени между двумя последовательными прохождением истинного Солнца через точку весеннего равноденствия, содержит 365,2422 средних солнечных суток и 366,2422 звездных суток. Отсюда:

$$1 \text{ ср. солн. сутки} = (366,2422 / 365,2422) \text{ зв. суток} = (1 + \mu) \text{ зв. суток},$$

где $\mu = 1/365,2422 = 0,0027379093$ – масштабный коэффициент перехода от средних солнечных единиц к звездным.

Следовательно, m средних единиц времени содержат $(1 + \mu)m$ единиц звездного времени:

$$s = (1 + \mu)m. \quad (1.8)$$

Для обратного перехода от звездного к среднему солнечному времени справедливо выражение

$$1 \text{ зв. сутки} = 365,2422 / 366,2422 \text{ ср. солн. суток} = (1 - \nu) \text{ ср. солн. суток},$$

где $\nu = 1/366,2422 = 0,0027304336$ – масштабный коэффициент перехода от звездных единиц к средним солнечным.

Итак, s звездных единиц времени содержат $(1 - \nu)s$ единиц среднего солнечного времени:

$$m = (1 - \nu) s. \quad (1.9)$$

Формулы (1.8) и (1.9) дают возможность перехода от интервалов среднего солнечного времени к интервалам звездного времени и обратно.

Звездное время в среднюю полночь на различных меридианах

В момент средней полночи (нижней кульминации среднего экваториального Солнца) часовой угол среднего экваториального Солнца равен 12^h , и звездное время в среднюю полночь:

$$S_0 = \alpha_{\odot \text{ср.экв}} + 12^h.$$

Звездное время в полночь на меридиане Гринвича обозначается S_0 . В Астрономическом Ежегоднике публикуются значения S_0 на каждый день года. Гринвичское среднее звездное время S_0^m в 0^h UT1 определяется следующей формулой:

$$S_0^m = 6^h 41^m 50^s,54841 + 8640184^s,812866T + 0^s,093104T^2 - 6,27^s \cdot 10^{-6} T^3.$$

T – время, отсчитываемое в юлианских столетиях по 36 525 суток в системе всемирного времени UT1 от эпохи 2000, январь 1, 12^h UT1 (2451545,0).

Связь между гринвичским средним звездным временем S_0^m и гринвичским истинным звездным временем S_0 определяется соотношением:

$$S_0 = S_0^m + \text{уравнение равноденствий},$$

где уравнение равноденствий Q_{eq} рассмотрено в подразд. 1.3.9.

Так как полночь на разных меридианах наступает не одновременно, то *звездное время в местную полночь на разных меридианах неодинаково*. Момент s_{0E} к востоку от Гринвича наступает раньше S_0 , а момент s_{0W} (к западу) – позже. В одном и том же пункте звездное время в полночь за сутки увеличивается на величину $\mu \cdot 24^h$, а за промежуток времени, равный λ , звездное время в местную полночь будет отличаться от S_0 на $\mu\lambda$, т. е.

$$s_0 = S_0 \pm \lambda\mu \mid_E^W.$$

Переход от звездного времени к среднему и обратно

Переход от звездного времени s к среднему m и обратно понятен с использованием рис. 1.20, где физическое время измеряется двумя

шкалами – средней солнечной и звездной. Здесь среднее солнечное время m равно промежутку времени $(s - s_0)$, переведенному в средние солнечные единицы:

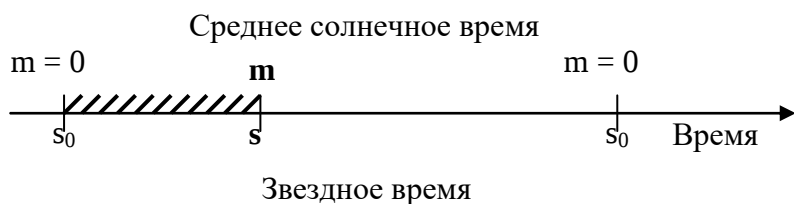


Рис. 1.20. Связь между звездным и средним солнечным временем

$$m = (s - s_0)(1 - v) = (s - s_0) - (s - s_0)v,$$

а звездное время s есть время в полночь s_0 плюс интервал среднего солнечного времени m , переведенный в звездные единицы:

$$s = s_0 + m(1 + \mu) = s_0 + m + m\mu.$$

Для Гринвичского меридиана формулы аналогичны:

$$UT = (S - S_0)(1 - v) = (S - S_0) - (S - S_0)v;$$

$$S = S_0 + UT(1 + \mu) = S_0 + UT + UT\mu.$$

1.2.7. Неравномерность вращения Земли

Системы измерения времени, основанные на суточном вращении Земли, считаются равномерными настолько, насколько равномерно вращение Земли. Однако продолжительность полного оборота Земли вокруг оси непостоянна. Еще в XVII веке на основании расхождений в вычисленных и наблюдаемых координатах Луны и планет было обнаружено, что скорость вращения Земли непрерывно замедляется. С изобретением кварцевого, а затем атомного генераторов частоты, позволяющих измерять промежутки времени с погрешностью 10^{-11} с, было установлено, что *вращение Земли имеет периодические и случайные изменения скорости*.

Выделяют три вида неравномерностей вращения Земли.

1. *Вековое замедление скорости вращения Земли* – продолжительность суток увеличивается на $0,0023^s$ за 100 лет. Замедление вращения Земли вызвано тормозящим действием лунных и солнечных приливов.

2. *Периодические (сезонные) изменения скорости вращения Земли*. Периоды колебаний – 0,5 года и 1 год. Продолжительность суток в течение года может отличаться от средней на $0,001^s$. Причина явления – сезонные перераспределения воздушных масс на поверхности Земли.

3. *Нерегулярные изменения скорости вращения Земли.* Продолжительность суток увеличивается или уменьшается на несколько тысячных долей секунды («скачком»), что по амплитуде превышает столетние приливные изменения. Возможные причины явления – изменение атмосферной циркуляции, перемещение масс внутри Земли, влияние тяготения планет и Солнца.

Вывод: из-за своих неравномерностей вращение Земли вокруг оси не может являться эталоном для измерения времени. В небесной механике и дифференциальных уравнениях гравитационных теорий движения небесных тел в качестве независимого аргумента должна быть идеально равномерная шкала времени.

1.2.8. Эфемеридное время

Эфемеридное время ЕТ – идеально равномерная шкала времени, была введена по решению VIII Съезда Международного Астрономического Совета (МАС) в 1952 г.

1. Механизм – обращение Земли в течение года вокруг Солнца.

2. Масштаб – продолжительность одной *эфемеридной секунды*, равной $1/31556925,9747$ тропического года. Так как тропический год не является постоянным, то за эталон принята продолжительность конкретного тропического года в фундаментальную эпоху 1900,0, янв. 0, 12^h ЕТ.

3. Нульпункт – фундаментальная эпоха 1900, 0 янв., 12^h ЕТ на начальном меридиане.

4. Способ отсчета – посредством системы Всемирного времени УТ, прибавлением поправки за переход к эфемеридному времени:

$$ET = UT + \Delta T,$$

где ΔT – поправка за вековое замедление вращения Земли, которую получают из наблюдений Луны и публикуют в Астрономическом ежегоднике.

В первом приближении систему ЕТ можно представлять как *систему, основанную на суточном вращении Земли, но исправленную за неравномерность этого вращения.*

Так как эфемеридная секунда привязана к продолжительности вполне определенного года, эталон ЕТ не может быть воспроизведен – это идеальное построение. Шкала ЕТ существовала до 1986 г., затем заменена динамическим временем.

1.2.9. Атомное время

С появлением в 1955 г. сверхстабильных эталонов частоты, основанных на квантовых переходах между энергетическими уровнями молекул и атомов, стало возможным создание высокоточных атомных шкал времени. *Атомное время* AT – время, в основу измерения которого положены электромагнитные колебания, излучаемые атомами или молекулами при переходе из одного энергетического состояния в другое. Масштаб системы AT принят равным масштабу ET , т. е. атомные часы есть физическое воспроизведение шкалы эфемеридного времени ET . Точность воспроизведения – до $2 \cdot 10^{-14}$ сек.

Решением XII Генеральной конференции мер и весов в 1967 г. единица AT – 1 атомная секунда – приравнена продолжительности 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Относительная точность цезиевого эталона частоты 10^{-10} – 10^{-11} в течение нескольких лет.

Нульпункт шкалы AT сдвинут относительно нульпункта шкалы ET на постоянную величину:

$$ET = AT + 32,184^s.$$

Эталон атомного времени не имеет ни суточных, ни вековых колебаний, не стареет и обладает достаточной определенностью, точностью и воспроизводимостью. Он не зависит ни от суточного вращения Земли, ни от теории движения тел Солнечной системы.

1.2.10. Динамическое и координатное время

С 1986 г. шкала эфемеридного времени ET заменена двумя шкалами динамического времени DT :

1) *земное динамическое время* TDT , равное по масштабу ET , отнесено к центру масс Земли и служит независимым аргументом видимых геоцентрических эфемерид, в том числе при определении эфемерид ИСЗ;

2) *барицентрическое динамическое время* TDB , которое учитывает движение центра масс Солнца вокруг центра масс всей Солнечной системы (барицентра Солнечной системы). Отнесено к барицентру Солнечной системы и является аргументом дифференциальных уравнений всех гравитационных теорий движения тел Солнечной системы в Ньютоновом приближении.

Различие TDB и TDT состоит в периодических вариациях масштаба с амплитудой 0,00166 с.

Согласно рекомендациям XXI (1991 г.) и XXIV (2000 г.) Генеральных ассамблей МАС, шкалы динамического времени TDT и TDB были заменены шкалами *координатного времени*, отнесенными к барицентрам соответствующих систем небесных тел, в частности, шкалами *геоцентрического координатного времени* (TCG) и *барицентрического координатного времени* (TCB).

Соответствующая шкала времени, используемая для фиксации астрономических наблюдений, выполняемых с поверхности Земли, практически реализуется наземными эталонами времени и частоты и называется *земным временем* (TT). Шкала TT отличается от шкалы TCG постоянным дрейфом. Шкала TT в настоящее время используется в качестве аргумента астрономических эфемерид.

1.2.11. Системы всемирного времени. Всемирное координированное время

Всемирное время UT, по определению, есть среднее солнечное время на меридиане Гринвича. Из-за неравномерности вращения Земли Гринвичский меридиан вращается также неравномерно. Кроме того, в результате непрерывного перемещения оси вращения в теле самой Земли географические полюса смещаются по поверхности Земли, а вместе с ними изменяют свое положение и плоскости истинных меридианов. Из-за этих факторов различают следующие системы всемирного времени:

- UT0 – *время на мгновенном гринвичском меридиане*, определенное по мгновенному положению полюсов Земли. Это время, непосредственно получаемое из астрономических наблюдений суточных движений звезд;

- UT1 – *время на среднем гринвичском меридиане*, исправленное за движение земных полюсов:

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda,$$

где $\Delta\lambda$ – поправка, зависящая от координат мгновенного полюса, отсчитываемых относительно общепринятого среднего полюса (см. подразд. 1.3.7 «Движение земных полюсов»);

- UT2 – *время, исправленное за сезонную неравномерность вращения Земли* ΔT_s :

$$UT2 = UT1 + \Delta T_s.$$

Для согласования наблюдаемого всемирного времени UT1 и строго равномерного времени AT с 1964 г. ввели равномерно-переменную шкалу времени UTC – *всемирное координированное время*. Масштабы UTC и AT равны, а нульпункт меняется скачком. Между UTC и UT1 накапливается расхождение, обусловленное, во-первых, неравномерностью шкалы UT1, а, во-вторых, неравенством масштабов UT1 и AT (1 атомная секунда не равна в точности 1 секунде UT1). При нарастании расхождения между UTC и UT1 до $0,9^s$ производится коррективка скачком на 1^s :

$$UTC = AT + b,$$

где $b = 1^s$, если $|UTC - UT1| > 0,9^s$;

$b = 0$, если $|UTC - UT1| < 0,9^s$.

О моментах ввода поправки в 1^s заранее сообщается в печати.

Сигналы точного времени передаются по радио и телевидению в системе UTC.

1.2.12. Время спутниковых навигационных систем

Спутниковые навигационные системы GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия) функционируют в собственном системном времени. Все процессы измерений фиксируются в этой шкале времени. Необходимо, чтобы шкалы времени используемых спутников были согласованы между собой. Это достигается независимой привязкой каждой из шкал спутников к *системному времени*.

Системная шкала времени есть шкала атомного времени. Она задается сектором управления и контроля, где поддерживается с точностью, более высокой, чем бортовые шкалы спутников.

Системное время GPS есть всемирное координированное время UTC, отнесенное к началу 1980 г.:

$$T_{GPS} = UTC(1980,0).$$

Поправки TGPS к Всемирному координированному времени UTC регистрируются с высокой точностью и передаются в виде постоянной величины в навигационном сообщении, а также публикуются в специальных бюллетенях.

Системное время ГЛОНАСС периодически подстраивается под всемирное координированное время:

$$T_{ГЛОНАСС} = UTC.$$

Контрольные вопросы

1. Назовите параметры известных систем измерения времени.
2. Какие системы времени основаны на суточном вращении Земли?
3. Вариантами какой системы времени являются всемирное, поясное и декретное время?
4. В какой системе времени идут часы в России?
5. Почему системы измерения времени, основанные на суточном вращении Земли, не могут быть эталонными?
6. Разность долгот двух мест равна разности каких времен:
 - а) истинных солнечных;
 - б) декретных;
 - в) звездных?
7. На сколько звездные часы опередают часы, идущие по среднему солнечному времени, за 12 часов среднего солнечного времени?
8. В некотором пункте наблюдалась верхняя кульминация звезды ($\alpha = 10^{\text{h}}55^{\text{m}}48^{\text{s}}$). Какова долгота места наблюдений, если отсчет гринвичского звездного времени по хронометру равен $17^{\text{h}}32^{\text{m}}06^{\text{s}}$?
9. Часовой угол истинного Солнца был равен $3^{\text{h}}18^{\text{m}}$. Чему равно местное звездное время в этот момент, если звездное время в полночь равно 2 часам 10 минутам, а уравнение времени равно 12 часам 05 минутам?
10. Звездное время в полночь на меридиане Гринвича равно $6^{\text{h}}45^{\text{m}}$. Чему равно время в полночь в пункте, расположенном на $6^{\text{h}}31^{\text{m}}$ к западу от Гринвича?
11. Звездное время в полночь в пункте А было равно $23^{\text{h}}56^{\text{m}}$. Чему оно будет равно через 2 суток?
12. Чему равен часовой угол истинного Солнца в $13^{\text{h}}15^{\text{m}}$ всемирного времени в пункте с долготой $6^{\text{h}}48^{\text{m}}$ вост.? Величина $E = 12^{\text{h}}10^{\text{m}}$.
13. Дайте определение вариантам всемирного времени UT0, UT1, UT2, UTC.
14. Какое время есть комбинация среднего солнечного времени и атомного времени?
15. В каких случаях используются шкалы времени TT, TCB, TCG?
13. Дайте определение вариантам всемирного времени UT0, UT1, UT2, UTC.

1.3. Астрономические факторы

1.3.1. Общие положения

Известно, что вследствие суточного вращения Земли горизонтальные координаты звезд A , z и их часовые углы t непрерывно меняются, а экваториальные координаты α , δ остаются постоянными. Но есть факторы, которые изменяют само положение светила на небесной сфере. Эти изменения координат необходимо учитывать при обработке астрономических определений.

Все астрономические факторы делятся на две группы.

1. *Факторы, связанные с изменением положения светила на небесной сфере:*

- рефракция;
- суточный и годичный параллакс;
- суточная и годичная аберрация;
- собственное движение звезд;
- гравитационное отклонение света.

2. *Факторы, связанные с изменением ориентировки в пространстве координатных осей:*

- движение земных полюсов;
- изменение положения оси мира в пространстве: прецессия (дolgopериодическое колебание) и нутация (короткопериодическое колебание).

1.3.2. Астрономическая рефракция

Астрономическая рефракция – явление преломления лучей света в земной атмосфере. Вследствие рефракции наблюдаемое (измеряемое) направление на светило не соответствует действительному, которое имело бы место при отсутствии атмосферы. Угол ρ , на который отклоняется луч в атмосфере, также называется рефракцией.

Строение атмосферы сложное и нестабильное. Чтобы получить формулу, вполне определяющую величину рефракции, надо выбрать модель атмосферы. Существует несколько моделей атмосферы. В геодезической астрономии и оптической астрометрии принята модель *нормальной атмосферы*, определяющаяся следующими положениями:

- атмосфера состоит из ряда слоев;
- плотность воздуха δ в каждом слое постоянна и убывает с высотой;

- нормаль к границе двух сред, проведенная в точке падения луча, совпадает с отвесной линией.

В основе теории рефракции лежат законы преломления света.

1. Луч падающий, луч преломленный и нормаль, проведенная в точке падения к границе двух сред, лежат в одной плоскости.

Отсюда следует вывод, что *для нормальной атмосферы преломление света происходит в вертикальной плоскости, т. е. рефракция влияет только на зенитное расстояние, но не на азимут светила.*

2. Закон Снеллиуса. Отношение синуса угла падения i_1 к синусу угла преломления i_2 для данных двух сред есть величина постоянная, равная отношению показателя преломления μ_2 к показателю преломления μ_1 :

$$\sin i_1 / \sin i_2 = \mu_2 / \mu_1.$$

Отсюда следует, что если плотность второго слоя δ_2 больше плотности первого слоя δ_1 , то $\mu_2 > \mu_1$ и $i_2 < i_1$, *т. е. для нормальной атмосферы луч, попадая из менее плотного слоя в более плотный, отклоняется к отвесной линии.*

Рассмотрим, как влияет астрономическая рефракция на координаты светила.

Допустим, что поверхность Земли – плоскость в точке наблюдения М (рис. 1.21). Луч, падающий в вакууме от звезды, преломляется, попадая в земную атмосферу. Вследствие этого наблюдаемое направление на светило не соответствует действительному, которое имело бы место при отсутствии атмосферы. На рис. 1.21 видно, что топоцентрическое зенитное расстояние $z_{\text{топ}}$ есть сумма измеренного зенитного расстояния z' и рефракции ρ :

$$z_{\text{топ}} = z' + \rho.$$

Для модели нормальной атмосферы астрономическая рефракция не изменяет горизонтальное направление, т. е. азимут топоцентрический равен азимуту измеренному: $A_{\text{топ}} = A'$.

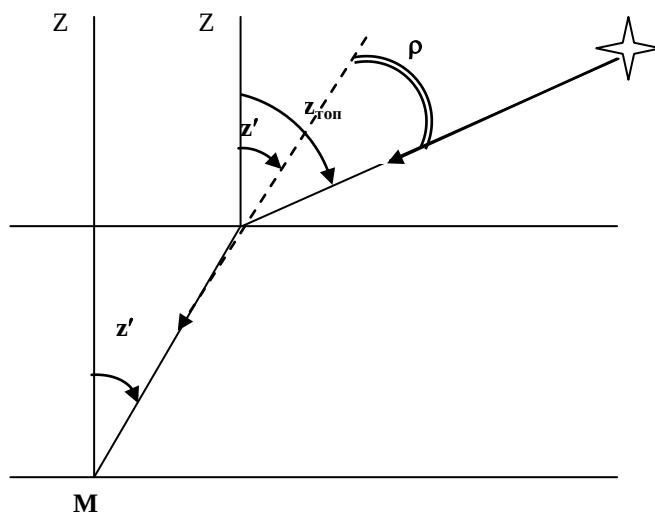


Рис. 1.21. Влияние астрономической рефракции на зенитное расстояние

Выведем формулу для вычисления значения ρ .

Согласно закону Снеллиуса $\sin z_{\text{топ}}/\sin z' = \mu/1$, отсюда $\sin z_{\text{топ}} = \mu \sin z'$, или

$$\sin(z' + \rho) = \mu \sin z'. \quad (1.10)$$

Раскроем левую часть (1.10):

$$\sin z' \cos \rho + \sin \rho \cos z' = \mu \sin z'.$$

Поскольку угол ρ мал, то

$$\cos \rho \sim 1, \sin \rho = \rho''/206\,265''.$$

Тогда

$$\sin z' + \cos z' \rho''/206\,265'' = \mu \sin z'. \quad (1.13)$$

Разделим обе части выражения (1.11) на $\sin z'$ и выразим ρ'' :

$$\rho'' = (\mu - 1) \operatorname{tg} z' 206\,265''.$$

Таким образом, астрономическая рефракция ρ зависит от зенитного расстояния светила и коэффициента преломления воздуха. Показатель преломления μ пропорционален плотности атмосферы δ , которая, в свою очередь, зависит от температуры и давления. Используя законы Бойля – Мариотта и Гей-Люссака, можно записать для любого состояния атмосферы:

$$\rho = 21,67'' B \operatorname{tg} z' / (273 + t \text{ } ^\circ\text{C}), \quad (1.12)$$

где B – давление, мм рт. ст.,

t – температура в градусах Цельсия,

z' – измеренное зенитное расстояние.

Для нормальной атмосферы с $t^0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $B = 760$ мм рт. ст. $\rho_0 = 60,3'' \operatorname{tg} z'$, при $t^0 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\rho_0 = 58,1'' \operatorname{tg} z'$. Выражения для ρ_0 называются *средней рефракцией*, они применяются в приближенных астрономических определениях с точностью грубее $1''$.

С увеличением зенитного расстояния величина рефракции растет. На горизонте значение рефракции для нормальной атмосферы достигает величины примерно $35'$.

Согласно Инструкции о построении ГГС, разрешено производить измерения для астрономических определений 1-го класса при зенитных расстояниях $0^\circ < z < 50^\circ$, для приближенных способов – при зенитных расстояниях $0^\circ < z < 80^\circ$.

Для определения поправки за рефракцию составляются специальные таблицы. В Астрономическом ежегоднике приводятся несколько видов таблиц:

- таблица средней рефракции, где ρ вычислена для постоянных температуры $t = 10^\circ\text{C}$ и давления $B = 760$ мм рт. ст. как функция от измеренного зенитного расстояния, т. е.

$$\rho_0 = f(z', t_{10}, B_{760});$$

- таблица поправок в среднюю рефракцию за температуру и давление.

При помощи этих таблиц можно получить значение рефракции с точностью до $1''$.

Значения рефракции с точностью $0,1''$ приведены в логарифмической таблице.

1.3.3. Параллакс

Параллакс – это изменение направления на объект при наблюдении его из разных точек пространства. Земля участвует в двух движениях: суточном и годичном, поэтому наблюдения небесных светил, выполняемые даже с одного и того же пункта земной поверхности, всякий раз производят из разных точек пространства.

Суточный параллакс возникает вследствие наблюдения светил в разное время суток. Поправка за суточный параллакс есть приведение наблюдений, выполненных на поверхности Земли, к центру Земли (переход от топоцентрических координат к геоцентрическим).

Годичный параллакс обусловлен наблюдениями в разное время года. Поправка за годичный параллакс – приведение наблюдений к центру Солнца (барицентру Солнечной системы), или переход от геоцентрических координат к гелиоцентрическим (барицентрическим).

Суточный параллакс и его влияние на координаты светил

Так как суточный параллакс мал (для Солнца он меньше $9''$), то для изучения суточного параллакса Землю можно считать сферической. На рис. 1.22 отмечены положение наблюдателя M , центр масс Земли C и светило S . Точки C , M , S лежат в вертикале светила; параллактическое смещение происходит в этой плоскости, следовательно

но, изменяется только зенитное расстояние светила. Геоцентрические координаты равны

$$z_{\text{геоц}} = z_{\text{топ}} - P, A_{\text{геоц}} = A_{\text{топ}},$$

где P – суточный параллакс.

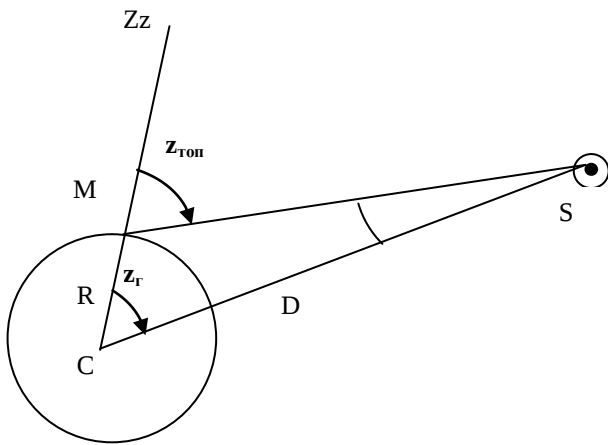


Рис. 1.22. Суточный параллакс

Угол P_0 , под которым из центра светила, наблюдаемого в горизонте точки, расположенной на экваторе, виден экваториальный радиус Земли a , называется *горизонтальным экваториальным параллаксом* (рис. 1.23).

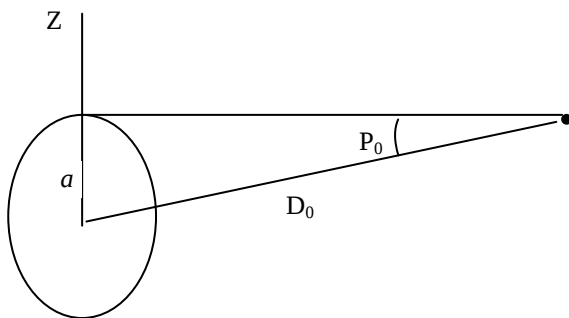


Рис. 1.23. Горизонтальный экваториальный параллакс

Из $\triangle CMS$ следует: $\sin P = R/D \cdot \sin z_{\text{топ}}$. По малости P можно выполнить замену

$$\sin P \approx P''/206\,265''$$

и записать

$$P'' = R/D \cdot \sin z_{\text{топ}} \cdot 206\,265''.$$

Суточный параллакс максимален на горизонте при $z_{\text{топ}} = 90^\circ$. В этом случае величина P называется *горизонтальным параллаксом*. Значения горизонтального экваториального параллакса Солнца приводятся в АЕ, в таблице «Солнце».

В геодезической астрономии параллакс Солнца учитывается по формуле:

$$z_{\text{геоц}} = z_{\text{топ}} - P_0 \sin z_{\text{топ}}.$$

Средний горизонтальный экваториальный параллакс Солнца $P_\odot$, вычисленный с базисом, равным радиусу a земного экватора, и со средним расстоянием D_0 от центра Солнца до центра Земли – одна из фундаментальных астрономических постоянных. Решениями МАС 1976 и 1979 гг. принято значение

$$P_\odot = 8,794''.$$

Что же касается влияния суточного параллакса на координаты звезд, то расстояния до них настолько велики, по сравнению с размером Земли, что ее можно считать материальной точкой, а суточный параллакс звезд – равным нулю.

Годичный параллакс и его влияние на координаты светил

Угол π , под которым со звезды виден радиус земной орбиты A , перпендикулярный к направлению из центра Земли на звезду, называется *годовым параллаксом звезды* (рис. 1.24). В силу малости π можно записать:

$$\pi'' = A \cdot 206\,265''/\Delta.$$

Впервые годовые параллаксы звезд удалось измерить трем астрономам в 1837 – 1840 гг.: В.Я. Струве (Пулково) – параллакс Веги, $\pi = 0,25''$; Ф.В. Бесселю (Кенисберг) – параллакс звезды α Центавра, $\pi = 0,76''$.

Таким образом, были получены прямые доказательства гелиоцентрической теории Коперника и установлены масштабы звездных расстояний. Расстояние до звезды равно

$$\Delta = A/\pi'' \cdot 206\,265'',$$

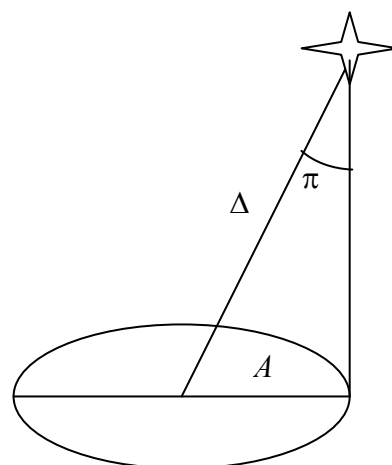
где A – средний радиус земной орбиты, называемый *астрономической единицей* (а.е.):

$$1 \text{ а.е.} = 149\,600 \cdot 10^3 \text{ км.}$$

Большие расстояния до звезд обусловили введение более крупной единицы, такой, как *1 парсек* (пк) – расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом $1''$:

$$1 \text{ ПК} = 206\,265 \text{ а. е.}$$

Параллактические смещения обнаружены только для примерно 6 000 звезд, наиболее близких к Солнечной системе. По новейшим данным, ближайшая к нам звезда – проксима Центавра, $\pi = 0,762''$, $m = 10,5$.



Орбита Земли

Рис. 1.24. Годичный параллакс

В АЕ, в таблице «Средние места звезд» приводятся значения годовых параллаксов звезд, у которых они больше или равны 0,01".

Каталожные координаты α_0, δ_0 в барицентрической системе координат приводятся к центру Земли (геоцентрическим α, δ) путем введения *поправки за годичный параллакс*:

$$\alpha - \alpha_0 = \pi \cos \delta_{\odot} \sin (\alpha_{\odot} - \alpha_0) \sec \delta_0;$$

$$\delta - \delta_0 = \pi(\sin \delta_{\odot} \cos \delta_0 - \cos \delta_{\odot} \sin \delta_0 \cos (\alpha_{\odot} - \alpha_0)),$$

где $\alpha_{\odot}, \delta_{\odot}$ – геоцентрические координаты Солнца.

В векторной форме связь между барицентрическим вектором звезды $\mathbf{q}$ и ее геоцентрическим вектором $\mathbf{P}$ записывается, как

$$\mathbf{P} = \mathbf{q} - \pi \mathbf{E},$$

где $\mathbf{E}$ – барицентрический вектор положения Земли.

1.3.4. Абберация

Абберация – отклонение светового луча от действительного направления на светило, происходящее в результате сложения скорости света с относительной скоростью движения пункта наблюдения в пространстве. Абберацией также называется угол между действительным и искаженным направлением.

На рис. 1.25 в центре небесной сферы находится пункт О, с которого наблюдается светило Σ . Точка пересечения действительного на-

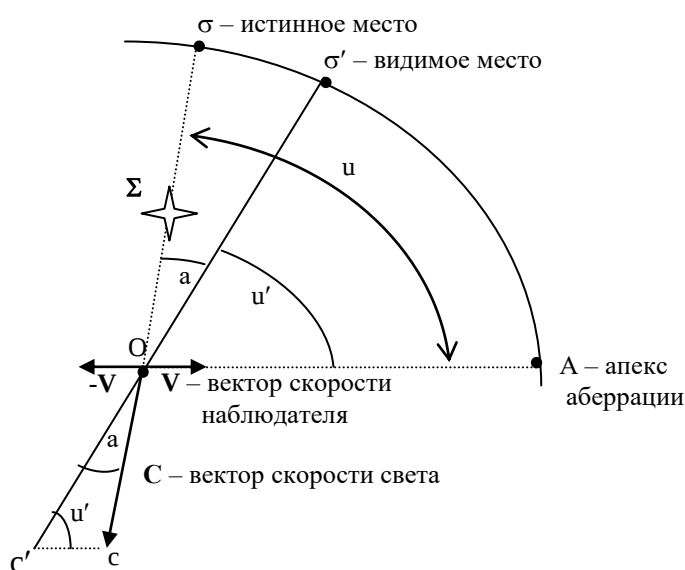


Рис. 1.25. Абберация

правления на светило $O\Sigma$ с небесной сферой называется *истинным местом* светила. Наблюдатель перемещается в пространстве со скоростью $\mathbf{V}$. Точка пересечения направления движения с небесной сферой называется *апексом абберации*.

Вектор $O\sigma'$, полученный в результате сложения относительной скорости движения ($-\mathbf{V}$) и ско-

рости света C , $Oc' = C + (-V)$, показывает направление распространения луча света относительно пункта O . Точка пересечения этого направления с небесной сферой называется *видимым местом* светила. Дуга $\sigma\sigma'$ есть *абберационное смещение*, или абберрация. Абберационное смещение происходит по направлению к *апексу*. Величина абберационного смещения находится из решения плоского треугольника Osc' :

$$\sin a = V/c \cdot \sin u',$$

где $u' = u - a$.

Так как значение a мало, то можно записать

$$a'' = V/c \cdot \sin(u - a) \cdot 206\,265''.$$

Величина

$$k = 206\,265''V/c$$

называется *коэффициентом абберрации*. Тогда $a = k \cdot \sin u'$, или, по малости a ,

$$a = k \cdot \sin u. \quad (1.13)$$

Так как Земля участвует в двух движениях: суточном и годичном, то различают *суточную* и *годичную* абберрации. С учетом абберрации координаты звезды получаются в инерциальной системе, движущейся со скоростью V относительно истинной системы отсчета, – выполняется *переход от истинного места светила к видимому*.

Суточная абберрация и ее влияние на координаты светил

Суточная абберрация возникает вследствие вращения Земли вокруг оси. Для определения величины абберационного смещения надо найти коэффициент суточной абберрации и место апекса. Так как линейная скорость пункта невелика, по сравнению со скоростью света, для определения коэффициента абберрации можно считать Землю шарообразной. Скорость вращения Земли на экваторе вычисляется по формуле:

$$v_{\text{ЭКВ}} = 2\pi R/T,$$

где R – средний радиус Земли;

T – период вращения Земли, выраженный в средних солнечных единицах.

Экваториальная скорость вращения Земли $v_{\text{ЭКВ}} = 0,464$ км/с. На широте ϕ Земля вращается со скоростью $v = v_{\text{ЭКВ}} \cdot \cos \phi$. Таким образом, коэффициент суточной aberrации

$$k = 0,32'' \cos \phi = 0,0213^s \cos \phi.$$

Так как вектор линейной скорости пункта всегда перпендикулярен плоскости меридиана, а Земля вращается с востока на запад, то апекс суточной aberrации всегда находится в точке востока Е.

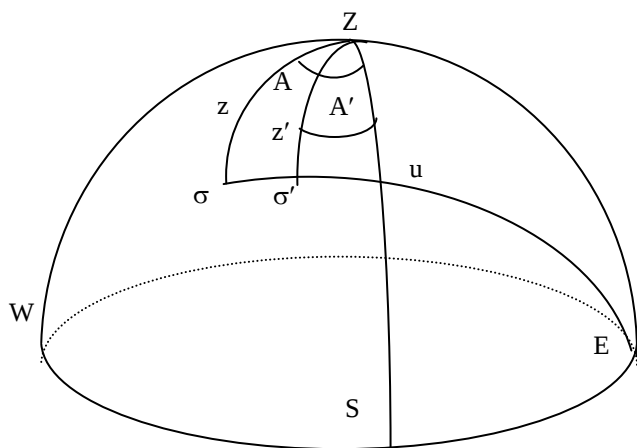


Рис. 1.26. Влияние суточной aberrации на горизонтальные координаты:

σ – истинное место светила с координатами (A, z) ; σ' – видимое место светила с координатами (A', z')

Рассмотрим влияние суточной aberrации на горизонтальные координаты светил. На рис. 1.26 дуга $\sigma\sigma'$ – aberrационное смещение вдоль большого круга, проведенного через σ и Е:

$$\begin{aligned} \cup \sigma\sigma' &= k \sin u = \\ &= 0,32'' \cos \phi \sin \cup \sigma E. \end{aligned}$$

Из решения сферического треугольника $Z\sigma\sigma'$ можно найти разности $z - z'$ и $A - A'$:

$$\begin{aligned} z - z' &= \\ &= 0,32'' \cos \phi \cos z \sin A; \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$\begin{aligned} A - A' &= \\ &= 0,32'' \cos \phi \cos A \operatorname{cosec} z. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Из формул (1.14) и (1.15) видно, что поправки за суточную aberrацию максимальны на экваторе. Для широты ϕ при наблюдении звезд в зените и первом вертикале поправка в зенитное расстояние максимальна, по азимуту же aberrационного смещения нет; при наблюдении звезд в меридиане картина обратная.

В геодезической астрономии поправку за суточную aberrацию часто вводят не в горизонтальные координаты A' и z' , а в момент наблюдения, как

$$\Delta T_a = -0,021^s \cos z.$$

Формулы для учета влияния суточной абберации на экваториальные координаты светила выводятся подобным образом из решения сферических треугольников:

$$\alpha - \alpha' = - (t - t') = 0,021^s \cos \phi \cos t \sec \delta;$$

$$\delta - \delta' = 0,32'' \cos \phi \sin t \sin \delta.$$

При $\delta > 80^\circ$ влияние суточной абберации становится заметным.

При $t = 0^h$ или $t = 12^h$ влияние суточной абберации на прямое восхождение максимально, а на склонение влияния нет. При $t = 6^h$ или $t = 18^h$ картина обратная.

Годичная абберация

Годичная абберация возникает вследствие вращения Земли вокруг Солнца. Явление годичной абберации открыто и объяснено английским астрономом Джеймсом Брадлеем в 1725–1728 гг., при попытке определить параллактическое смещение звезд. Наблюдаемое смещение отличалось от ожидаемого параллактического по фазе на 90° .

Величина коэффициента годичной абберации определяется значением скорости движения Земли по орбите. Так как Земля движется неравномерно, то средняя скорость Земли находится по формуле:

$$v_0 = 1/2 \cdot (v_a + v_n),$$

где v_n – скорость в перигелии (максимальная);

v_a – скорость в афелии (минимальная).

Коэффициент годичной абберации k_0 , вычисленный со средней скоростью v_0 , называется *постоянной годичной абберации*. Решениями Генеральных ассамблей МАС было принято следующее значение постоянной абберации в стандартную эпоху J2000,0:

$$k_0 = 20,49552''.$$

Место апекса годичной абберации определяется с помощью рис. 1.27:

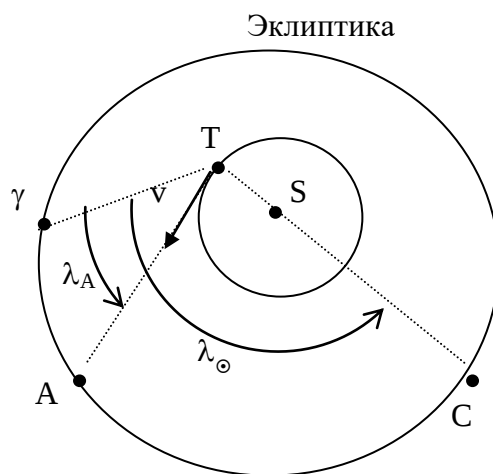


Рис. 1.27. Место апекса годичной абберации: Т – Земля; S – Солнце; А – апекс; λ_A и $\lambda_\odot$ – эклиптические долготы апекса и Солнца

- апекс находится на эклиптике (в плоскости орбиты Земли);
- эклиптическая долгота апекса λ_A на 90° меньше долготы

Солнца $\lambda_\odot$:

$$\lambda_A = \lambda_\odot - 90^\circ.$$

*Влияние годичной аберрации
на экваториальные координаты светил α, δ*

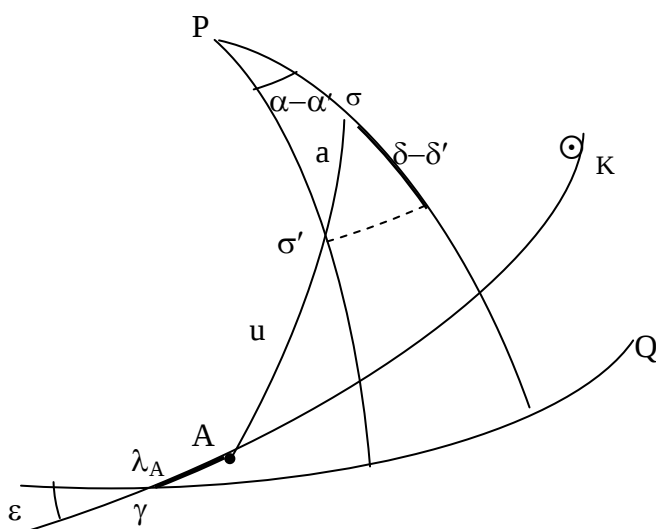


Рис. 1.28. Влияние годичной аберрации на экваториальные координаты светил

Разности истинных и видимых экваториальных координат светила определяются из решения сферических треугольников (рис. 1.28). После ряда преобразований получаем:

$$\begin{aligned} (\alpha' - \alpha) \cos \delta &= \\ &= -k_0 \cdot v/v_0 \cdot (\cos \lambda_A \sin \alpha - \\ &\quad - \sin \lambda_A \cos \alpha \cos \varepsilon); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\delta' - \delta) &= \\ &= -k_0 \cdot v/v_0 \cdot (\cos \lambda_A \cos \alpha \sin \delta + \\ &\quad + \sin \lambda_A \sin \alpha \sin \delta \cos \varepsilon - \\ &\quad - \sin \lambda_A \cos \delta \sin \varepsilon). \end{aligned}$$

В первом приближении, считая орбиту Земли круговой ($v = v_0$, $\lambda_A = \lambda_\odot - 90^\circ$), можно записать:

$$(\alpha' - \alpha) \cos \delta = -k_0 (\sin \lambda_\odot \sin \alpha + \cos \lambda_\odot \cos \alpha \cos \varepsilon); \quad (1.16)$$

$$\begin{aligned} (\delta' - \delta) &= -k_0 (\sin \lambda_\odot \cos \alpha \sin \delta - \cos \lambda_\odot \sin \alpha \sin \delta \cos \varepsilon + \\ &\quad + \cos \lambda_\odot \cos \delta \sin \varepsilon). \end{aligned} \quad (1.17)$$

Введем следующие обозначения:

$$C = -k_0 \cos \lambda_\odot \cos \varepsilon, \quad D = -k_0 \sin \lambda_\odot;$$

$$c = -1/15 \cdot \cos \alpha \sec \delta;$$

$$c' = \tan \varepsilon \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta;$$

$$d = 1/15 \cdot \sin \alpha \sec \delta, \quad d' = \cos \alpha \sin \delta.$$

С учетом этих обозначений выражения (1.16) и (1.17) примут вид:

$$\alpha' - \alpha = Cc + Dd;$$

$$\delta' - \delta = Cc' + Dd'.$$

Коэффициенты c, c', d, d' зависят только от $\alpha, \delta, \varepsilon$ и меняются незначительно. Их называют *редукционными постоянными*. Значения c, c', d, d' приводятся в АЕ для каждой звезды в таблице «Видимые места звезд». Коэффициенты C и D меняются в зависимости от долготы Солнца, их значения на каждый день можно найти в АЕ в таблице «Редукционные величины».

В современной процедуре вычисления видимых мест звезд абберация учитывается в векторной форме. Собственное направление на звезду $\mathbf{p}_1$ в геоцентрической инерциальной системе, движущейся со скоростью $\mathbf{V}$ относительно истинной системы отсчета, определяется как:

$$\mathbf{p}_1 = \left(\beta^{-1} \mathbf{p} + \mathbf{V} + \frac{(\mathbf{p} \cdot \mathbf{V}) \mathbf{V}}{1 + \beta^{-1}} \right) / (1 + \mathbf{p} \cdot \mathbf{V}),$$

где $\mathbf{p}$ – направление на звезду в неподвижной системе отсчета (в геоцентрической экваториальной системе координат);

$$\mathbf{V} = \mathbf{E}_v / c = 0,005\,7755 \mathbf{E}_v;$$

$$\beta = (1 - V^2)^{-1/2};$$

c – скорость света;

$\mathbf{E}_v$ – барицентрический вектор скорости Земли; точка означает скалярное произведение.

Таким образом, учитывая абберацию, координаты звезды получают в инерциальной системе отсчета, движущейся со скоростью v относительно истинной системы отсчета.

1.3.5. Собственное движение звезд

Звезды в пространстве движутся в различных направлениях, с различными скоростями, в среднем порядка нескольких десятков километров в секунду. Двигается и само Солнце вокруг центра Галактики, со скоростью около 240 км/с, и к апексу – в направлении созвездия Геркулеса со скоростью около 30 км/с.

Собственное движение – наблюдаемое изменение направления на звезду, обусловленное движением ее в пространстве относительно

Солнца. Следствием собственного движения звезд является изменение очертания созвездий.

Пусть светило движется относительно Солнца со скоростью $\mathbf{v}$ (рис. 1.29), которую можно разложить на 2 составляющие:

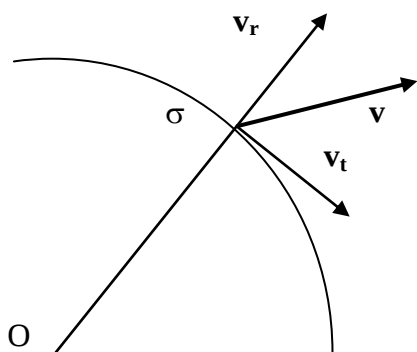


Рис. 1.29. Собственное движение звезд

1) $\mathbf{v}_r$ – *радиальная* скорость, направленная вдоль светового луча; определяется по смещению спектральных линий;

2) $\mathbf{v}_t$ – *тангенциальная* скорость в направлении, перпендикулярном световому лучу. Видимое перемещение светила происходит по направлению тангенциальной скорости.

Если $\sigma_1(\alpha_1, \delta_1)$ – положение светила в эпоху t_1 , а $\sigma_2(\alpha_2, \delta_2)$ – положение светила в эпоху t_2 , то *собственное движение по склонению* μ_δ и *собственное движение по прямому восхождению* μ_α определяются по следующим формулам:

$$\mu_\delta = (\delta_1 - \delta_2)/(t_1 - t_2), \quad \mu_\alpha = (\alpha_1 - \alpha_2)/(t_1 - t_2).$$

Полное собственное движение звезды запишется, как

$$\mu = ((\mu_\alpha \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2)^{1/2}.$$

Как правило, разность между эпохами t_1, t_2 выражается в годах. Поэтому μ_α и μ_δ – *годовые изменения координат светил*.

Если за эпоху $(t_1 - t_2)$ произошло изменение координатной системы, то μ_α и μ_δ будут изменяться. По современной технологии вычислений эти изменения необходимо учитывать.

Собственные движения большинства звезд невелики, от 1" в год и меньше. Из всех известных сейчас самое большое собственное движение имеет звезда Барнарда («летающая звезда», 9,7^m, годовое $\mu = 10,27''$), которая за 100 лет смещается по небесной сфере на 17', что больше углового радиуса Солнца.

1.3.6. Гравитационное отклонение света

Гравитационное отклонение света – изменение направления на объект при прохождении света вблизи больших масс (под действием тяготения). Теоретические основы явления – в общей теории относи-

тельности Эйнштейна. Отклонение света экспериментально зафиксировано при наблюдении звезд во время солнечного затмения 1919 г. (А. Эддингтон).

Поправка за гравитационное отклонение света в измеренное направление на звезду вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta \mathbf{p} = 2\mu(\mathbf{e} - (\mathbf{p} \cdot \mathbf{e})\mathbf{p}) / [c^2 E(1 + \mathbf{p} \cdot \mathbf{e})],$$

где c – скорость света; $\mu = GM$ – гравитационный параметр; E – расстояние от Земли до Солнца; $\mathbf{e}$, $\mathbf{p}$ – единичные векторы гелиоцентрического направления на Землю и звезду соответственно; $\mathbf{p} \cdot \mathbf{e}$ – скалярное произведение векторов.

Если геоцентрические направления на Солнце и звезду совпадают (угол между векторами $\mathbf{p}$, $\mathbf{e}$ равен 180°), то скалярное произведение $(\mathbf{p} \cdot \mathbf{e}) = -1$, и в формуле вычисления поправки $\Delta \mathbf{p}$ возникает деление на ноль. При малом угловом расстоянии звезды от Солнца $\Delta \mathbf{p}$ достигает величины $1,6''$. Но уже при удалении звезды от Солнца на 44° значение поправки становится равным примерно $0,01''$. Поскольку наблюдения звезд в геодезической астрономии выполняются на удалениях от Солнца, больших, чем 44° , то поправкой за гравитационное отклонение света в этих случаях можно пренебречь.

Итак, рассмотрена первая группа факторов, изменяющих координаты светил.

1. Рефракция (при $0^\circ \leq z \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq \rho \leq 2\,000''$).
2. Параллакс (суточный $P_\odot \approx 8,8''$, годичный $\pi_{\max} = 0,762''$).
3. Абerrация ($k_{\text{год}} \approx 20,5''$, $k_{\text{сут}} \approx 0,32''$).
4. Собственное движение звезд (как правило, не превышает $1''$ в год).
5. Гравитационное отклонение света (для наблюдений на удалении, начиная с 60 градусов от Солнца, практически равно нулю).

1.3.7. Движение земных полюсов

Движение земных полюсов заключается в том, что при вращении Земли по инерции, т. е. независимо от каких-либо возмущающих внешних сил, отмечается *изменение положения Земли относительно ее оси вращения*. Иначе говоря, ось вращения проходит то через одни, то через другие точки земной поверхности, вследствие этого изменяются географические координаты пунктов ϕ и λ .

Подвижный полюс, называемый *мгновенным*, описывает на поверхности Земли сложную кривую (рис. 1.30), не выходя из квадрата со сторонами около 26 м, т. е. максимальное смещение мгновенного полюса относительно некоего среднего положения меньше $0,5''$.

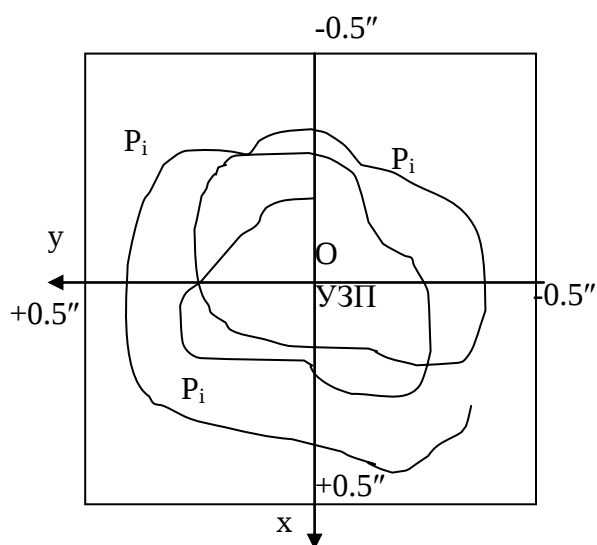


Рис. 1.30. Движение полюса Земли:

УЗП – условный Земной полюс;

P_i – положения мгновенного полюса в разные эпохи; ось Ox направлена вдоль начального меридиана

Движение земных полюсов предсказано Эйлером в 1770 г. Полагая, что Земля – абсолютно твердое тело, Эйлер установил, что движение полюса должно совершаться по кругу в направлении суточного вращения Земли с периодом, равным 10 месяцев. Этот теоретический период движения земных полюсов назван *Эйлеровым* периодом.

В 1891 г. американский астроном Чандлер на основа-

нии обработки нескольких десятков тысяч широтных наблюдений определил эмпирическим путем *период свободных колебаний полюса*, равный 14 месяцам. Различие теоретического и действительного периодов объяснил в начале XX в. С. Ньюком: причина различия – в эластичности Земли, ее способности к упругим деформациям. По современным данным, период свободных колебаний составляет около 437 звездных суток.

Из наблюдений установлены следующие периоды движения полюсов: 14-месячный (Чандлеров), 12-месячный (годовой), 6-месячный (полугодовой). Последние два периода связаны с сезонными метеорологическими изменениями, происходящими на Земле. Под вопросом остается существование систематического векового движения полюсов с периодами от десятков до тысяч и миллионов лет из-за недостаточного количества точных рядов наблюдений. Современный уровень точности позволяет фиксировать суточное движение полюсов с амплитудой $0,05$ м.

Для определения координат мгновенного полюса x , y в 1898 г. была организована *Международная Служба Широты* (МСШ). В не-

скольких странах на параллели с широтой $39^{\circ}8'$ были созданы обсерватории, снабженные зенит-телескопами для регулярных определений широты по общей программе. Принцип определения x, y заключается в совместном решении системы уравнений вида

$$x \cos \lambda_i - y \sin \lambda_i = \phi_i - \phi_0,$$

где ϕ_i, λ_i – мгновенные (наблюдаемые) широта и долгота;

ϕ_0 – средняя широта.

В настоящее время координаты полюса определяют совместно с неравномерностью вращения Земли как *параметры вращения Земли* (ПВЗ). В России определением ПВЗ занимается Государственная служба времени и частоты (ГСВЧ); несколько десятков станций по всему миру доставляют сведения для Международной службы вращения Земли (International Earth Rotation Service, IERS). Координаты мгновенного полюса x, y публикуются в Бюллетене «Всемирное время и координаты полюса» на эпоху наблюдения.

Результаты астрономических определений широты ϕ , долготы λ и азимута a приводят к *Условному Земному Полюсу* (УЗП), вводя поправки за движение полюса:

$$\phi_0 = \phi - \Delta\phi = \phi - (x \cos \lambda - y \sin \lambda);$$

$$\lambda_0 = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - 1/15 (x \sin \lambda + y \cos \lambda) \operatorname{tg} \phi;$$

$$a_0 = a - \Delta a = a - (x \sin \lambda + y \cos \lambda) \sec \phi.$$

Движение полюсов не влияет на экваториальные и эклиптические координаты светил.

1.3.8. Изменение положения оси мира в пространстве. Прецессия

Прецессия – долгопериодические колебания оси мира в пространстве. Сравнение наблюдений звезд, относящихся к различным моментам времени, показывает, что координаты звезд (α, δ) и, следовательно, вычисленные по ним (A, Z) медленно меняются (даже после учета влияния перечисленных выше факторов). Изменения координат звезд носят систематический характер, следовательно, сама система отсчета меняет свое положение по отношению к неподвижным звездам.

Положение экватора определяет ось вращения Земли. Она перемещается в пространстве, и полюс мира P_N описывает на небесной

сфере сложную кривую, в общих чертах напоминающую небесную окружность малого круга сферического радиуса, равного $\varepsilon \approx 23,5^\circ$, с центром в полюсе эклиптики (рис. 1.31). Полный оборот полюса

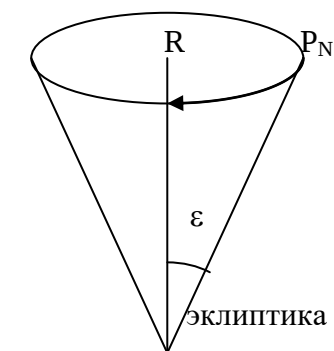


Рис. 1.31. Прецессия

мира P вокруг полюса эклиптики R совершается примерно за 26 000 лет. Плоскость эклиптики, а, следовательно, и ее полюсы, также изменяют свое положение среди неподвижных звезд, но значительно медленнее, чем полюсы экватора. Очевидно, что вследствие изменений в положении плоскостей экватора и эклиптики точка весеннего равноденствия γ не сохраняет постоянного положения среди звезд. Она тоже перемещается по эклиптике навстречу Солнцу. По-

этому прохождение Солнца через точку весеннего равноденствия γ происходит каждый год раньше, чем возвращение его в одно и то же место среди звезд. Это явление было названо прецессией (лат. praecessio aequinoctium – предварение равноденствия). Явление прецессии было открыто во II в до н.э. греческим астрономом Гиппархом.

В настоящее время годовая прецессия, полученная по современным наблюдениям, принята равной $50,2''$. Период прецессии составляет 25 600 лет.

Физическая и механическая сущность прецессии

Впервые объяснение прецессии как явления было дано в 1687 г. Ньютоном в его труде «Математические принципы натуральной философии». Полную теорию возмущения вращательного движения Земли разработал Ж.Л. Даламбер (1717–1783 г.).

Механическими причинами, вызывающими явление прецессии и нутации, являются возмущающие действия сил тяготения масс Солнца, Луны и планет на вращающуюся эллипсоидальную Землю.

Рассмотрим рис. 1.32, на котором изображены Земля и Солнце. Сила притяжения Земли Солнцем, точка приложения которой совпадает с центром тяжести Земли O , влияет только на поступательное движение Земли, а не на вращательное. Силы притяжения избыточных масс, приложенные к точкам A и B , обозначены как F_A , F_B , причем $|F_A| < |F_B|$. Результирующая этих сил F не совпадает с центром O и пройдет через точку O' ближе к Солнцу. Эта сила влияет не толь-

ко на поступательное, но и на вращательное движение Земли, следовательно, фигура Земли будет поворачиваться, стремясь совместить плоскость экватора с плоскостью эклиптики. Вектор угловой скорости поворота Земли $\mathbf{M}'$ показан на рис. 1.31. Результирующий вектор $\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_0 + \mathbf{M}'$, направление которого определяет мгновенное положение оси вращения Земли.

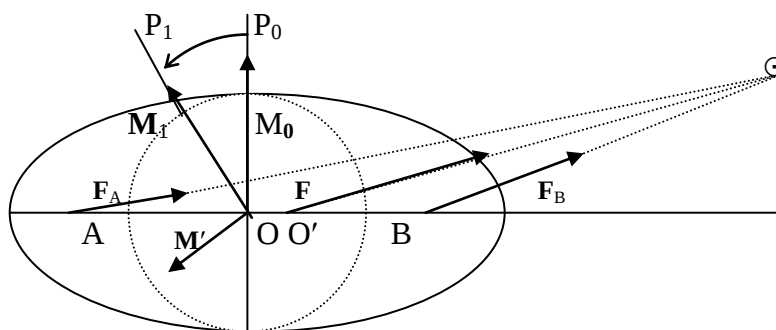


Рис. 1.32. Физическая и механическая сущность прецессии:

О – центр тяжести Земли; А, В – центры тяжести избыточных масс; $\mathbf{M}_0$ – вектор угловой скорости суточного вращения Земли

Аналогом вращающейся Земли является гироскоп, или «волчок», ось вращения которого также испытывает прецессионное движение. В механике при прецессии наклон оси вращения постоянен.

Кроме лунно-солнечной прецессии, не изменяющей наклон оси вращения Земли к плоскости эклиптики, наблюдается прецессия от планет. Она выражается в том, что плоскость и полюс эклиптики медленно вращаются с периодом около 60 тыс. лет. Вследствие этого наклон эклиптики к экватору меняется. Наклон эклиптики к экватору ε_t на момент t вычисляется по формуле

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t0} - 46,8150''\Delta T - 0,00059''\Delta T^2 + 0,001813''\Delta T^3,$$

где $\varepsilon_{t0} = 23^\circ 26' 21,448''$ – наклон эклиптики к экватору на фундаментальную эпоху J2000,0;

$\Delta T = (JD_t - JD_{t0})/36\,525$ – время, прошедшее от фундаментальной эпохи, выраженное в юлианских столетиях.

Влияние прецессии на экваториальные координаты звезд

Пусть точка весеннего равноденствия и полюс Мира совершают только вековое, прецессионное движение. Тогда γ_0 – средняя точка весеннего равноденствия; P_0 – средний полюс мира, определяющий положение среднего экватора; ε_0 – средний наклон эклиптики к экватору. Координаты светил, отнесенные к среднему экватору и к сред-

ней точке весеннего равноденствия, называются *средними* координатами. Они изменяются с течением времени, поэтому даются с указанием соответствующего момента времени, называемого эпохой (J2000,0, 1950, 1975 и т. д.).

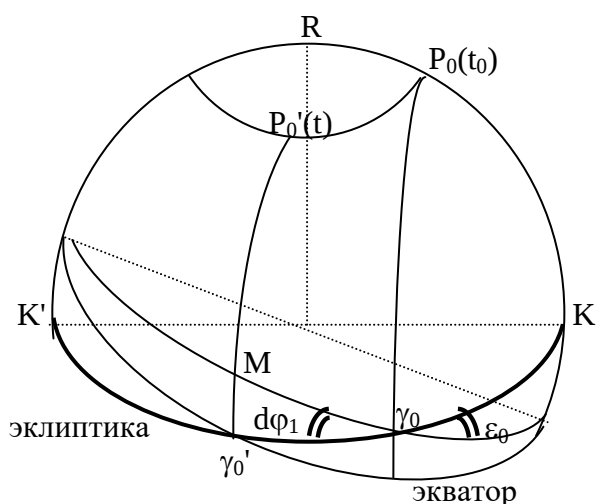


Рис.1.33. Влияние прецессии на координаты светил

На рис. 1.33 показано прецессионное движение среднего полюса мира: положение среднего полюса P_0 на эпоху t_0 и положение среднего полюса P_0' на эпоху t . Вследствие прецессии происходит смещение по эклиптике точки γ на величину $\gamma_0\gamma_0' = d\varphi_1$. Элементарное смещение $d\varphi_1$ можно разложить на составляющие:

$\gamma_0 M = d\varphi_1 \cos \varepsilon_0$ – проекция $d\varphi_1$ на экватор, или *лунно-солнечная прецессия по прямому восхождению*;

$\gamma_0' M = d\varphi_1 \sin \varepsilon_0$ – проекция $d\varphi_1$ на круг склонения, или *лунно-солнечная прецессия по склонению*.

Если эти величины отнести к единице времени – тропическому году, то

$n = d\varphi_1/dt \cdot \sin \varepsilon_0$ – годовая лунно-солнечная прецессия по склонению;

$m_1 = d\varphi_1/dt \cdot \cos \varepsilon_0$ – годовая лунно-солнечная прецессия в экваторе (по прямому восхождению);

$m = m_1 - q_1$ – годовая общая прецессия в экваторе (где q_1 – прецессия от планет в экваторе).

Значения прецессионных величин m , n и среднего наклона эклиптики к экватору ε_0 приводятся в Астрономическом ежегоднике [2]: $n_{2000,0} = 20,051''$, $m_{2000,0} = 46,071''$.

Пусть даны средние экваториальные координаты светила α_0 , δ_0 на эпоху t_0 . Чтобы определить средние α , δ на эпоху t , надо учесть влияние прецессии за промежуток времени $t - t_0$:

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0, \quad \Delta\delta = \delta - \delta_0.$$

Разложим $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ в ряд Тейлора, ограничиваясь членами третьего порядка:

$$\Delta\alpha = d\alpha / dt \cdot (t - t_0) + d^2\alpha / dt^2 \cdot (t - t_0)^2 / (1 \cdot 2) + d^3\alpha / dt^3 \cdot (t - t_0) / (1 \cdot 2 \cdot 3) + \dots;$$

$$\Delta\delta = d\delta / dt \cdot (t - t_0) + d^2\delta / dt^2 \cdot (t - t_0)^2 / (1 \cdot 2) + d^3\delta / dt^3 \cdot (t - t_0) / (1 \cdot 2 \cdot 3) + \dots,$$

где первые, вторые и третьи слагаемые есть соответственно годовые, вековые и тысячелетние изменения координат.

Для учета влияния прецессии на координаты светил в интервале одного года ограничиваются первыми членами разложений в ряд Тейлора:

$$d\alpha/dt = m + n \operatorname{tg} \delta \sin \alpha; \quad d\delta/dt = n \cos \alpha.$$

Отсюда значения α , δ , исправленные за прецессию, равны:

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha = \alpha_0 + 1/15 (m + n \operatorname{tg} \delta \sin \alpha)(t - t_0);$$

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta = \delta_0 + n \cos \alpha(t - t_0).$$

Эти формулы – приближенные, справедливы в течение года для любых светил, кроме близполюсных. Для вычисления средних экваториальных координат в различные эпохи и на больших промежутках времени существует специальный математический аппарат, использующий матрицы и углы поворота.

Матрица прецессии

Пусть $\mathbf{r}_0 = [X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$ – средние экваториальные координаты светила на эпоху t_0 ,

$\mathbf{r} = [X \ Y \ Z]^T$ – средние экваториальные координаты светила на эпоху t .

Связь между средними координатами двух эпох определяется в матричном виде:

$$\mathbf{r} = \mathbf{P} \mathbf{r}_0. \quad (1.18)$$

В формуле (1.18) $\mathbf{P}$ – матрица прецессии, которая есть результат трех поворотов

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}_3(-Z_A)\mathbf{R}_2(\theta_A)\mathbf{R}_3(-\zeta_A).$$

Величины Z_A , θ_A , ζ_A называются *прецессионными параметрами*. Они определяют положение среднего равноденствия и экватора даты относительно среднего равноденствия и экватора начальной эпохи.

Прецессионные параметры впервые введены С. Ньюкомом в 1895 г., впоследствии они были уточнены Андуайе в соответствии с новыми значениями астрономических постоянных. В настоящее время в Астрономическом Ежегоднике публикуются разложения Z_A , θ_A , ζ_A как функций от $(t - t_0)$, где t_0 – какая-либо фундаментальная эпоха.

1.3.9. Изменение положения оси мира в пространстве. Нутация

Нутация – короткопериодические колебания оси мира в пространстве, или колебания истинного полюса мира относительно среднего. В 1747 г. английский астроном Дж. Брадлей установил, что полюс мира обладает не только вековым движением – прецессией, но и периодическим – нутацией, периоды которой равны от 18 и 2/3 года и меньше. Максимальный период нутации 18 и 2/3 года равен периоду прецессии лунной орбиты вокруг оси эклиптики. Эта прецессия вызвана гравитационным взаимодействием между массами Земли и Луны.

Итак, на постоянное прецессионное движение среднего полюса мира вокруг полюса эклиптики накладывается дополнительное движение по эллипсу – нутационное (рис. 1.34). В конечном счете проис-

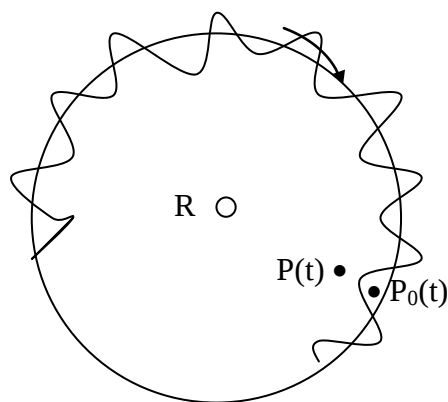


Рис. 1.34. Нутация:

R – полюс эклиптики; $P_0(t)$ – средний полюс на эпоху t ; $P(t)$ – истинный полюс на эпоху t

ходит движение по синусоиде. Различают нутацию:

в эклиптике (по долготе) – $[\Delta\psi]$;

в наклоне (изменение ε) – $[\Delta\varepsilon]$.

Эти два вида разделяются на долгопериодические и короткопериодические части:

$$[\Delta\psi] = \Delta\psi + d\psi, \quad [\Delta\varepsilon] = \Delta\varepsilon + d\varepsilon.$$

Значения $[\Delta\psi]$ и $[\Delta\varepsilon]$ зависят от положения Луны и Солнца и приводятся в виде разложений

по тригонометрическим функциям в Астрономическом ежегоднике.

Если ограничить нутацию по долготе и наклону первыми, главными членами формул, то

$$[\Delta\psi] = 6,86'' \sin \Omega = x; \quad [\Delta\varepsilon] = 9,21'' \cos \Omega = y$$

или

$$x/9,21'' = \cos \Omega; \quad y/6,86'' = \sin \Omega,$$

где Ω – средняя долгота восходящего узла лунной орбиты на эклиптике.

Если эти равенства возвести в квадрат и сложить, то получится выражение

$$x^2/9,21^2 + y^2/6,86^2 = 1,$$

описывающее траекторию истинного полюса по отношению к среднему в виде канонического уравнения эллипса с центром в P_0 и полуосями 9,21" и 6,86". Следовательно, истинный полюс мира P будет описывать вокруг среднего полюса мира P_0 нутационный эллипс с размерами 6,86" на 9,21".

С положением истинного и среднего полюсов мира связаны *истинная и средняя точки весеннего равноденствия*, поэтому различают *истинное и среднее звездное время*:

$$S_{\text{ист}} = t_{\gamma \text{ ист}}, \quad S_{\text{ср}} = t_{\gamma \text{ ср}}.$$

В некоторых случаях применяется *квазиистинное звездное время*, вычисляемое с учетом только долгопериодических членов нутации.

Уравнение равноденствий, связывающее истинное и среднее гринвичское звездное время S_0 и S_0^m , определяется соотношением [2]:

$$Q_{\text{eq}} = (\Delta\psi + d\psi) \cos \varepsilon_0 + 0,00264'' \sin \Omega + 0,000063'' \sin 2\Omega.$$

Влияние нутации на экваториальные координаты светила

Координаты светила α' , δ' , отнесенные к действительным (истинным) положениям точки весеннего равноденствия, полюса Мира и экватора называются *истинными*.

Пусть даны средние координаты α , δ светила в момент t . Требуется определить его истинные координаты α' , δ' на этот же момент. Истинные и средние экваториальные координаты, как функции от эклиптических, записываются в виде:

$$\begin{aligned} \alpha &= f_1(\lambda, \beta, \varepsilon); \quad \delta = f_2(\lambda, \beta, \varepsilon); \\ \alpha' &= f_1(\lambda', \beta', \varepsilon'); \quad \delta' = f_2(\lambda', \beta', \varepsilon'). \end{aligned}$$

Нутация изменяет эклиптическую долготу светила на $[\Delta\psi]$ и наклон эклиптики к экватору на $[\Delta\varepsilon]$, но не влияет на широту, поэтому

$$\alpha' = f_1(\lambda + [\Delta\psi], \beta, \varepsilon + [\Delta\varepsilon]); \quad \delta' = f_2(\lambda + [\Delta\psi], \beta, \varepsilon + [\Delta\varepsilon]).$$

Отсюда выражения для редукций будут следующие:

$$\Delta\alpha = \partial\alpha/\partial\lambda \cdot [\Delta\psi] + \partial\alpha/\partial\varepsilon \cdot [\Delta\varepsilon]; \quad \Delta\delta = \partial\delta/\partial\lambda \cdot [\Delta\psi] + \partial\delta/\partial\varepsilon \cdot [\Delta\varepsilon].$$

Если найти значения частных производных (запишем их без вывода), то:

$$\Delta\alpha = [\Delta\psi](\cos \varepsilon + \sin \varepsilon \sin \alpha \operatorname{tg} \delta) - [\Delta\varepsilon] \cos \alpha \operatorname{tg} \delta;$$

$$\Delta\delta = [\Delta\psi] \sin \varepsilon \cos \alpha + [\Delta\varepsilon] \sin \alpha.$$

Матрица нутации

Матрица нутации – ортогональная матрица вращения, позволяющая осуществлять переход от средних экваториальных координат, отнесенных к среднему полюсу и равноденствию, к истинным экваториальным координатам, отнесенным к истинному полюсу. Матрица нутации имеет следующий вид:

$$\mathbf{N} = \mathbf{R}_1(-\varepsilon_0 - \Delta\varepsilon - d\varepsilon)\mathbf{R}_3(-\Delta\psi - d\psi)\mathbf{R}_1(\varepsilon_0).$$

Совместный учет прецессии и нутации

В современной процедуре вычисления видимых мест звезд выполняется совместный учет прецессии и нутации посредством матрицы:

$$\mathbf{R} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{P}.$$

Элементы матрицы $\mathbf{R}$ приводятся в Астрономическом ежегоднике на дату наблюдения в таблице «Прецессия и нутация». В результате совместного учета прецессии и нутации выполняется переход от среднего полюса эпохи t_0 к истинному полюсу эпохи t .

Итак, рассмотрена вторая группа факторов.

1. Движение земных полюсов: основные периоды 14, 12, 6 месяцев; максимальное смещение полюса – $0,5''$.
2. Прецессия: период 26 000 лет; годичная прецессия – $50,2''$.
3. Нутация: периоды $18 \frac{2}{3}$ года и меньше; размеры нутационного эллипса – $9'' \times 7''$.

1.3.10. Совместный учет редукций

При астрономических определениях широты, долготы и азимута измеряются горизонтальные координаты светил – зенитное расстояние и горизонтальное направление (или азимут). Экваториальные ко-

ординаты светил считаются известными – публикуются в каталогах. Для корректной обработки астрономических определений необходимо приводить измеренные и каталожные координаты в одну систему. Схема редукций приведена на рис. 1.35.

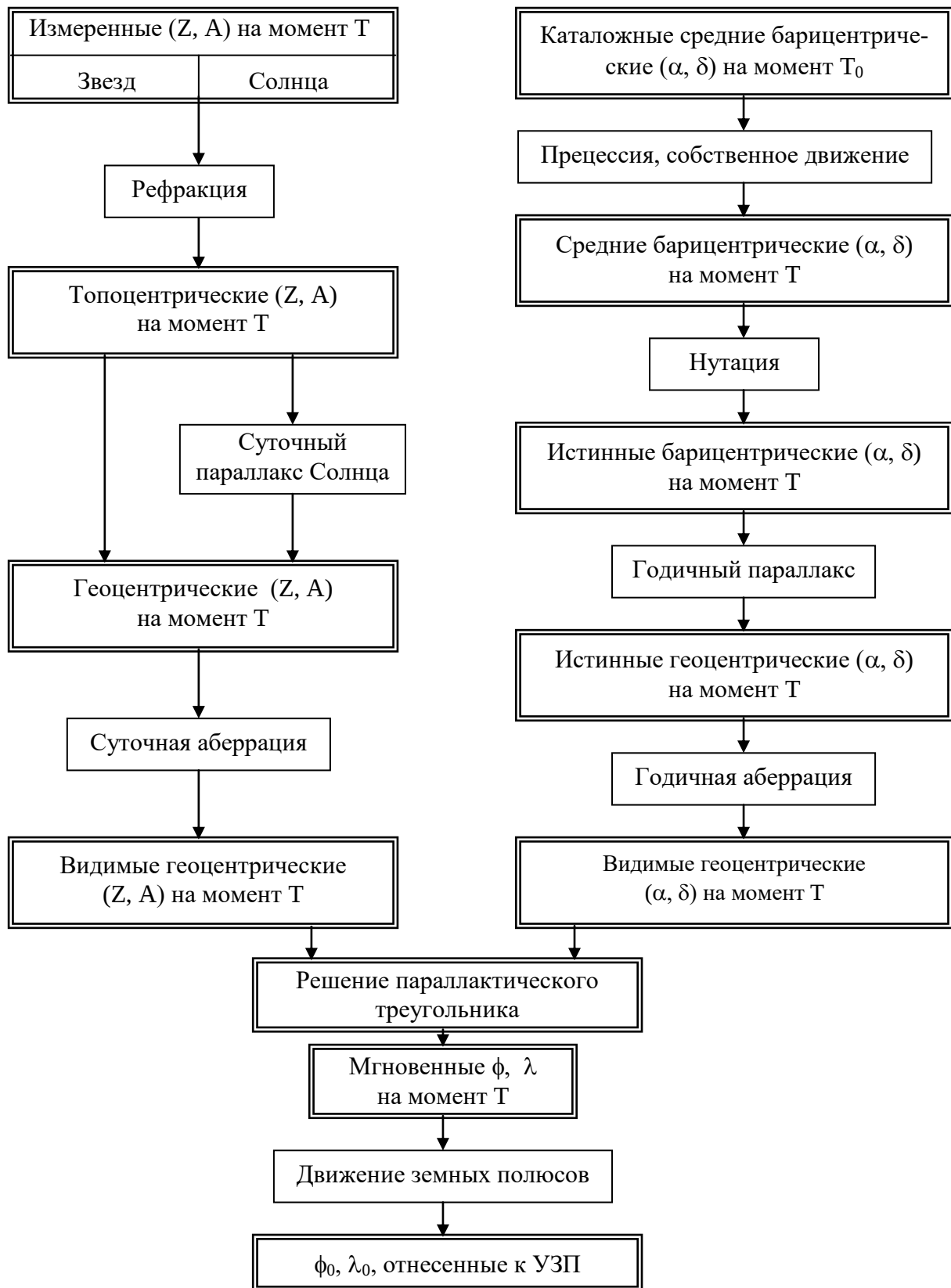


Рис. 1.35. Совместный учет редукций

1.3.11. Вычисление видимых мест звезд

При астрономических определениях координат и азимута необходимо знать видимые координаты α , δ (видимые места) звезд на момент наблюдения. Момент времени t , на который вычисляется видимое место, задается в шкале барицентрического динамического времени TDB, полагая, что отличие этой шкалы от шкалы земного времени TT для данной задачи несущественно: $t = \text{TDB} = \text{TT}$.

Исходными данными для вычисления видимых мест звезд на момент времени t являются следующие величины:

- средние экваториальные координаты звезды α_0 , δ_0 , отнесенные к экватору и равноденствию какой-либо фундаментальной эпохи (в настоящее время эпохи J2000,0);
- собственные движения за столетие μ_α , μ_δ ;
- параллакс звезды π и радиальная скорость v ;
- барицентрические координаты $\mathbf{E}$ (в а. е.) и скорости $\mathbf{E}_v$ Земли (в а. е. / сут) на момент времени t ;
- матрица совместного учета прецессии и нутации $\mathbf{R}$ на момент времени t ;
- юлианская дата $\text{JD}(t)$, соответствующая моменту времени t .

Современная процедура вычисления видимых мест звезд выполняется в следующем порядке.

1. Вычисление вектора барицентрического положения звезды $\mathbf{q}$, отнесенного к экватору и равноденствию эпохи J2000,0:

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(\cos \alpha_0 \cos \delta_0, \sin \alpha_0 \cos \delta_0, \sin \delta_0).$$

2. Определение проекции вектора собственного движения звезды $\mathbf{m}$, выраженного в радианах в столетие, по формулам:

$$m_x = -\mu_\alpha \cos \delta_0 \sin \alpha_0 - \mu_\delta \sin \delta_0 \cos \alpha_0 + v\pi \cos \alpha_0 \cos \delta_0;$$

$$m_y = \mu_\alpha \cos \alpha_0 \cos \delta_0 - \mu_\delta \sin \delta_0 \sin \alpha_0 + v\pi \sin \alpha_0 \cos \delta_0;$$

$$m_z = \mu_\delta \cos \delta_0 + v\pi \sin \delta_0,$$

где радиальная скорость v выражена в астрономических единицах в 100 лет ($1 \text{ км/с} = 21,09495 \text{ а. е./100 лет}$), а собственные движения за столетие μ_α , μ_δ и параллакс π – в радианах.

3. Вычисление геоцентрического вектора звезды на момент t :

$$\mathbf{P} = \mathbf{q} + \mathbf{Tm} - \pi \mathbf{E},$$

где $T = (JD(t) - 2\,451\,545,0)/36\,525$ – интервал времени между заданным моментом и стандартной эпохой J2000,0, выраженный в юлианских столетиях.

4. Вычисление геоцентрических направлений на звезду $\mathbf{p}$ и на Солнце $\mathbf{e}$:

$$\mathbf{p} = \mathbf{P} / |\mathbf{P}|; \mathbf{e} = \mathbf{E} / |\mathbf{E}|.$$

5. В вектор геоцентрического направления на звезду $\mathbf{p}$ вводится поправка за гравитационное отклонение света:

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{p} + 2\mu(\mathbf{e} - (\mathbf{p} \cdot \mathbf{e})\mathbf{p}) / [c^2 E(1 + \mathbf{p} \cdot \mathbf{e})].$$

6. Учет абберации: получение собственного направления на звезду $\mathbf{p}_2$ в геоцентрической инерциальной системе, движущейся со скоростью $\mathbf{V}$ относительно истинной системы отсчета:

$$\mathbf{p}_2 = \left(\beta^{-1} \mathbf{p}_1 + \mathbf{V} + \frac{(\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{V})\mathbf{V}}{1 + \beta^{-1}} \right) / (1 + \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{V}),$$

где $\mathbf{V} = \mathbf{E}_v / c = 0,005\,7755 \mathbf{E}_v$; $\beta = (1 - V^2)^{-1/2}$; c – скорость света.

7. Учет прецессии и нутации: получение видимого направления на звезду $\mathbf{p}_2$:

$$\mathbf{p}_3 = \mathbf{R} \mathbf{p}_2.$$

8. Переход от прямоугольных координат к сферическим – получение видимого места звезды:

$$\mathbf{p}_3 = \mathbf{p}_3(x, y, z); \alpha = \arctg(y/x); \delta = \arcsin z.$$

Контрольные вопросы

1. Каждой перечисленной ниже задаче подобрать соответствующую редукцию:

- переход от истинных координат к видимым;
- переход от средних координат эпохи T_0 к средним координатам эпохи T ;
- приведение измерений к центру Земли;
- переход от неподвижной к движущейся системе отсчета;
- приведение географических координат пункта к условному земному полюсу;

- переход от средних координат к истинным;
- переход от измеренных координат к топоцентрическим;
- приведение измерений к центру Солнца.

2. Какие факторы изменяют положение светила на небесной сфере, а какие – положение координатных осей?

3. Какие факторы из перечисленных изменяют географические координаты пунктов, а какие – экваториальные координаты звезд: прецессия, нутация, движение земных полюсов?

4. Годичный параллакс Сириуса равен $0,374''$, Альдебарана – $0,048''$. До какой из звезд расстояние больше и во сколько раз?

5. Из-за чего происходит медленное смещение точки весеннего равноденствия по эклиптике?

6. Чем отличается видимое положение светила от истинного?

7. Можно ли увидеть Солнце на зенитном расстоянии, большем чем 90° ?

8. Влияет ли лунно-солнечная прецессия на смену времен года?

2. ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

2.1. Предмет и задачи геодезической астрономии

2.1.1. Использование астрономических данных при решении задач геодезии

Геодезическая астрономия – раздел астрономии, в котором изучаются теория и способы определения географических координат точек земной поверхности и азимутов направлений из наблюдений небесных светил. Светила в геодезической астрономии играют роль опорных точек с известными координатами, подобно опорным точкам на Земле. Положения светил задаются в определенной системе координат и в определенной системе измерения времени. Геодезическая астрономия изучает также устройство и теорию инструментов, используемых для астрономических наблюдений, и методы математической обработки астрономических определений.

Основные моменты использования в геодезии результатов астрономических определений следующие.

1. Астрономические определения совместно с результатами геодезических и гравиметрических измерений позволяют: установить исходные геодезические даты; обеспечить ориентировку государственной геодезической сети, а также осей референц-эллипсоида в теле Земли; определить параметры земного эллипсоида; определить высоты квазигеоида относительно референц-эллипсоида.

2. Определение из астрономических наблюдений составляющих уклонения отвесной линии необходимо для установления связи между геодезической и астрономической системами координат, приведения измерений к принятой эпохе отсчета координат и гравитационного потенциала, правильной интерпретации результатов повторного геометрического нивелирования, изучения внутреннего строения Земли.

3. Астрономические определения азимутов направлений на земной предмет после введения поправок за уклонения отвесных линий контролируют в государственной геодезической сети угловые измерения, обеспечивают постоянство ориентировки геодезических сетей, ограничивают и локализуют действие случайных и систематических погрешностей в угловых измерениях.

4. В районах со слаборазвитой геодезической сетью астрономические пункты с учетом данных о гравитационном поле используются как опорные для топографических съемок.

5. Астрономические определения азимутов выполняются для определения дирекционных углов направлений на ориентирные пункты при утрате наружных геодезических знаков.

6. Астрономические определения географических координат являются средствами абсолютного определения положений объектов, движущихся относительно земной поверхности на море и в воздухе.

7. Методы геодезической астрономии применяются в космических исследованиях и космической навигации.

8. Астрономические определения географических координат и азимутов направлений используются в прикладной геодезии для контроля угловых измерений в полигонометрических ходах и других угловых построениях, при эталонировании точных гироскопических приборов, для фиксирования на местности положения меридиана при топографо-геодезическом обеспечении войск.

Методы астрономических определений делятся на *точные* и *приближенные*. Под *точными* понимаются методы, позволяющие при современном состоянии теории геодезической астрономии и ее инструментальной базы получить значения широт, долгот и азимутов направлений с максимально возможной точностью. Современные требования к максимальной точности астрономических определений заключаются в следующем. Средние квадратические погрешности астрономических определений, полученные по внутренней сходимости результатов наблюдений, не должны превышать: по широте $0,3''$, по долготе $0,03^s$, по азимуту $0,5''$. В большом объеме точные астрономические определения выполнялись при создании астрономо-геодезической сети (АГС).

Приближенные методы позволяют определять астрономические координаты с точностью от $1''$ до $1'$, в зависимости от их назначения, применяемых для наблюдений инструментов, используемой методики измерений и обработки. Общими *отличительными особенностями приближенных методов* являются: прямое измерение наблюдаемых величин, небольшое число приемов наблюдений, фиксация моментов наблюдений не точнее 1^s , частое использование в качестве объекта наблюдений Солнца, применение упрощенных методик наблюдений и приближенных формул обработки и т. п.

В приближенных способах астрономических определений существенно упрощаются методика наблюдений светил и их обработка.

Назначение приближенных астрономических определений:

- получение приближенных широт, долгот и азимутов для обработки точных определений;
- ориентировка инструмента для точных астрономических определений;
- развитие и ориентирование геодезических сетей в местной системе координат;
- автономное определение азимутов и дирекционных углов ориентирных направлений;
- контроль угловых измерений в полигонометрических ходах и других угловых построениях;
- эталонирование гироскопических приборов, применяемых в маркшейдерском деле и других инженерных работах.

2.1.2. Астрономо-геодезические уклонения отвесной линии и уравнение Лапласа

Понятие уклонения отвеса является одним из важнейших в высшей геодезии и теории фигуры Земли. Угол между отвесной линией и нормалью к эллипсоиду называется астрономо-геодезическим уклонением отвеса (в геометрическом определении).

Пусть для некоторого пункта М физической поверхности Земли известны его астрономические (ϕ , λ) и геодезические (B , L) координаты. Пересечение отвесной линии с вспомогательной небесной сферой даст направление на астрономический зенит Z_A , а пересечение с небесной сферой нормали к эллипсоиду — направление на геодезический зенит Z_G (рис. 2.1). Здесь направление на полюс мира, параллельное вращению Земли, обозначено буквой P ; начальный меридиан обозначен через PG .

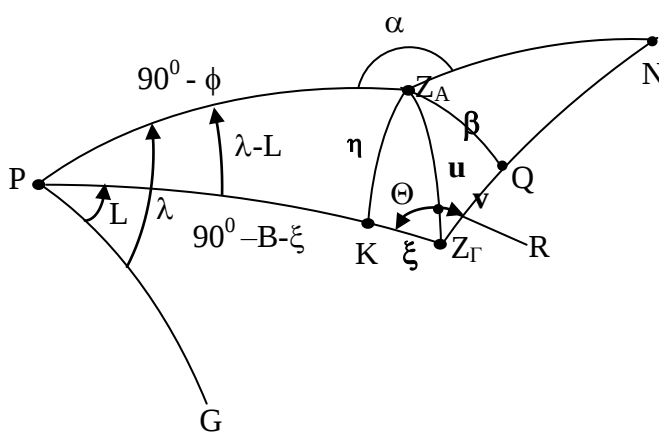


Рис. 2.1. Астрономо-геодезические уклонения отвесной линии

Постулируется, что в астрономической и геодезической системах координат используется одно и то же направление на полюс мира, и что астрономические и геодезические долготы отсчитываются от одного и того же начального меридиана.

Дуги большого круга, образующие треугольник PZ_AZ_Γ , равны:

$$PZ_A = 90^\circ - \phi; \quad PZ_\Gamma = 90^\circ - B,$$

где $Z_AZ_\Gamma = u$ – полное астрономо-геодезическое уклонение отвеса в точке М.

Если провести из Z_A дугу Z_AK , перпендикулярную к следу плоскости геодезического меридиана PZ_Γ , то дуга KZ_Γ , равная ξ , будет *составляющей астрономо-геодезического уклонения отвеса в меридиане*, а дуга KZ_A , равная η , будет *составляющей астрономо-геодезического уклонения отвеса в первом вертикале*.

Из решения прямоугольного сферического треугольника Z_AKP следует:

$$\cos(\lambda - L) = \operatorname{tg} \phi \operatorname{ctg}(B + \xi);$$

$$\sin \eta = \sin(\lambda - L) \cos \phi.$$

Раскладывая входящие в эти формулы тригонометрические функции от η и $(\lambda - L)$ в ряды и пренебрегая по малости квадратами аргументов, получим:

$$\operatorname{tg} \phi = \operatorname{tg}(B + \xi); \quad \eta = (\lambda - L) \cos \phi.$$

Отсюда, заменив с достаточной точностью $\cos \phi$ на $\cos B$, окончательно можно записать:

$$\xi = \phi - B; \quad \eta = (\lambda - L) \cos B. \quad (2.1)$$

Пусть точка N соответствует направлению с пункта М на некоторый соседний пункт N. Геодезический азимут этого направления, согласно обозначениям на рис. 2.1, равен $A = R + \Theta$. Найдем составляющую уклонения отвеса v в направлении на N, для чего спроектируем полное уклонение отвеса u (дугу Z_AZ_Γ) на направление $Z_\Gamma N$. Обозначим через $Z = Z_\Gamma N$ и $z = Z_A N$ соответственно *геодезическое* и *астрономическое зенитные расстояния* для направления MN. Тогда с учетом малости треугольника $Z_AZ_\Gamma Q$ и угла между NZ_Γ и NZ_A получим:

$$v = Z - z = u \cos R = u \cos(A - \Theta) = u \cos A \cos \Theta + u \sin A \sin \Theta.$$

Из решения треугольника $Z_A Z_T K$:

$$\xi = u \cos \Theta;$$

$$\eta = u \sin \Theta.$$

Окончательно получим составляющую уклонения отвеса в направлении азимута A :

$$v = Z - z = \xi \cos A + \eta \sin A.$$

Составляющая уклонения отвеса β в направлении, перпендикулярном к заданному, будет получена заменой в формуле азимута A на $A + 90^\circ$:

$$\beta = \eta \cos A - \xi \sin A.$$

Уклонения отвеса необходимы для установления связи между астрономической и геодезической системами координат, в том числе для перехода от непосредственно измеренного астрономического азимута a к геодезическому A . Связь между этими азимутами определяется уравнением Лапласа:

$$A = a - \eta \operatorname{tg} \phi + (\eta \cos A - \xi \sin A) \operatorname{ctg} z,$$

или, если заменить η согласно формуле (2.1),

$$A = a - (\lambda - L) \sin \phi + (\eta \cos A - \xi \sin A) \operatorname{ctg} z. \quad (2.2)$$

Формула (2.2) получила название *уравнение Лапласа*. Полученный геодезический азимут называют *азимутом Лапласа*, а пункты геодезической сети, на которых произведены точные определения астрономических широт, долгот и азимутов, — *пунктами Лапласа*. Геодезические азимуты сторон триангуляции, полученные из астрономических наблюдений, служат для ориентирования триангуляции и отдельных ее звеньев в единой системе геодезических координат. В то же время они являются средством действенного контроля угловых измерений в астрономо-геодезической сети. Азимуты Лапласа ограничивают, локализуют действие систематических и случайных погрешностей в угловых измерениях, тем самым значительно ослабляя их влияние в обширных геодезических сетях. Поэтому азимуты Лапласа по праву можно назвать угловыми базисами геодезической сети.

Согласно «Инструкции о построении государственной геодезической сети» [6], пункты Лапласа определялись:

- на обоих концах базисных сторон триангуляции 1-го класса в вершинах полигонов (на обоих концах крайних сторон звеньев полигонометрии);

- на промежуточных пунктах рядов триангуляции (полигонометрии) 1-го класса через 70–110 км;

- в сплошных сетях 1-го и 2-го класса – на обоих концах базисной стороны триангуляции (стороны полигонометрии) в середине полигона. Таким образом, в каждом отдельно взятом полигоне 1-го класса минимум 18–20 пунктов Лапласа.

Кроме того, астрономические определения широт и долгот выполнялись на пунктах государственной геодезической сети 1-го и 2-го классов, расположенных на основных линиях астрономо-гравиметрического нивелирования. При плотности детальной гравиметрической съемки 1 пункт на 200 км^2 астрономические определения производились на двух смежных пунктах не реже, чем через 125 км.

2.1.3. Современные задачи и перспективы развития геодезической астрономии

С завершением работ по созданию астрономо-геодезической сети закончился важный этап в развитии геодезической астрономии. Некоторые задачи геодезической астрономии в настоящее время решаются с помощью более эффективных методов космической геодезии. В современных условиях точные астрономические определения необходимы при решении следующих задач.

1. Определение из астрономических наблюдений с ошибкой $0,2''$ составляющих уклонения отвесной линии и изучение полного спектра изменений уклонений отвеса.

2. Осуществление комплекса астрономических определений на пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и астрономо-геодезических обсерваториях [7].

3. Выполнение азимутальных определений с ошибкой $0,15–0,20''$ для ориентирования специальных опорных направлений, элементов радиотехнических измерительных комплексов, изучения современных горизонтальных движений земной коры на геодинамических полигонах.

Остаются актуальными приближенные определения астрономических азимутов направлений для решения различных прикладных задач (автономное определение азимутов и дирекционных углов ориентирных направлений, эталонирование гироскопических приборов,

ориентировка астроархеологических памятников по астрономическому азимуту и др.).

Следует особо подчеркнуть важность разработок по *приборному обеспечению* всех перечисленных выше задач, по *автоматизации астрономических наблюдений и их обработки* (как в точных, так и в приближенных способах). Например, это фотоэлектрическая регистрация звездных прохождений, применение ПЗС-матриц [8], автоматизация отсчетных устройств теодолитов и приборов для измерения и регистрации времени, использование электронных уровней, компьютерная обработка измерений.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение уклонения отвеса и его составляющих (в меридиане и первом вертикале).
2. Где в настоящее время применяются результаты астрономических определений?
3. Азимут Лапласа: определение; назначение.
4. С какими разделами астрономии связана геодезическая астрономия?

2.2. Теория методов геодезической астрономии

2.2.1. Общие принципы определения географических координат и азимутов направлений из наблюдений светил

Из геометрии небесной сферы следует, что географическая широта ϕ , направление меридиана NS и местное звездное время s в некоторый момент наблюдения T в каком-либо пункте земной поверхности могут быть определены, если для этого момента определено положение зенита Z на небесной сфере (рис. 2.2). Первая теорема сферической астрономии гласит: *высота полюса Мира равна широте места наблюдения и равна склонению зенита,*

$$h_p = \phi = \delta_z.$$

Следовательно, чтобы найти широту места наблюдения, достаточно определить *склонение зенита* δ_z . По второй теореме сферической астрономии *разность долгот равна разности местных времен*, т. е.

$$\lambda_1 - \lambda_2 = s_1 - s_2,$$

где местное звездное время равно *прямому восхождению зенита*, $s = \alpha_z$. Направление небесного меридиана и полуденной линии, необ-

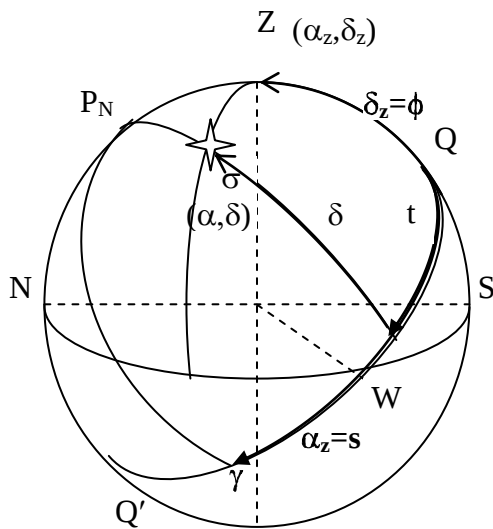


Рис. 2.2. Принципы определения географических координат

В зависимости от измеряемых величин все способы астрономических определений географических координат делятся на две основные группы: *зенитальные* и *азимутальные*.

В *зенитальных* способах широта и время (долгота) определяются по измеренным зенитным расстояниям светил, или по разностям зенитных расстояний светил, или из наблюдений групп звезд на одинаковом зенитном расстоянии.

Азимутальные способы астрономических определений позволяют определять время и широту по азимутам двух звезд, или по измеренным разностям азимутов звезд, или по наблюдениям групп звезд в одном вертикале.

В геодезической астрономии горизонтальные координаты светил (A, Z) считаются *измеряемыми*, экваториальные координаты светил (α, δ) – *известными*, а географические координаты пункта наблюдения и азимут направления (ϕ, λ, a) – *определяемыми*. Связь между определяемыми, известными и измеряемыми величинами осуществляется через решение *параллактического треугольника*. Выражение

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \quad (2.3)$$

есть формула связи зенитальных способов астрономических определений, а выражение

$$\operatorname{ctg} A = \sin \phi \operatorname{ctg} Z - \operatorname{tg} \delta \cos \phi / \sin t \quad (2.4)$$

есть формула связи азимутальных способов астрономических определений.

В формулах (2.3), (2.4) часовой угол есть

$$t = T_{\text{н}} + u - \alpha,$$

где $T_{\text{н}}$ – момент наблюдения, u – поправка часов.

Принцип определения азимута направления на земной предмет следует из рис. 2.3:

$$a = A + Q,$$

где $Q = M - M^*$ – измеренный горизонтальный угол светила, равный разности отсчетов по горизонтальному кругу на земной предмет M и на светило M^* ;

A – азимут светила, вычисляемый по формуле (2.4). Для его вычисления надо отнаблюдать в момент $T_{\text{н}}$ светило с известными координатами (α, δ) , причем поправка часов u в этот момент и широта места наблюдения ϕ должны быть известны.

В рассматриваемом способе азимут светила A и горизонтальный угол Q постоянно меняются вследствие суточного движения небесной сферы. Это обстоятельство затрудняет контроль ошибок измерений и вычислений, поэтому данный подход применим только в *приближенных способах* астрономических определений.

От недостатка такого подхода избавлен следующий принцип определения азимута направления на земной предмет:

$$a = M - M_{\text{N}}, \quad (2.5)$$

где M_{N} – отсчет по горизонтальному кругу северного направления меридиана, называемый местом Севера. Место Севера определяется

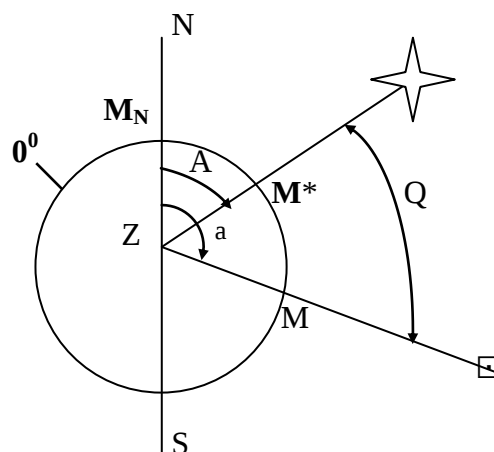


Рис. 2.3. Определение азимута направления на земной предмет

из уравнивания наблюдений. Суточное движение небесной сферы не изменяет M_N и отсчет по горизонтальному кругу на земной предмет M , поэтому здесь возможен контроль измерений и вычислений. Формула определения азимута (2.5) используется в *точных способах* астрономических определений.

2.2.2. Выгоднейшие условия определения времени и широты в зенитальных способах астрономических определений

Выгоднейшими условиями наблюдений называются условия, при которых для данных средств измерений достигается максимальная точность определяемых величин.

На результаты измерения зенитного расстояния Z светила влияют случайные и систематические ошибки ΔZ ; момент T наблюдения светила определяется с ошибкой ΔT , содержащей также случайную и систематическую части. Широта и долгота пункта наблюдения известны или определяются с некоторыми ошибками $\Delta \phi$ и $\Delta \lambda$. Также содержат ошибки $\Delta \alpha$, $\Delta \delta$ экваториальные координаты α и δ наблюдаемых звезд.

При соблюдении выгоднейших условий влияние этих ошибок на вычисление определяемой величины минимально.

После дифференцирования формулы (2.3) получим:

$$-\sin Z dZ = (\cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \cos t) d\phi + (\sin \phi \cos \delta - \cos \phi \sin \delta \cos t) d\delta - \cos \phi \cos \delta \sin t (dT + du - d\alpha).$$

Из параллактического треугольника имеем:

$$-\sin Z \cos A = \cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \cos t;$$

$$\sin Z \sin A = \cos \delta \sin t;$$

$$\sin Z \cos q = \sin \phi \cos \delta - \cos \phi \sin \delta \cos t.$$

Сокращая полученные равенства на $\sin Z$, найдем выражение для дифференциала зенитного расстояния:

$$dZ = \cos A d\phi + \cos \phi \sin A (dT + du - d\alpha) - \cos q d\delta. \quad (2.6)$$

Решая уравнение (2.6) последовательно относительно $d\phi$ и du , а затем, заменяя дифференциалы конечными разностями ΔZ , $\Delta \phi$, ΔT , Δu при условии, что координаты звезды безошибочны ($d\alpha = 0$ и $d\delta = 0$),

получим дифференциальные формулы ошибки широты и поправки часов:

$$\Delta\phi = \Delta Z / \cos A - 15 \cos \phi \operatorname{tg} A (\Delta T + \Delta u); \quad (2.7)$$

$$\Delta u = -\Delta T + (\Delta Z / (\cos \phi \sin A) - \Delta\phi / (\cos \phi \operatorname{tg} A)) / 15. \quad (2.8)$$

Анализ формулы (2.7) позволяет сделать вывод, что *выгоднейшими условиями для определения широты ϕ по измеренным зенитным расстояниям являются наблюдения их в меридиане*, т. е. когда азимут равен 0° или 180° . В меридиане ошибки момента наблюдения ΔT и поправки часов Δu не сказываются на определении широты, и ошибка в широте равна ошибке измерения зенитного расстояния. При наблюдении звезды к югу от зенита $\Delta\phi_S = \Delta Z_S$, к северу – $\Delta\phi_N = -\Delta Z_N$. Следовательно, при наблюдении звезд парами симметрично относительно зенита систематические ошибки измеренного зенитного расстояния будут компенсироваться. Наивыгоднейшим условиям определения широты по измеренным зенитным расстояниям удовлетворяет *способ Талькотта*.

Получим выгоднейшие условия определения долготы по измеренным зенитным расстояниям светил. Из анализа формулы (2.8) следует, что *влияние ошибок $\Delta\phi$ и ΔZ на определение долготы будет минимальным в первом вертикале* ($A = 90^\circ$ или $A = 270^\circ$).

При наблюдении западной звезды $\Delta u_W = -\Delta T_W + \Delta Z_W / \cos \phi$, восточной – $\Delta u_E = -\Delta T_E + \Delta Z_E / \cos \phi$, т. е. при наблюдении звезд в первом вертикале парами симметрично относительно зенита ошибки измерения зенитного расстояния будут компенсироваться. Наивыгоднейшим условиям определения долготы по измеренным зенитным расстояниям удовлетворяет *способ Цингера*.

2.2.3. Выгоднейшие условия определения азимута, времени и широты в азимутальных способах астрономических определений

Для обоснования выгоднейших условий определения координат используется формула связи азимутальных способов астрономических определений:

$$\operatorname{ctg} A \sin t - \sin \phi \cos t + \operatorname{tg} \delta \cos \phi = 0. \quad (2.9)$$

Дифференцируя формулу (2.9) по переменным A , ϕ и t , заменяя дифференциалы dA , $d\phi$ и dt ошибками ΔA , $\Delta\phi$ и Δt , получаем выражение для ошибки азимута:

$$\Delta A = \cos q \cos \delta (\Delta T + \Delta u) / \sin Z - \sin A \Delta\phi / \operatorname{tg} Z. \quad (2.10)$$

Минимальное значение коэффициентов при $(\Delta T + \Delta u)$ и $\Delta\phi$ бывает при наблюдении *близполюсных звезд*, у которых $\delta \approx 90^\circ$, а $A \approx 180^\circ$. Этим условиям удовлетворяет Полярная звезда. Если выбирать звезды по зенитным расстояниям, то *влияние ошибок на определение азимута будет минимально на горизонте*. Поэтому при определении азимута по Солнцу выгоднейшие условия для наблюдений будут при восходе и заходе Солнца.

Выгоднейшие условия определения долготы (времени) в азимутальных способах определяются из анализа формулы для Δu , выведенной из выражения (2.10):

$$\Delta u = -\Delta T + \sin Z \Delta A / \cos \delta \cos q - \cos Z \sin A \Delta\phi / \cos \delta \cos q. \quad (2.11)$$

Из формулы (2.11) следует, что *время (долготу) выгоднее всего определять из наблюдения звезд в меридиане, парами, симметрично относительно зенита, на небольших зенитных расстояниях*.

Аналогично можно определить выгоднейшие условия определения долготы в азимутальных способах, из анализа формулы

$$\Delta\phi = -\cos \delta \cos q (\Delta u + \Delta T) / \cos Z \sin A + \operatorname{tg} Z \Delta A / \sin A. \quad (2.12)$$

Из выражения (2.12) следует, что для *определения широты азимутальными способами необходимо наблюдать звезды в первом вертикале, парами, симметрично относительно зенита, на малых зенитных расстояниях*.

Контрольные вопросы

1. Какие теоремы сферической астрономии положены в основу определения астрономических широт и долгот пунктов?
2. Каковы выгоднейшие условия расположения звезд при совместном определении широты и долготы по измеренным зенитным расстояниям?
3. Каковы выгоднейшие условия расположения звезд при совместном определении широты и долготы по измеренным горизонтальным направлениям?

4. Две основные группы способов астрономических определений.

5. Какой минимум звезд надо отнаблюдать для определения широты и долготы: а) при измерении зенитного расстояния; б) при измерении горизонтального направления; в) при совместном измерении зенитного расстояния и горизонтального направления?

2.3. Приборное обеспечение в геодезической астрономии

2.3.1. Особенности приборного обеспечения в геодезической астрономии

Приборное обеспечение в геодезической астрономии вытекает из следующих *особенностей астрономических наблюдений*:

а) наблюдения подвижных светил. Сопровождаются отсчетами по часам в определенной системе времени, для чего должна быть организована служба времени. Точные астрономические определения требуют соответствующей методики наблюдения за подвижными объектами и фиксации моментов их прохождений;

б) наблюдения звезд на малых зенитных расстояниях. Требуется соответствующая конструкция зрительной трубы астрономического теодолита (ломаная труба либо различного вида призмы-насадки на окуляр). Повышаются требования к учету наклона горизонтальной оси трубы теодолита при измерении горизонтальных направлений;

в) наблюдения сквозь атмосферу, использование значительной части поля зрения трубы при наблюдениях, а не только центра, как при геодезических наблюдениях. Здесь повышаются требования к оптике инструмента, а также возникает необходимость учета рефракции;

г) для ночных наблюдений нужна подсветка отсчетных устройств и поля зрения трубы теодолита, для наблюдений Солнца необходим плотный светофильтр.

Полевой комплект аппаратуры для астрономических определений географических координат и азимута включает в себя:

- астрономический теодолит для угловых измерений;
- хронометр (часы) для фиксации моментов прохождений звезд;
- приборы для регистрации результатов наблюдений;
- радиоприемник для приема сигналов точного времени и определения поправки часов;
- термометр, барометр для вычисления поправки за рефракцию в точных способах астрономических определений;
- батареи или аккумулятор для подсветки.

2.3.2. Астрономические теодолиты

Специфическими особенностями современного астрономического теодолита по сравнению с точными геодезическими угломерными приборами являются:

- ломаная центральная труба, позволяющая выполнять наблюдения светил практически на любых видимых зенитных расстояниях;
- улучшенная оптика;
- наличие точных уровней. Астрономические теодолиты имеют, как правило, три точных уровня: накладной на горизонтальную ось трубы для определения ее наклона; накладной на раму микроскопов вертикального круга при измерении зенитных расстояний; талькоттовский уровень, скрепляющийся с горизонтальной осью трубы, для фиксации малых изменений положения трубы по высоте;
- сетка нитей, состоящая из 7–9 равноотстоящих параллельных нитей и перпендикулярного к ним подвижного биссектора окулярного микрометра – для измерения малых угловых расстояний в поле зрения трубы теодолита. Для наблюдений Солнца может применяться специальная сетка нитей в виде круга в центре;
- электроосвещение поля зрения трубы и отсчетных устройств для выполнения ночных наблюдений;
- приборы для полуавтоматических (или автоматических) наблюдений моментов прохождений звезд.

В настоящее время применяются: АУ 2/10 (СССР, с 30-х гг. XX в.), Вильд Т-4 («Вильд», Швейцария, с 40-х гг. XX в.), ДКМЗ-А («Керн-Аарау», Швейцария), АУ01 (Россия, ЦНИИГАиК, с середины 80-х гг. XX в.).

Для приближенных астрономических определений используются оптические теодолиты средней точности, такие, как отечественные теодолиты Т2, 2Т2, выпускаемый фирмой «Карл Цейсс», Германия, Theo 01, и др. Эти инструменты снабжаются дополнительным комплектом деталей и приборов, позволяющими выполнять астрономические определения.

2.3.3. Приборы для измерения и регистрации времени

Для астрономических определений в геодезической астрономии используются механические хронометры, кварцевые часы, двухстрелочные секундомеры, карманные часы повышенной точности. Для

определения времени можно также использовать показания спутникового навигационного приемника, при условии наблюдения спутников с него. Для часов должны быть определены их поправка и ход.

Поправкой часов u в некоторый момент называется разность между временем в принятой системе отсчета и показанием хронометра T в этот момент. Поправка часов относительно времени начального меридиана (всемирного или гринвичского звездного времени) производится из приема радиосигналов точного времени:

$$u = UTC - T,$$

где UTC – всемирное координированное время, получаемое из радиосигналов точного времени.

Поправка часов не остается постоянной, а изменяется с течением времени. Изменение поправки часов за единицу времени называется *ходом часов*. Для определения среднего значения хода хронометра w в интервале времени от T_1 до T_2 нужно знать поправки часов u_1 и u_2 в эти моменты. Тогда ход хронометра определится формулой:

$$w = (u_2 - u_1) / (T_2 - T_1).$$

Качество хронометра определяется не величиной его хода, а колебаниями хода с течением времени. Лучшим хронометром считается тот, у которого ход остается постоянным или изменяется в незначительных пределах. Если ход хронометра w известен, то, полагаясь на его постоянство в течение некоторого промежутка времени $(T_2 - T_1)$ и зная поправку u_1 для момента T_1 , можно найти поправку u для любого другого момента T в пределах данного промежутка:

$$u = u_1 + w(T - T_1).$$

Контрольные вопросы

1. Особенности наблюдений в геодезической астрономии.
2. Отличия астрономических теодолитов от геодезических.
3. Что такое окулярный микрометр?
4. Почему наблюдения светил сопровождаются отсчетами по часам?
5. Состав аппаратуры для астрономических определений.
6. Как определяются поправка и ход часов?

2.4. Особенности наблюдения светил в геодезической астрономии. Редукции астрономических наблюдений

2.4.1. Методы визирования светил

В каждой точке земной поверхности горизонтальные координаты светила (зенитное расстояние и азимут) не остаются постоянными, а изменяются со временем вследствие суточного вращения небесной сферы. Следовательно, горизонтальные координаты каждого светила представляются некоторыми функциями времени.

Определение таких координат с помощью астрономических инструментов может дать в каждом случае только мгновенное их значение. Поэтому все наблюдения, производимые для этой цели, обязательно должны сопровождаться регистрацией времени.

В астрономии существуют *два метода визирования светил*:

- *метод наведения* горизонтальной нити (в зенитальных способах) или вертикальной нити (в азимутальных способах) на светило с отсчетом по часам;

- *метод звездных прохождений* через вертикальные или горизонтальные нити установленной неподвижно трубы прибора с фиксацией моментов прохождения светила через эти нити, с измерением малых углов в поле зрения трубы с помощью *окулярного микрометра*.

В первом случае труба прибора перемещается следом за движением светила, во втором – неподвижна. В точных способах астрономических определений при измерении горизонтальных координат используется метод звездных прохождений.

Кроме особенностей, связанных с методикой визирования, есть особенности, связанные с учетом различных приборных погрешностей, влияния внешней среды и личных погрешностей наблюдателя.

2.4.2. Поправки в измеренные зенитные расстояния

Поправка за место зенита

В теодолитах, используемых для астрономических определений, могут измеряться как зенитные расстояния, так и высота. Измерения вертикальных углов, выполненные при одном круге, следует исправлять *за место зенита* (или место нуля). Место зенита M_z есть отсчет по вертикальному кругу, когда визирная ось трубы направлена точно в зенит (совпадает с отвесной линией).

Обозначив отсчет при визировании на предмет для круга «лево» через L , а для круга «право» – через R , получим:

$$Z = L - Mz = Mz - R,$$

откуда следует

$$Z = (L - R) / 2 \text{ и } Mz = (L + R) / 2.$$

Теодолиты с компенсатором угла наклона свободны от влияния места зенита (нуля). В электронных теодолитах можно установить несколько вариантов отсчета по вертикальному кругу; место зенита здесь автоматически приводится к нулю после калибровки.

Поправка в измеренное зенитное расстояние за наклон оси уровня

При вычислении зенитного расстояния необходимо исправлять отсчеты вертикального круга *за наклон его алидады*, который вычисляется по показаниям концов пузырька уровня. Нулевая линия алидады вертикального круга при движении трубы не остается в постоянном положении относительно отвесной линии, а изменяется при каждом новом наведении. Нормальным положением этой линии считается то, при котором пузырек уровня находится точно на середине ампулы уровня; к такому его положению должны быть приведены все отсчеты вертикального круга.

Отсчет по лимбу при круге лева, исправленный за угол наклона i :

$$L = L_{\text{изм}} + i.$$

Наклон оси уровня определяется по отсчетам концов пузырька уровня, в делениях шкалы уровня. При обработке результатов наблюдений наклон оси уровня выражают в секундах дуги:

$$i'' = \tau'' i^{\text{дел.}},$$

где τ'' – цена деления уровня в секундах дуги.

Поправка в измеренное зенитное расстояние за рефракцию

Для учета влияния астрономической рефракции во время наблюдений необходимо измерять температуру воздуха и атмосферное дав-

ление. *Поправка в зенитное расстояние за рефракцию* вычисляется по формуле

$$\rho = 21,67'' B \operatorname{tg} Z' / (273 + t^{\circ}\text{C}), \quad (2.13)$$

где B – давление, мм рт. ст.;

t – температура, $^{\circ}\text{C}$;

Z' – измеренное зенитное расстояние.

В приближенных способах астрономических определений (точность грубее $1''$) можно использовать формулу *средней рефракции*:

$$\rho_0 = 60,3'' \operatorname{tg} Z'.$$

Согласно Инструкции о построении ГГС, разрешено производить измерения для астрономических определений 1-го класса при зенитных расстояниях $0^{\circ} < z < 50^{\circ}$, для приближенных способов – при зенитных расстояниях $0^{\circ} < z < 80^{\circ}$, ввиду больших погрешностей вычисления рефракции вблизи горизонта.

Зенитное расстояние, исправленное за рефракцию, определяется по формуле:

$$Z = Z' + \rho.$$

Поправка в измеренное зенитное расстояние за суточный параллакс Солнца

При измерении зенитных расстояний Солнца необходимо учитывать его *параллакс* по формуле:

$$Z_{\text{геоц}} = Z_{\text{топ}} - P_0 \sin Z_{\text{топ}},$$

где $Z_{\text{геоц}}$ – геоцентрическое зенитное расстояние; $Z_{\text{топ}}$ – топоцентрическое зенитное расстояние; P_0 – экваториальный параллакс Солнца, публикуемый на дату в Астрономическом Ежегоднике. Для приближенных способов астрономических определений можно принять $P_0 = 8,8''$.

2.4.3. Поправки в измеренные горизонтальные направления

В азимутальных способах астрономических определений измеряемыми величинами являются горизонтальные направления на светило. Особенностью измерений является то, что наблюдения светил

*Влияние наклона горизонтальной оси теодолита
на измеренные горизонтальные направления*

$$x = b \operatorname{ctg} Z.$$

Если для наблюдателя, обращенного лицом к светилу σ , правый конец горизонтальной оси HH' будет выше левого (см. рис. 2.4), то

$$L = L' - b \operatorname{ctg} Z.$$

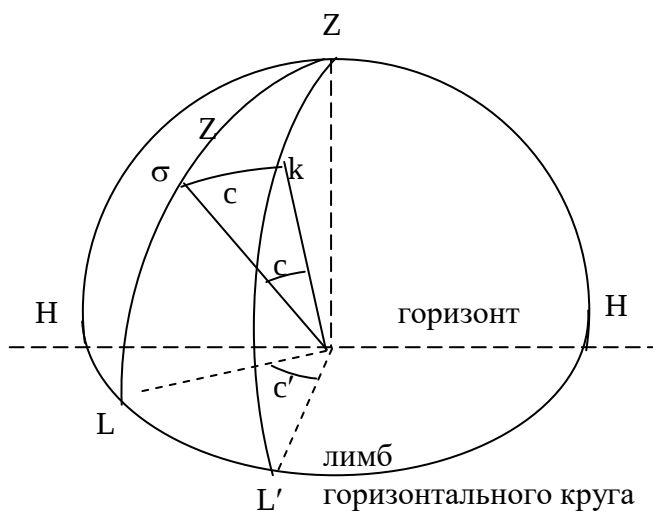
Если правый конец будет ниже левого, то

$$L = L' + b \operatorname{ctg} Z.$$

Наклон горизонтальной оси теодолита b определяется по показаниям концов пузырька уровня (либо накладного на цапфы у астрономических универсалов, либо при горизонтальном круге у обычных теодолитов) при двух положениях уровня.

Влияние коллимационной ошибки на измеренное горизонтальное направление

При отсутствии коллимационной ошибки $c = \sigma k = 0$ (рис. 2.5) на лимбе горизонтального круга будет прочитан правильный отсчет L . При наличии ошибки $c \neq 0$ на горизонтальном лимбе будет прочитан отсчет L' . Из треугольника $Z\sigma k$:



$$\sin c = \sin (L - L') \sin Z.$$

Из-за малости c и $(L - L')$ можно записать:

$$L - L' = c \operatorname{cosec} Z,$$

отсюда

$$L = L' + c \operatorname{cosec} Z.$$

Рис. 2.5. Влияние коллимационной ошибки на измеренное горизонтальное направление:
 L – отсчет при $c = 0$; L' – отсчет при $c \neq 0$

При наблюдениях, выполненных при разных положениях вертикального круга прибора, коллимационная ошибка определяется по формулам:

$$L = L' - c \operatorname{cosec} Z_R \text{ — при круге «лево»,}$$

$$R = R' + c \operatorname{cosec} Z_L \text{ — при круге «право»}.$$

Среднее значение наблюдаемого горизонтального направления:

$$N' = (L + (R \pm 180^\circ))/2 = (L' + (R' \pm 180^\circ))/2 + c(\operatorname{cosec} Z_R - \operatorname{cosec} Z_L)/2.$$

При наблюдении земного предмета, где $\operatorname{cosec} Z_R = \operatorname{cosec} Z_L = 1$:

$$N' = (L' + (R' \pm 180^\circ)) / 2,$$

а значение коллимационной ошибки:

$$c = (L' - (R' \pm 180^\circ)) / 2.$$

Если $Z_R = Z_L$, то влияние коллимационной ошибки полностью исключается.

Поправка в азимут светила за влияние суточной аберрации

Из теории суточной аберрации известно, что под ее влиянием светила смещаются к точке востока на величину дуги:

$$\sigma\sigma' = 0,32'' \cos \phi \sin \sigma E.$$

Влияние аберрации на азимут вычисляется по формуле:

$$\delta A = A_N - A'_N = 0,32'' \cos \phi \cos A'_N \operatorname{cosec} Z.$$

Для Полярной звезды можно принять $\cos A'_N = 1$, тогда

$$A_N = A'_N + 0,32'' \cos \phi \operatorname{cosec} Z.$$

Для Солнца, наблюдаемого вблизи горизонта, недалеко от первого вертикала, $\cos A_N = 0$ и $A_N = A'_N$.

Влияние бокового гнутия трубы

Под *боковым гнутием трубы теодолита* понимают боковое смещение визирной оси с изменением зенитных расстояний светил. Это смещение может быть обусловлено несовершенством крепления частей оптической системы в трубе, температурным влиянием на отдельные части оптической системы и различным действием силы тяжести на отдельные части оптической системы при различных положениях трубы по высоте.

Суммарное действие перечисленных факторов на боковое смещение визирной оси проявляется в изменении коллимационной

ошибки и влияет на измеренное горизонтальное направление пропорционально $\operatorname{cosec} Z$, т. е.

$$\Delta N = \Delta\beta \operatorname{cosec} Z,$$

где $\Delta\beta$ определяется из специальных исследований при помощи автоколлимационной насадки ЦНИИГАиК. Абсолютная величина бокового гнута трубы не превышает нескольких десятых долей секунды дуги.

Влияние погрешности форм цапф горизонтальной оси

В идеальном астрономическом инструменте, имеющем горизонтальную ось, цапфы должны иметь одинаковые диаметры, а в сечении их плоскостью, проходящей через центр цапфы перпендикулярно горизонтальной оси вращения, будет получаться окружность. В действительности этого не происходит из-за неравенства и неправильностей цапф. Наличие неправильностей цапф приводит к тому, что при перемещении трубы по высоте визирная ось опишет на небесной сфере не окружность, а сложную кривую, что внесет ошибки в измеренные горизонтальные направления на светила.

Неправильности цапф необходимо тщательно исследовать, а результаты наблюдений исправлять соответствующими поправками. Наиболее эффективным средством, которое используется в практике обеспечения полевых астрономических определений, является эталонирование на азимутальном стенде.

Контрольные вопросы

1. Методы визирования светил. Почему метод наведения не используется в точных способах астрономических определениях?
2. Поправки в измеренные зенитные расстояния и горизонтальные направления. Какие поправки необходимо учитывать, а какими можно пренебречь в приближенных способах астрономических определений (погрешность $1'$)?
3. Почему наблюдение светил при двух кругах не свободно от влияния рефракции?

2.5. Понятие о точных способах астрономических определений

2.5.1. Определение широты по измеренным малым разностям зенитных расстояний пар звезд в меридиане (способ Талькотта)

Идея способа Талькотта принадлежит датскому астроному П. Горребоу (1740 г.), а практическая разработка способа и первые наблюдения выполнены американским геодезистом А. Талькоттом в 40–50-х гг. XIX в.

Здесь наблюдаются пары звезд в меридиане, на близких зенитных расстояниях. Способ Талькотта удовлетворяет наивыгоднейшим условиям определения широты по измеренным зенитным расстояниям светил. Формулы вычисления широты для наблюдения северной (N) и южной (S) звезд в меридиане записываются в виде:

$$\phi = \delta_S + Z_S; \quad \phi = \delta_N - Z_N.$$

Отсюда широта вычисляется как

$$\phi = \frac{1}{2} (\delta_S + \delta_N) + \frac{1}{2} (Z_S - Z_N).$$

Измерение разностей зенитных расстояний выполняется в поле зрения трубы теодолита с помощью окулярного микрометра, без отсчетов по лимбу вертикального круга. Для фиксирования положения трубы по высоте, с ней жестко скрепляется *талькоттовский уровень*, ось которого лежит в плоскости, параллельной плоскости вертикального круга. Применение талькоттовского уровня позволяет учитывать малейшие изменения трубы по высоте.

Измеренная полуразность зенитных расстояний вычисляется по формуле:

$$\frac{1}{2}(Z_S - Z_N)_{\text{изм}} = \frac{1}{2} (M_S - M_N)R + (i_S - i_N) \tau/4 + \frac{1}{2}(\rho_S - \rho_N),$$

где M_S, M_N – отсчеты по шкале микрометра, в делениях;

R – цена деления окулярного микрометра, в ";

i_S, i_N – наклоны оси Талькоттовского уровня, в делениях;

τ – цена деления Талькоттовского уровня, в ";

ρ_S, ρ_N – поправки за рефракцию.

2.5.2. Способы определения широты и долготы из наблюдений звезд на равных высотах (способы равных высот)

В данной группе способов звезды в сериях или в парах наблюдаются на равных высотах, в связи с чем возникают некоторые особенности в методике наблюдений зенитных расстояний светил. Труба ставится на данное зенитное расстояние по отсчету вертикального лимба L_0 (с точностью $1-2''$), который будет одним и тем же для всех наблюдаемых звезд. В этом положении труба теодолита закрепляется зажимным винтом. С трубой теодолита жестко скрепляется талькоттовский уровень, по отсчетам которого можно судить об отклонениях трубы по высоте при изменении положения верхней части теодолита по азимуту. При этом условно полагают, что в течение ограниченного времени внешние условия (температура, давление, влажность), а также взаимное положение частей прибора остаются практически неизменными.

Для любой звезды, наблюдаемой на данной высоте, значение измеренного зенитного расстояния можно представить в виде:

$$Z_{\text{изм}} = L_0 + \Delta L - (Mz + \Delta Mz) + i \tau / 2 + \rho,$$

где L_0 – истинная поправка отсчета по вертикальному лимбу;

Mz – место зенита;

ΔMz – неучтенное влияние места зенита;

i – наклон оси Талькоттовского уровня, в делениях;

τ – цена деления Талькоттовского уровня;

ρ – поправка за рефракцию.

Обозначим через *установочное (эфемеридное) зенитное расстояние* величину:

$$Z_{\text{эф}} = L_0 - Mz.$$

Совокупность постоянных для данного зенитного расстояния величин обозначим через ζ' :

$$\zeta' = \Delta z_{\text{const}} = \Delta L - \Delta Mz + \rho.$$

Выражение для измеренного зенитного расстояния запишется в виде:

$$Z_{\text{изм}} = Z_{\text{эф}} + \zeta' + i \tau / 2.$$

Поправка к установочному (эфемеридному) зенитному расстоянию находится из совместной обработки наблюдений звезд на данной высоте.

При наблюдениях светил на равных высотах отпадает необходимость производства точных отсчетов по вертикальному лимбу или окулярному микрометру. Это обстоятельство позволяет применить для точных определений широты и времени (долготы), наряду с астрономическим теодолитом, специальные приборы, в которых вертикальный круг либо совсем отсутствует (призменная астролябия), либо имеется грубый круг-искатель, необходимый только для ориентировочной установки трубы на данное зенитное расстояние (зенит-телескоп).

При выполнении наблюдений звезд на равных высотах из результатов определений широты и долготы исключается систематическое влияние погрешностей рефракции, гнущия трубы прибора, а также погрешностей, связанных с отсчетами по лимбу.

Определение долготы из наблюдений пар звезд на равных высотах (способ Цингера)

Всестороннее исследование и разработку способа выполнил адъютант-астроном Пулковской обсерватории Н.Я. Цингер в 1874 г. *Способ Цингера* удовлетворяет наивыгоднейшим условиям определения долготы по измеренным зенитным расстояниям светил и относится к группе способов равных высот.

Определение времени (долготы) основано на регистрации моментов прохождений пар звезд через один и тот же альмукантарат. Учет изменения трубы по высоте выполняется с помощью талькоттовского уровня.

В способе Цингера звезды наблюдаются парами вблизи первого вертикала, симметрично относительно зенита. Удаление от первого вертикала с соблюдением условий симметричности – не более 30° , средние зенитные расстояния пар – от 20° до 50° . Способ Цингера применим до широт 65° – 70° .

Определение широты из наблюдений пар звезд на равных высотах (способ Певцова)

Первое обстоятельное исследование способа в теоретическом и практическом отношении было сделано русским военным геодезистом М.В. Певцовым в 1887 г.

Согласно выгоднейшим условиям определения широты по измеренным зенитным расстояниям пары звезд следует выбирать вблизи меридиана, на угловых удалениях от него от 10° до 40° . Зенитные расстояния звезд должны заключаться в пределах от 15° до 60° .

При наблюдениях фиксируются моменты прохождения звезд и показания талькоттовского уровня.

2.5.3. Определение астрономического азимута направления на земной предмет по наблюдениям Полярной

Способ определения астрономического азимута по Полярной звезде принят как *основной способ определения точных азимутов* в астрономо-геодезической сети. Он обладает рядом *преимуществ* перед другими способами:

- яркая Полярная звезда является незаходящей звездой практически для всего северного полушария. Ее можно наблюдать как ночью, так и днем относительно малыми переносными приборами;

- погрешности определения времени и широты не оказывают существенного влияния на точность определения астрономического азимута Полярной звезды, следовательно, и азимута направления на земной предмет;

- способ достаточно прост в наблюдениях и вычислениях.

С другой стороны, способ обладает и *недостатками*:

- средняя квадратическая погрешность определения азимута по Полярной возрастает с широтой пропорционально $\sec \varphi$. В связи с этим способ применим в северном полушарии для широт от 10° до 60° ;

- так как зенитное расстояние Полярной для данного пункта меняется в незначительных пределах, то инструментальные погрешности будут иметь систематический характер.

Определения астрономического азимута направления производят как днем, так и ночью при наличии благоприятных условий для наблюдений земного предмета. Дневные наблюдения рекомендуется прекращать за полчаса до захода Солнца, а ночные начинать спустя полчаса после его захода. Азимут определяют 18 приемами с перестановкой горизонтального круга между приемами через $10^\circ 05'$. Для ослабления погрешностей, связанных с влиянием внешних условий, программа определения азимута должна выполняться в течение не менее чем трех суток.

Для определения поправки хронометра и его хода принимают радиосигналы времени через такие интервалы, которые обеспечивают вывод поправки с погрешностью, не превышающей 0,1 с. Наблюдения азимута должны быть заключены между приемами сигналов времени.

При наблюдениях берутся отсчеты по горизонтальному кругу, окулярному микрометру, накладному уровню и хронометру.

Азимут направления на земной предмет вычисляется по формуле (2.5), используемой в точных способах астрономических определений. При окончательных вычислениях астрономический азимут приводится к среднему полюсу.

Контрольные вопросы

1. Назначение уровня Талькотта.
2. Сущность способов равных высот и их преимущества.
3. Перечислите точные способы определения широты, долготы и азимута направления.
4. Достоинства и недостатки способа определения точного азимута по наблюдению Полярной.
5. Почему точный азимут по Полярной определяют в течение нескольких дней и в различное время суток?

2.6. Приближенные способы астрономических определений

2.6.1. Приближенные определения азимута земного предмета по наблюдениям Полярной

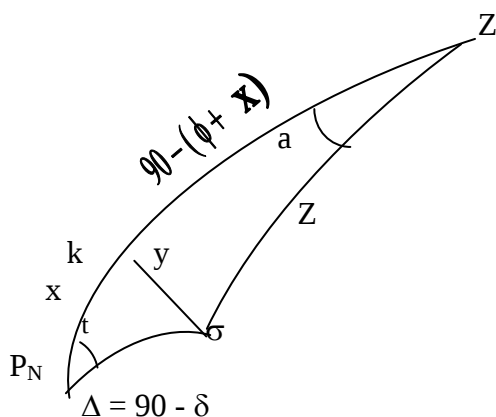
Азимут направления на земной предмет $a_{зп}$ в приближенном способе определяется как

$$a_{зп} = A + Q,$$

где A – вычисленный азимут Полярной звезды; Q – измеренный горизонтальный угол.

Азимут Полярной можно вычислить по точной формуле связи азимутальных способов (2.4) либо по приближенной формуле. Для вывода приближенной формулы рассмотрим узкий параллактический треугольник (рис. 2.6).

Опустим из Полярной на меридиан сферический перпендикуляр σk . Малый прямоугольный треугольник $P_N k \sigma$ можно считать плоским, для него справедливы соотношения:



$$x = \Delta \cos t, y = \Delta \sin t,$$

где $t = s - \alpha = T_H + u - \alpha$.

Из прямоугольного треугольника $k \sigma Z$

$$\cos(\phi + x) = \operatorname{ctg}(180^\circ - A) \operatorname{tg} y$$

или, обозначая $a = 180^\circ - A$, получим:

$$a = y \sec(\phi + x) = \Delta \sin t \sec(\phi + x).$$

Рис. 2.6. Определение азимута земного предмета по наблюдению Полярной

В узком треугольнике $k \sigma Z$, из-за малости угла a , $kZ \approx \sigma Z$:

$$Z \approx (90^\circ - \phi) - x \text{ и } a = \Delta \sin t \operatorname{cosec} Z.$$

Приближенную формулу вычисления азимута Полярной часто используют для составления *эфемерид Полярной*.

Таким образом, чтобы определить азимут направления на земной предмет по наблюдению Полярной, необходимо определить момент наблюдения Полярной T_H , а также измерить горизонтальный угол Q между направлениями на Полярную и земной предмет. Здесь необходимо знать поправку часов u с точностью до 1^m и широту ϕ до $1'$. Значения зенитного расстояния, которое требуется в приближенной формуле, можно выбирать из эфемерид Полярной.

Для получения приближенного азимута выполняют наблюдения двух-трех приемов с перестановкой горизонтального круга через 60° . Прием состоит из двух полуприемов. В каждом из полуприемов выполняется наведение на земной предмет и два наведения вертикальной нитью на Полярную с фиксацией отсчетов по часам.

2.6.2. Приближенные определения широты по наблюдениям Полярной

В основу способа определения широты по наблюдению Полярной положена первая теорема сферической астрономии: высота по-

люса Мира над горизонтом равна широте места наблюдения. Поскольку Полярная является ближайшей к полюсу Мира (полярное расстояние $\Delta = 90^\circ - \delta < 1^\circ$), то в первом приближении, с точностью до градуса, широта равна высоте Полярной:

$$\phi \approx h = 90^\circ - Z.$$

Высота Полярной h или зенитное расстояние Z измеряются теодолитом.

Во втором приближении для вычисления широты в измеренную высоту Полярной вводится поправка (см. рис. 2.6):

$$\phi \approx h - x = h - \Delta \cos t.$$

Данная формула позволяет определять широту с точностью $1'$.

Наконец, в результате строгого решения параллактического треугольника, можно прийти к следующей группе формул для вычисления широты:

$$\operatorname{tg} x = \cos t \operatorname{ctg} \delta;$$

$$\sin(\phi + x) = \cos Z \cos x / \sin \delta;$$

$$\phi = (\phi + x) - x.$$

Чтобы вычислить широту, следует измерить высоту h или зенитное расстояние Z Полярной, сопровождая измерения отсчетами по часам T_H . В измеренное зенитное расстояние/высоту вводится поправка за рефракцию. Поправка часов u определяется по приему радиосигналов точного времени. Координаты Полярной (α , δ) выбираются из таблицы «Видимые места близполюсных звезд» Астрономического ежегодника. Часовой угол t вычисляется по формуле:

$$t = T_H + u - \alpha.$$

Широту пункта получают как среднее из трех приемов. В полуприеме Полярную наблюдают два раза подряд, каждый раз наводя горизонтальной нитью и фиксируя отсчеты по часам.

2.6.3. Приближенные определения долготы и азимута по измеренным зенитным расстояниям Солнца

В основу определения долготы по наблюдениям Солнца положена вторая теорема сферической астрономии: разность местных времен равна разности долгот, или

$$\lambda = m - UT,$$

где Всемирное время UT есть

$$UT = D_n - (n + k) = T_n + u - (n + k),$$

а среднее солнечное время определяется по часовому углу истинного Солнца, как

$$m = t_{\odot} - E,$$

где E – уравнение времени.

Азимут направления на земной предмет по наблюдениям Солнца вычисляется по обычной формуле:

$$a_{зп} = A_{\odot} + Q,$$

где Q – измеренный горизонтальный угол.

Часовой угол $t_{\odot}$ и азимут Солнца $A_{\odot}$ могут быть вычислены из решения параллактического треугольника, в котором известны широта ϕ и склонение Солнца $\delta_{\odot}$, а также зенитное расстояние $Z_{\odot}$:

$$\cos t_{\odot} = (\cos Z_{\odot} - \sin \phi \sin \delta_{\odot}) / \cos \phi \cos \delta_{\odot} = K;$$

$$\cos A_{\odot} = (\sin \phi \cos Z_{\odot} - \sin \delta_{\odot}) / \cos \phi \sin Z_{\odot} = L.$$

Значение кругового угла определяется в зависимости от положения светила относительно меридиана. Если Солнце наблюдается к западу от меридиана (вечерние наблюдения), то

$$t_{\odot} = \arccos (K), A_{\odot} = \arccos (L),$$

а если Солнце – к востоку от меридиана, то

$$t_{\odot} = 360^{\circ} - \arccos (K); A_{\odot} = 360^{\circ} - \arccos (L).$$

Уравнение времени E и склонение Солнца $\delta_{\odot}$ интерполируются из Астрономического ежегодника на средний момент наблюдения в приеме по формулам с часовыми изменениями:

$$\delta_{\odot} = \delta_0 + v_{\delta}(UT)^h; \quad E = E_0 + v_E(UT)^h,$$

где δ_0, E_0 – табличные значения координат на дату наблюдения;

v_{δ}, v_E – их часовые изменения.

Согласно *выгоднейшим условиям определения долготы по измеренным зенитным расстояниям*, Солнце необходимо наблюдать вблизи первого вертикала – т. е. после восхода и перед заходом. Рекомендуется прекращать наблюдения Солнца за 1,5 часа до его кульминации (полудня) и возобновлять спустя минимум 1,5 часа после кульминации. Из-за трудно учитываемого влияния рефракции на измерения вблизи горизонта высота Солнца не должна быть меньше 10° . При наблюдениях Солнца на окуляр надевают плотный стеклянный светофильтр.

В рассматриваемом способе определения долготы и азимута измеряется зенитное расстояние Солнца Z' и горизонтальный угол Q между направлениями на Солнце и земной предмет. Наблюдения Солнца сопровождаются отсчетами по часам T_n в системе декретного времени D_n . Поправка часов u определяется из приема радиосигналов точного времени. В измеренное зенитное расстояние Солнца Z' вводятся поправки за рефракцию и суточный параллакс:

$$\begin{aligned} Z_{\odot} &= Z' + \rho - P \sin Z' = \\ &= Z' + 60,2'' \operatorname{tg} Z' - 8,8'' \sin Z'. \end{aligned}$$

Азимут и долготу получают как среднее из трех приемов. Наведение на центр диска Солнца получают как среднее из двух наведений на края (рис. 2.7). В момент касания краев берут отсчеты по часам.

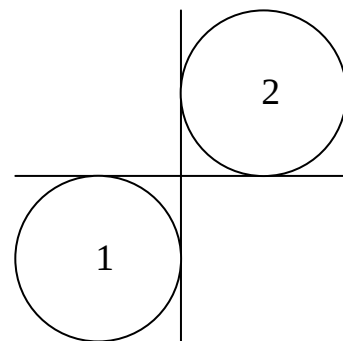


Рис. 2.7. Наведение на Солнце при определении долготы и азимута

2.6.4. Приближенные определения широты по измеренным зенитным расстояниям Солнца

Согласно выгоднейшим условиям определения широты по измеренным зенитным расстояниям, Солнце необходимо наблюдать вблизи меридиана и желательно так, чтобы часть наблюдений была сделана до прохождения Солнцем меридиана, а часть – после. Для определения широты достаточно измерить зенитное расстояние Солнца, сопровождая измерения отсчетами по часам. В каждом полуприеме выполняются по два наведения на нижний и верхний края диска Солнца (рис. 2.8). Для вычисления широты вводятся вспомогательные величины M и N , вычисляемые по следующим формулам:

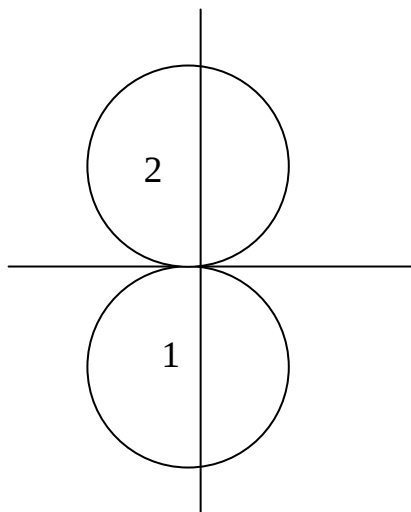


Рис. 2.8. Наведение на Солнце при определении широты

$$\operatorname{tg} M = \operatorname{tg} \delta_{\odot} / \cos t_{\odot};$$

$$\cos N = \cos Z_{\odot} \sin M / \sin \delta_{\odot}.$$

Далее вычисляется широта:

$$\phi = M + N.$$

Часовой угол Солнца вычисляется по формуле:

$$t_{\odot} = m + E,$$

где $m = T_n + u - (n + k) + \lambda$.

2.6.5. Определение дирекционного угла направления на земной предмет по наблюдениям светил

В практике геодезических работ обычно используют не астрономические азимуты, а дирекционные углы направления α . Для перехода от астрономического азимута к дирекционному углу надо перейти к геодезическому азимуту (ввести поправку за уклонение отвеса δA), а затем ввести поправку за кривизну геодезической линии на плоскости в проекции Гаусса δ и поправку за сближение меридианов γ (рис. 2.9):

$$\alpha = a + \delta A + \delta - \gamma.$$

На рис. 2.9 показаны осевой меридиан, геодезический (МГ) и астрономический (МА) меридианы пункта М. Для направления (МК) показаны дирекционный угол α , геодезический и астрономический азимуты (A и a соответственно).

Поправка за уклонение отвеса вычисляется из уравнения Лапласа:

$$\delta A = A - a = (L - \lambda) \sin \phi,$$

в неаномальных в гравиметрическом отношении районах она не превышает 2–3".

Поправка за кривизну геодезической линии на плоскости в проекции Гаусса с точностью 0,1–0,2" может быть вычислена по формуле:

$$\delta''_{M,K} = 0,00253''(x_M - x_K)y_m,$$

где x_M, x_K – абсциссы точки начала и конца линии, по которой определяется направление, км;

y_m – средняя ордината от осевого меридиана зоны, км.

Поправка γ за сближение меридианов на плоскости вычисляется как функция геодезической широты B и долготы $l = L - L_0$, отсчитываемой от осевого меридиана:

$$\gamma'' = l'' \sin B + l'''/3\rho''^2 \cdot \sin B \cos^2 B(1 + 3\eta^2),$$

где $\eta = e'^2 \cos^2 B \approx 0,0067 \cos^2 B$, $\rho'' = 206\,265''$.

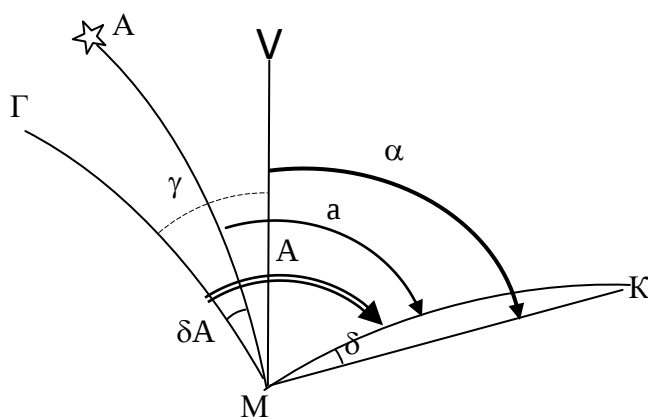


Рис. 2.9. Переход от астрономического азимута к дирекционному углу направления

Контрольные вопросы

1. Назначение приближенных способов астрономических определений.

2. Перечислите некоторые приближенные способы астрономических определений.

3. Наблюдения Полярной были выполнены в г. Новосибирске 1 сентября 19.. г. в 22 часа декретного времени (долгота Новосиби-

ска -5^h32^m , $n + k = 7^h$). Определить момент наблюдения Полярной по местному звездному времени.

4. Средний момент наблюдения Солнца в приеме равен $10^h 30^m$ по новосибирскому летнему декретному времени. Дата наблюдения – 1 сентября 19.. г., вычисленный часовой угол Солнца равен 21^h . Вычислить долготу пункта.

5. Какие поправки необходимо учитывать, а какими можно пренебречь при переходе от астрономического азимута к дирекционному углу с точностью $1'$?

2.7. Авиационная и мореходная астрономия

2.7.1. Определение долготы и широты по высотам светил в произвольных азимутах

Раздел практической астрономии, в котором рассматривается определение места положения (географической широты и долготы) воздушного корабля при помощи астрономических наблюдений, называется *авиационной астрономией*.

Сущность определения места наблюдателя на земной поверхности астрономическими методами сводится к нахождению положения

зенита наблюдателя на небесной сфере в точке пересечения не менее чем двух линий положения.

В навигации *линией положения* называется геометрическое место точек, обладающих каким-либо характерным свойством, одинаковым для всех наблюдателей, находящихся на этой линии.

Пусть наблюдатель находится на земном шаре в точке a (рис. 2.10). Зенит точки a обозначен на небесной сфере, как Z_a . Пусть в некото-

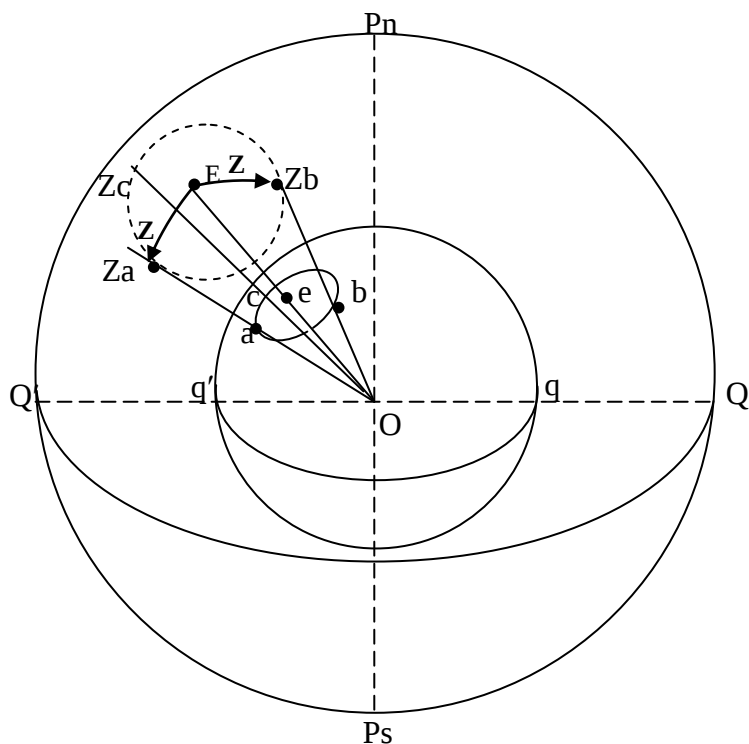


Рис. 2.10. Положение зенита наблюдателя на небесной сфере

рый момент времени T наблюдатель измерил высоту светила h . Дуга $Z_aE = 90^\circ - h$ есть зенитное расстояние светила Z . Опишем вокруг E малый круг $Z_aZ_bZ_c$ радиусом Z . Если спроектировать светило и все точки малого круга $Z_aZ_bZ_c$ по отвесным линиям на земную поверхность, то получится малый круг abc , сферический радиус которого равен сферическому радиусу малого круга небесной сферы $Z_aZ_bZ_c$. Этот малый круг есть изолиния, отвечающая результатам измерения высоты светила и получившая название *круга равных высот*.

Центр круга равных высот e есть проекция светила E по отвесной линии на земную поверхность. Эта точка получила название «*полюс освещения*».

Очевидно, если одновременно измерить высоту какого-нибудь второго светила, то можно провести второй круг равных высот, в точке пересечения которого с первым кругом равных высот должен находиться наблюдатель. Для того, чтобы нанести круг равных высот на земную поверхность, необходимо определить географические координаты полюса освещения e .

Пусть на земном меридиане, расположенном в плоскости чертежа (рис. 2.11), в точке G находится Гринвич. Зенит Гринвича Z_G находится на продолжении прямой OG до пересечения с небесной сферой. По рис. 2.11 видно, что широта ϕ_e и долгота λ_e полюса освещения e связана с экваториальными координатами светила E :

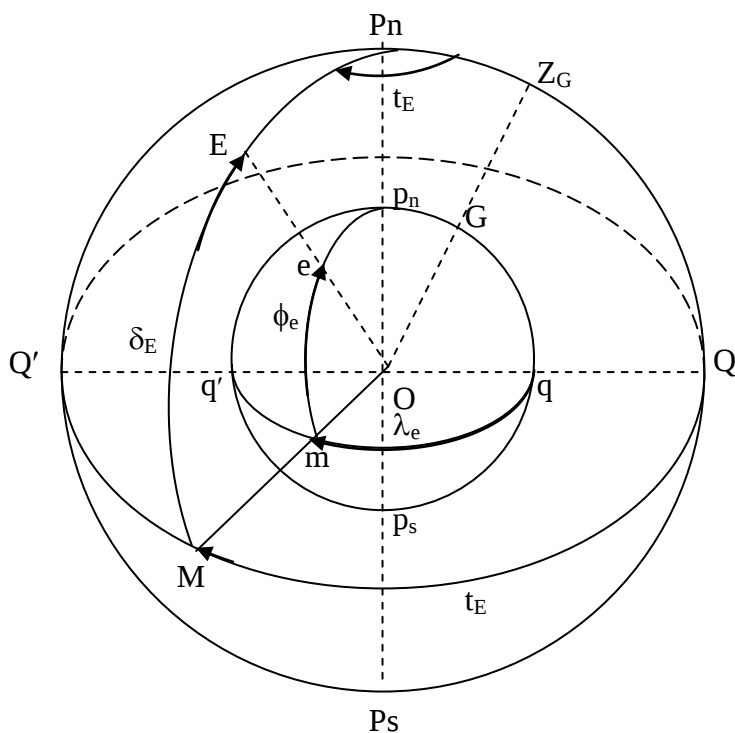


Рис. 2.11. Определение географических координат полюса освещения

$$\delta_E = \cup ME = \phi_e, \quad t_E = \cup QM = \lambda_e.$$

Склонение δ_E выбирается из каталога звезд, а часовой угол t_E вычисляется по формуле:

$$t_E = T + u - \alpha_E,$$

где T – момент наблюдения по звездному времени;

u – поправка часов;

α_E – прямое восхождение светила, выбираемое из каталога звезд.

Очевидно, что, располагая координатами полюса освещения e и величиной сферического радиуса круга равных высот Z , положение круга равных высот можно нанести на земной глобус. При нанесении на глобус двух кругов равных высот получаются две точки пересечения a и a' , одна из которых определяет действительное место. Какая именно из них – указывают зенитное расстояние Z_c и азимут светила A_c , предварительно вычисляемые по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\cos Z_c &= \sin \phi_c \sin \delta_E + \cos \phi_c \cos \delta_E \cos t_c; \\ \sin A_c &= \cos \delta_E \sin t_c / \sin Z_c; \\ t_c &= T + U + \lambda_c - \alpha_E.\end{aligned}\tag{2.14}$$

Чтобы получить положение объекта с точностью 2 км, необходимо, чтобы на глобусе длина меридиана $1'$ была не менее 1 мм. Следовательно, радиус глобуса должен быть равен 3,5 м. Таким глобусом пользоваться неудобно.

На практике определение широты и долготы в произвольных азимутах заключается в нахождении поправок к приближенным значениям широты ϕ_0 и долготы λ_0 пункта наблюдений, определенным по карте масштаба 1 : 100 000 и крупнее.

Для получения этих поправок для каждой звезды вычисляется по среднему моменту наблюдений зенитное расстояние Z_c по формуле (2.14). Затем для всех звезд вычисляются разности

$$\Delta Z = Z_c - Z_{\text{наб.}}$$

Поправки к приближенным значениям широты и долготы определяются графически. Для этого на листе миллиметровой бумаги намечается точка, изображающая приближенное положение определяемого пункта с координатами ϕ_0, λ_0 , и через нее проводятся оси прямоугольных координат (рис. 2.12).

От положительного направления оси абсцисс X откладываются с помощью транспортира направления, соответствующие азимутам звезд, и на полученных направлениях откладываются от начала координат отрезки, равные ΔZ в принятом масштабе. При этом, если величина ΔZ имеет знак плюс, то отрезок откладывается по направле-

нию линии азимута, а если минус, то в противоположном направлении. Затем через концы отрезков проводятся так называемые линии положения, перпендикулярные линиям азимутов.

В фигуру, образованную линиями положения, вписывают окружность наиболее подходящего радиуса.

По координатам (x, y) центра этой окружности вычисляют искомые поправки по формулам:

$$\Delta\phi = x/m;$$

$$\Delta\lambda = y / (15m \cos \phi),$$

где m — число миллиметров, соответствующее $1''$ дуги.

Окончательные значения ϕ и λ вычисляются по формулам:

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi; \quad \lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda.$$

2.7.2. Элементы авиационной астрономии. Авиасекстант

Большая скорость самолета и значительная высота полета неблагоприятно влияют на точность астрономических наблюдений в полетах. Ошибка полученной из серии измерений высоты светила, равная $0,2^\circ$, может часто достигать до $0,3^\circ$. Однако такая точность в воздушной астрономии может считаться достаточной.

При большой высоте полета дальность горизонта весьма значительна (100–300 км), поэтому линейная точность определения места самолета порядка 10–30 км оказывается вполне удовлетворительной.

Кроме того, большая скорость самолета требует, чтобы наблюдения выполнялись очень быстро — широта и долгота самолета должны быть получены через 2–4 минуты после окончания наблюдений.

Такие наблюдения можно выполнить с помощью *авиасекстанта*. Схема авиасекстанта приведена на рис. 2.13.

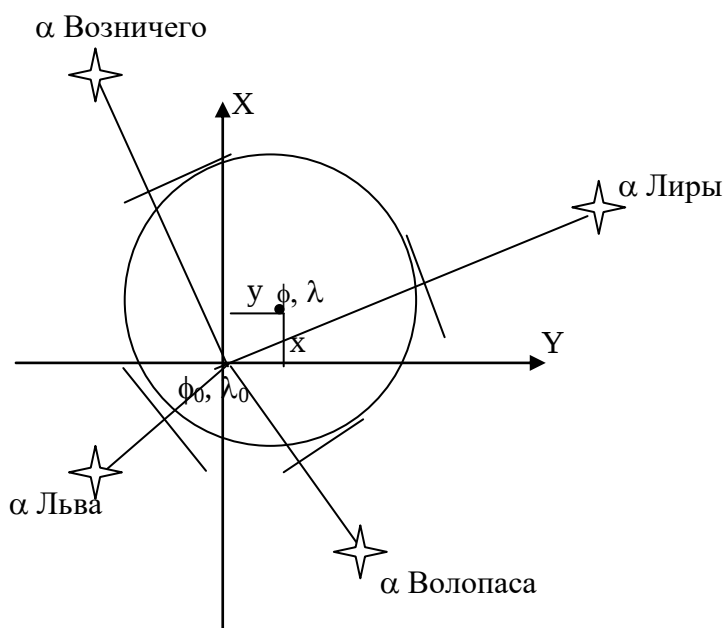


Рис. 2.12. Графический метод определения поправок в приближенные значения координат

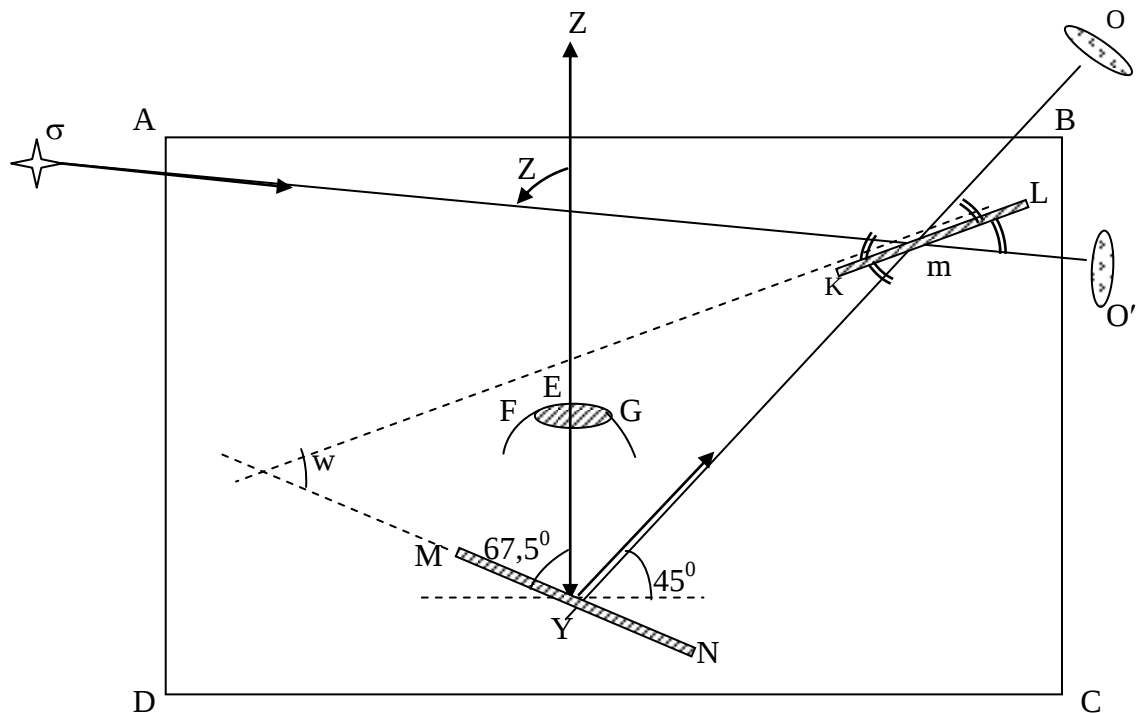


Рис. 2.13. Схема авиасекстанта

На раме ABCD расположены уровень FG и неподвижное зеркало MN. Центр этого зеркала Y совпадает с центром кривизны поверхности уровня FG. Зеркало MN устанавливается под углом $67,5^\circ$ к направлению EY, так что луч EY отражается от него в направлении Ym под углом 45° к горизонту. В точке m этот луч встречается прозрачную плоскопараллельную пластинку KL, которая частью отражает и частью пропускает без преломления падающие на нее лучи. Таким образом, если наблюдатель, глядя через пластинку из точки O, держит авиасекстант так, что середина пузырька уровня совпадает с точкой Y, то линия EY будет вертикальна и даст направление на зенит Z.

Пластинка KL может вращаться вокруг точки m. Поворачивая ее, можно добиться, чтобы луч, идущий от светила σ , отразился от нее в том же направлении mO, т. е. чтобы отраженное изображение светила и середины пузырька уровня E совпали. Тогда угол между направлениями σm и ZE будет равен

$$Z = 2w.$$

Если совпадение изображений достигнуто, то оно не нарушится при покачивании секстанта в вертикальной плоскости.

Такие же результаты получаются, если глаз наблюдателя находится в точке O'. Только в этом случае дважды отраженное изобра-

жение середины пузырька уровня совмещается с непосредственно наблюдаемым изображением светила σ .

В воздушной астрономии наблюдаются: днем Солнце, в сумерках Луна и яркие планеты, в особенности Венера. Ночью наблюдаются Полярная (α U Mi) и 12 так называемых авиационных звезд: Вега (α Lyr), Капелла (α Aur), Арктур (α Boo), Прокцион (α CM), Бетельгейзе (α Ori), Альтаир (α Aql), Альдебаран (α Tau), Спика (α Vir), Регул (α Leo), Денеб (α Cyg), Алиот (ϵ U Ma), Альферац (α And). В остальных случаях угловые размеры пузырька должны быть около 10–15'.

Звезды и планеты наблюдают из окуляра O' , т. е. «на просвет», а Солнце и Луну – из окуляра O , т. е. в отраженных лучах.

После того, как пузырек уровня появится в поле зрения, вращают плоскопараллельную пластинку KL до тех пор, пока не появится изображение светила и не получится совпадение изображений. При этом изображение Солнца и Луны устанавливают концентрически с круглым изображением пузырька, а изображения звезд и планет – в центре этого изображения.

Измерения высот производят сериями от 5 до 20 измерений в серии, а затем выводят среднюю высоту светила и средний момент наблюдения в серии по часам с известной поправкой.

Высоты, измеренные авиасекстантом, должны быть исправлены за астрономическую рефракцию, за рефракцию стеклянного астрокупола (фонаря), если наблюдения ведутся не через открытые астролюки, за наклонение горизонта. При наблюдении Луны учитывается суточный параллакс.

Контрольные вопросы

1. Что означают понятия «линия положения», «полюс освещения» в навигации?
2. Какие величины измеряются в авиа- и морской навигации?
3. Объясните принцип действия авиасекстанта.
4. Какие светила наблюдаются в морской и воздушной астрономии?

3. АСТРОМЕТРИЯ

3.1. Задачи астрометрии и методы их решения

3.1.1. Предмет и задачи астрометрии

Астрометрия – фундаментальная часть практической астрономии. Это наука, создающая опорную инерциальную систему небесных координат в пространстве, согласованный комплекс фундаментальных астрономических постоянных на основе получения координат небесных объектов, изучения вращения Земли.

Задачи, решаемые астрометрией, можно разделить на три группы (рис. 3.1):

- 1) установление на небесной сфере инерциальной системы небесных координат, которая не должна обладать никаким другим движением, кроме прямолинейного и равномерного;
- 2) задание систем измерения времени и определение параметров поступательно-вращательного движения Земли;
- 3) создание согласованной системы фундаментальных астрономических постоянных.

Для решения указанных задач используются следующие *массивы астрометрических наблюдений*:

- координаты и собственные движения звезд;
- положения тел Солнечной системы;
- координаты полюса и неполярные колебания широт;
- астрономические поправки эталонного времени;
- положения ИСЗ, скорости их движения, расстояния до них;
- задержки сигналов в РСДБ.

Астрометрические наблюдения лежат в основе исследований в области *небесной механики*, они важны для решения фундаментальных проблем *звездной динамики и галактической астрономии*, а также многих задач *астрофизики*. Астрометрические данные составляют фундамент всех практических приложений астрономии к *геодезии, навигации, космическим исследованиям*, к решению проблем, связанных с измерением времени и изучением вращения Земли.



Рис. 3.1. Схема задач, решаемых астрометрией

Задачи астрометрии решаются рядом научных, военных, специализированных учреждений различных государств как в отдельных странах, так и в рамках согласованных научных проектов международного сотрудничества. Полученные результаты используются, в частности, для *координатно-временного обеспечения страны (КВО)*, где востребованы дипломированные специалисты специальности «Космическая геодезия».

В рамках решения задач КВО в России создается *фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС)*, которая практически реализует *геоцентрическую систему координат* [7]. Эта система координат согласовывается с *фундаментальными астрономическими (небесными) системами координат* и связывается с аналогичными пунктами различных государств. Параметры связи между земной системой координат, задаваемой пунктами Государственной геодезической сети (ГГС), и небесной системой, задаваемой квазарами и звездами, устанавливаются оперативными наблюдениями *Государственной*

службы времени и частоты (ГСВЧ) и публикуются в специальных бюллетенях этой службы. Здесь же публикуются *параметры вращения Земли и поправки для перехода к международным шкалам времени*, необходимые для использования шкал атомного и координированного времени в работах по развитию ГГС. Таким образом, при создании ФАГС необходимы результаты решения практически всех задач астрометрии.

3.1.2. Обзор методов астрометрии

Методы астрометрии разделяются на *классические* (наземные *астрооптические*) и *современные* (космические).

Астрооптические методы основаны на наблюдениях светил с помощью оптических инструментов, расположенных на поверхности Земли. Здесь решение астрометрических задач выполняется *позиционным методом* (по измерению направлений на звезды) или *фотографическим методом*.

Для фундаментальных астрооптических наблюдений традиционно используются *стационарные астрономические инструменты*: пассажный инструмент, меридианный круг, вертикальный круг, зенит-телескоп, призмная астролябия, фотографическая зенитная труба, астрограф.

В настоящее время налажена астрометрическая служба на обсерваториях всего мира, фундаментальные наблюдения практически автоматизированы. Основное ограничение на точность астрооптических методов накладывает *атмосферная турбулентность*. Из-за этого недостатка классические методы в настоящее время не могут конкурировать с современными методами решения астрометрических задач. Так, например, точность координат звезд, измеренных астрооптическими методами – сотые доли угловой секунды, а современными методами можно улучшить точность на несколько порядков – до тысячной или одной десятитысячной секунды.

В последние годы в наземной оптической астрометрии активно внедряется новая техника, например, оптические интерферометры. Можно отметить применение полупроводниковых панорамных приборов-приемников с зарядовой связью (ПЗС), введение режима полной автоматизации наблюдений (роботизации телескопов), применение адаптивной оптики, использование глобальных информационных сетей, лазерных дисков для хранения огромных массивов наблюдаемых данных и др.

Современное состояние астрометрии характеризуется, в первую очередь, постоянным совершенствованием техники и увеличением количества и качества наблюдений. На смену астрооптическим методам приходят методы космической геодезии.

В современных методах астрометрии используются космические аппараты, наблюдение искусственных спутников Земли (ИСЗ) и Луны, а также удаленных радиоисточников (радиогалактик и квазаров). К современным методам относятся:

- 1) использование астрометрических космических телескопов;
- 2) радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ);
- 3) лазерная локация ИСЗ и Луны;
- 4) радиотехнические методы космической геодезии – доплеровские и радиодальномерные.

Использование астрометрических космических телескопов

Астрометрические космические телескопы предназначены для решения следующих задач:

- определение относительных координат, относительных собственных движений и параллаксов звезд с высокой точностью (несколько десятитысячных долей секунды дуги);
- определение и уточнение шкалы расстояний и абсолютных светимостей звезд;
- исследование структуры и эволюции Галактики;
- наблюдение квазаров для абсолютизации координат и собственных движений звезд;
- наблюдение двойных звезд, в том числе и тесных, с расстояниями между компонентами до $0,1''$.

Наблюдения с искусственных спутников выгодно отличаются от наземных наблюдений отсутствием атмосферных помех, а также тем, что в одной точке и в одной и той же системе отсчета может наблюдаться полное небо.

При использовании космических аппаратов для составления каталогов звезд *основными измеряемыми величинами* являются дуги, соединяющие пары звезд, в том числе дуги, соединяющие опорные объекты (квазары, звезды с известными координатами) и определяемые звезды.

С 1989 по 1993 гг. на околоземной орбите работал космический телескоп HIPPARCOS Европейского космического агентства; в результате были получены звездные каталоги HIPPARCOS (118 218 звезд,

с точностью $0,7'' \cdot 10^{-3}$) и TYCHO (1 058 332 звезд, с точностью $25'' \cdot 10^{-3}$). С 1990 г. на орбите работает Большой космический телескоп Хаббла, примерно 15 % наблюдательного времени которого отводится на решение астрометрических задач.

Преемник проекта HIPPARCOS – космический телескоп-интерферометр Европейского космического агентства GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), который должен быть выведен на орбиту в 2011 г. Параллакс и собственное движение будут измеряться с помощью двух разнонаправленных телескопов, плоскость обзора которых перпендикулярна оси вращения. Радиальная скорость звезд будет измеряться с помощью спектрометра, также установленного на GAIA. Точность измерения параллакса и местоположения для ярких звезд (до 15^m) будет выше $2,5'' \cdot 10^{-5}$, а для слабых звезд (около 20^m) – до $0,3'' \cdot 10^{-3}$. Предполагается получить точные данные приблизительно для одного миллиарда звезд.

Применение методов космической геодезии для решения задач астрометрии

Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ, VLBI) состоит в наблюдении удаленных радиоисточников (радиогалактик и квазаров) на двух далеко разнесенных антеннах-приемниках. Здесь измеряется временная задержка прихода радиосигнала на антенны приемников. Квазары и радиогалактики практически не обладают собственным движением, в отличие от звезд, наблюдаемых астрооптическими методами. Это свойство квазаров позволяет использовать их при реализации небесной инерциальной системы координат, а также уточнять по их наблюдениям параметры нутации.

На основе РСДБ-наблюдений квазаров создана *небесная инерциальная система координат* ICRF (International Celestial Reference Frame), положения источников в которой определены с точностью $1'' \cdot 10^{-4}$. Метод РСДБ используется при определении *параметров ориентации Земли* (координат полюса до единиц сантиметра, продолжительности суток до десятитысячной секунды) для синхронизации с высокой точностью часов, находящихся в разных пунктах для координатно-временной привязки исследований, выполняемых в околопланетном пространстве, а также при решении других задач геодезии, геофизики, астрофизики.

РСДБ-технология по технике и задачам носит международный характер. Около 30 РСДБ-станций, расположенных по всему земному шару, работают в рамках международной организации IVS (International VLBI Service). В России в настоящее время развернута радиоинтерферометрическая сеть «Квазар-КВО», состоящая из трех радиоастрономических обсерваторий. В 2010 г. в комплекс будет введен четвертый 70-метровый радиотелескоп в поселке Галенки под Уссурийском.

При лазерной локации ИСЗ и Луны измеряется расстояние от отражателя, установленного на ИСЗ или Луне, до приемника. Полученные данные используются для координатно-временного обеспечения ГНСС (GPS, ГЛОНАСС), решения различных задач геодезии, геодинамики, в том числе для определения параметров вращения Земли (координат полюса и неравномерности вращения Земли).

В настоящее время около 40 лазерных станций объединены в ассоциацию ILRS (международная служба лазерной дальнометрии). Обмен информацией в ILRS осуществляется на паритетной (некоммерческой) основе. Россия является членом ILRS и участвует в международных программах по высокоточной лазерной дальнометрии космических аппаратов.

В глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС – GPS, ГЛОНАСС, GALILEO) со станций слежения непрерывно измеряются расстояния до спутников. В результатах обработки измерений радиоконтроля орбит, кроме основной эфемеридной информации, содержатся параметры вращения Земли.

3.1.3. Современное состояние и перспективы развития астрометрии

Современное состояние и дальнейшее развитие астрометрии можно описать по следующим направлениям.

1. *Небесная инерциальная система координат.* Успешные реализации международной небесной опорной системы координат ICRF, сделанные до настоящего времени, поддерживают направление осей в пространстве в пределах $0,00002''$. В перспективе – расширение каталога, распространение его на звезды; запуск астрометрического спутника GAIA. Выполняются исследования по применению дугомерных методов (в проекте запуск российского космического аппарата ОЗИРИС), спутниковой радиоинтерферометрии (Российский проект «Радиоастрон»).

2. *Задание систем измерения времени и определение параметров ориентации Земли.* Современные атомные стандарты частоты воспроизводят время с точностью до 10^{-14} – 10^{-15} с; в перспективе повышение точности до 10^{-16} – 10^{-17} к 2011 г. Успешно исследуются и применяются новые принципы измерения времени на основе наблюдения пульсаров (пульсарное время [10]). Точность получения параметров вращения Земли составляет 0,10–0,25 мс дуги в зависимости от используемых данных. Современные методы космической геодезии позволяют обнаружить колебания земной оси с амплитудой 0,5 м и периодами колебаний менее 1 суток, неравномерность вращения Земли с точностью 0,0001s.

3. *Совершенствование методов и средств наблюдений* идет в направлении полной автоматизации измерений, повышения чувствительности приемников излучения, реализации новых космических проектов, международной интеграции и т. д. В первой четверти XXI в. планируется создание лунной базы, где будут выполняться астрометрические наблюдения, а в более далекой перспективе предусматриваются аналогичные наблюдения с поверхности Марса.

4. *Разработки в теории.* При проведении измерений с точностью до десятых микросекунд дуги необходимо учитывать огромное количество разнообразных эффектов, оказывающих влияние на распространение света на всем пути от объекта до наблюдателя (изменение состояния атмосферы, приливы, движение континентов, вариации вращения Земли, искривление пространства-времени на пути света и др.). Для осуществления новых космических проектов требуется более точная теория прецессии-нутации, а также более точные реализации земных и небесных систем координат. В свою очередь, результаты высокоточных измерений позволяют уточнить соответствующие теоретические разработки. С увеличением потока измерительной информации требуется совершенствование методов математической обработки измерений и принципов анализа получаемых данных.

Успешное решение проблем астрометрии – необходимое условие решения ряда задач астрофизики и звездной астрономии, геодезии и геодинамики.

Контрольные вопросы

1. Перечислите задачи астрометрии и приведите примеры использования результатов решения астрометрических задач в геодезии.

2. В чем основной недостаток астрооптических методов астрометрии по сравнению с современными?

3. Назовите измеряемые величины в астрооптических и современных методах астрометрии.

4. На основе изучения литературы и информации в сети Интернет охарактеризуйте современное состояние и перспективы развития астрометрии.

3.2. Инструменты фундаментальной астрометрии

3.2.1. Требования к инструментам фундаментальной астрометрии

Инструменты фундаментальной астрометрии должны обеспечивать максимально высокую точность астрономических определений. В связи с этим к ним предъявляются следующие требования.

1. Требования к установке инструментов. Должны быть обеспечены максимальная устойчивость и минимальное воздействие температурных изменений. Все инструменты, как правило, стационарные, массивные, устанавливаются на фундаментальных опорах. Инструменты располагаются в специальных павильонах на открытом месте, в отдалении от отапливаемых помещений. Некоторые инструменты покрываются теплоизолирующими материалами. Рекомендуется проветривать павильоны за 1,5 часа до начала наблюдений.

2. Исключение возможных инструментальных ошибок измерений. Это требование частично удовлетворяется путем специальной установки инструментов. Кроме того, ряд инструментов имеет только одну ось вращения: здесь наблюдения предусматриваются в одном азимуте или на одной высоте.

3. Максимальное исключение ошибок наблюдателя. Достигается автоматизацией наблюдений. Например, использование ртутного горизонта для автоматического установления вертикали, фотоэлектрическая регистрация моментов прохождений звезд, фотографирование отсчетов по кругам, автоматическое наведение и гидирование инструмента.

4. К оптическим характеристикам инструментов предъявляются высокие требования, поскольку большинство наблюдаемых звезд обладают слабым блеском.

Основной класс стационарных инструментов, применяющихся в астрометрии – *меридианные астрономические инструменты*. К ним

относятся: *пассажный инструмент, меридианный круг, вертикальный круг, зенит-телескоп*. Кроме указанных инструментов в астрометрии используются *безличная призмная астролябия Данжона*, а для фотографических наблюдений – *фотографическая зенитная труба и астрограф*.

3.2.2. Классические астрооптические инструменты

Пассажный инструмент (от франц. passage – проход) – астрометрический инструмент, служащий для определения моментов прохождения небесных светил (при их видимом суточном движении) через некоторый вертикал. Обычно пассажный инструмент (точнее, его визирная линия) устанавливается в плоскости меридиана – для получения из наблюдений прямых восхождений звезд и поправок часов, иногда в первом вертикале – для определения склонений звезд и широты места и для определения фундаментальных азимутов из наблюдений прохождений звезд через вертикал земного предмета.

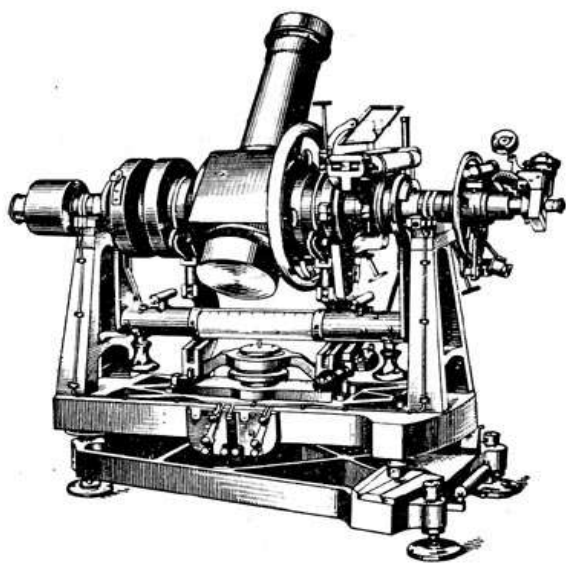


Рис. 3.2. Пассажный инструмент

Конструктивные особенности (рис. 3.2): вертикальной оси инструмент не имеет; основанием инструмента служит массивная станина, на концах которой имеются подставки с лагерами для укладки горизонтальной оси трубы. Предусмотрено лишь небольшое перемещение станины для уточнения ориентировки инструмента при его первоначальной установке на бетонный столб. Переворот трубы через зенит здесь невозможен, поэтому для исключения коллимационной ошибки предусмотрено устройство для перекладки горизонтальной оси трубы в лагерах. Для

определения наклона горизонтальной оси служит секундный подвесной уровень. Горизонтальная ось снабжена вертикальным кругом-искателем для установки трубы по заданному зенитному расстоянию. Зрительная труба центральная ломаная, диаметр объектива 100 мм, фокусное расстояние 1 000 мм, разрешающая способность 1,2", про-

нищающая сила 13^m . В целях возможно большей устойчивости – значительная масса, не менее 280 кг, большая часть которой приходится на основание инструмента.

Все современные пассажные инструменты имеют приспособления для фотоэлектрической регистрации звездных прохождений, а также снабжены электронными схемами для исключения фона неба, уравнивания блеска звезд.

Меридианный круг – астрономический инструмент для точного определения прямых восхождений и склонений небесных светил путем регистрации моментов их прохождения через небесный меридиан и измерения их зенитных расстояний в меридиане (рис. 3.3). Меридианный круг изобретен в конце XVII в. О. Ремером. Теория меридианного круга разработана Т. Майером (XVIII в.) и Ф. Бесселем (XIX в.). Меридианный круг в XX в. являлся основным инструментом для точного определения экваториальных координат небесных светил.

Меридианный круг отличается от пассажного инструмента наличием точно разделенных вертикальных кругов (обычно их два) для измерения меридианных зенитных расстояний звезд с целью определения их склонений. Астрономическая труба меридианного круга – прямая центральная, параметры оптики – того же порядка, что и у больших пассажных инструментов. Лагеры, на которые укладывается горизонтальная ось трубы, устанавливаются на двух бетонных столбах, на которых монтируются барабаны с микроскопами для отсчетов вертикальных кругов. Для определения места зенита служит ртутный горизонт, расположенный под инструментом. Меридианный круг имеет накладной уровень с секундной ампулой. В остальном меридианный круг аналогичен пассажному инструменту.

Вертикальный круг представляет собой увеличенный в размерах астрономический универсальный инструмент с внецентренной прямой трубой и точно разделенным вертикальным кругом, горизонтальный круг отсутствует. Он служит для определения склонений звезд по измерениям их меридианных зенитных расстояний.

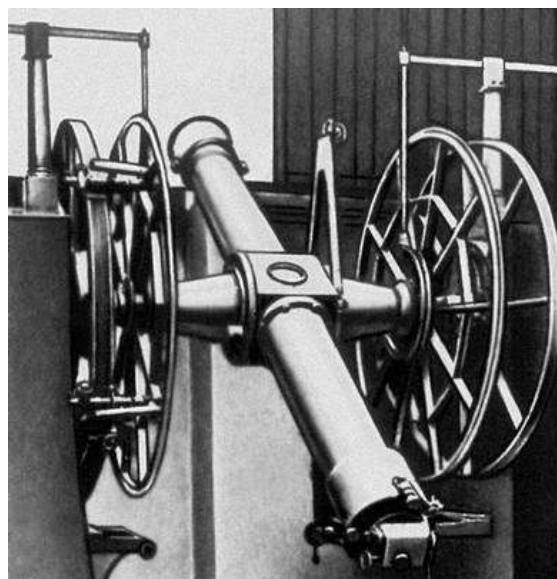


Рис. 3.3. Меридианный круг

Зенит-телескоп предназначен для измерения малых разностей зенитных расстояний звезд (рис. 3.4). Применяется для высокоточного определения широты по способу Талькотта, с целью изучения движения полюсов Земли. Труба инструмента прямая внецентренная, с призмой на окулярном конце, поворачивающей изображение на 90° . Современные зенит-телескопы имеют приспособления для фотографирования отсчетов двух талькоттовских уровней и отсчетов окулярного микрометра. Обычная сетка нитей заменена стеклянной пластинкой с нанесенными на ней штрихами. В окулярном микрометре предусмотрена реверсионная призма для изменения направления видимого движения звезды в поле зрения на обратное с целью исключения ошибок микрометра и наблюдателя. Контроль неизменности зенитного расстояния трубы в процессе наблюдения осуществляется с помощью двух высокоточных уровней, укрепленных обычно на центральной части трубы. Диаметр объектива 180 мм, фокусное расстояние 2 360 мм, цена оборота окулярного микрометра $22''$, цены делений талькоттовских уровней порядка $1''$.

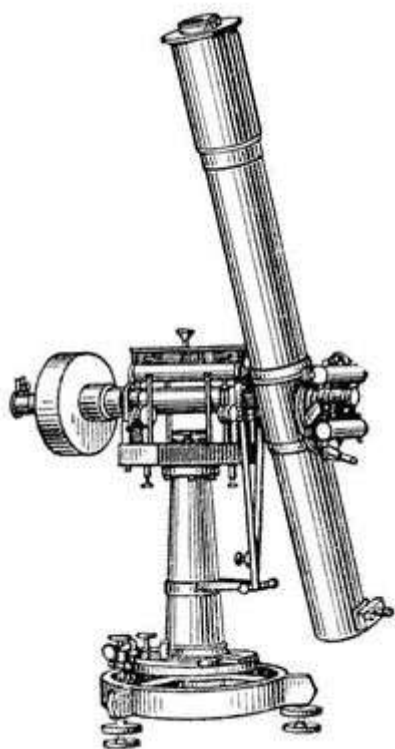


Рис. 3.4. Зенит-телескоп

Безличная призмная астрлябия Данжона – инструмент для определения широты места (координат полюса) и поправки часов по наблюдаемым моментам прохождения звезд в различных азимутах через некоторый альмукантарат; также может быть использована для определения экваториальных координат звезд и планет. Астрлябия Данжона позволяет получать автоматически зарегистрированные моменты наблюдения звезды, свободные от систематических личных погрешностей наблюдателя.

Инструмент имеет только одну вертикальную ось вращения. Направление отвесной линии определяется автоматически оптическим путем с помощью ртутного горизонта.

Перед объективом 3 (рис. 3.5) горизонтально расположенной астрономической трубы (для компактности оптическая ось трубы изломана с помощью двух зеркал 4 и 5 помещается равносторонняя стек-

лянная призма 1 с ребрами, параллельными горизонту, и одной гранью, перпендикулярной оптической оси трубы. Под призмой устанавливается ртутный горизонт 2. Свет от наблюдаемой звезды, падая на верхнюю грань призмы и преломляясь, дает ее изображение в фокальной плоскости объектива; второе изображение этой же звезды получается от ее света, проходящего через нижнюю грань призмы после отражения от ртутного горизонта. Вследствие видимого суточного движения звезды оба изображения приближаются друг к другу и совпадают; в момент прохождения звезды через альмукантарат с зенитным расстоянием, близким к 30° , изображения рассматриваются в окуляр 6. Для регистрации момента микrometer инструмента имеет специальную призму Волластона 7, перемещая которую микromетрическим винтом, снабженным контактными барабанами, записывают на хронографе серию моментов, что позволяет повысить точность окончательного результата. Точность определений на призмной астрольбии сопоставима с точностью, получаемой на классических меридианных инструментах служб времени и широты.

Диаметр объектива 100 мм, фокусное расстояние 1 000 мм, сторона равносторонней призмы 100 мм.

Астрографы (рис. 3.6) предназначены для фотографирования участков звездного неба с целью составления фотогра-

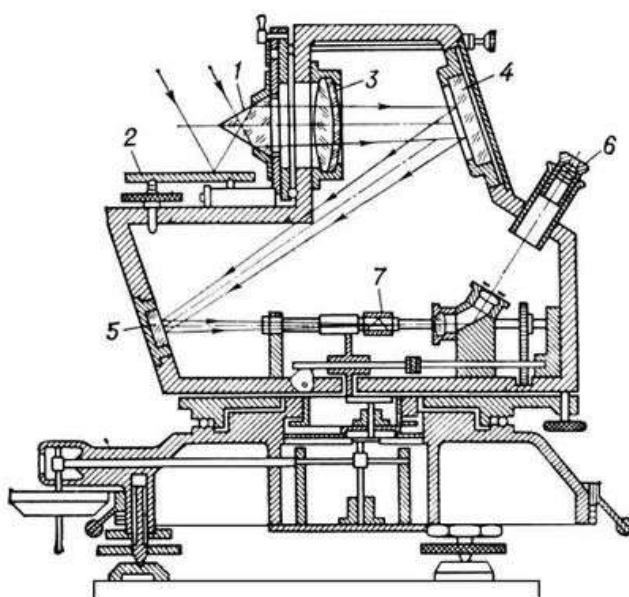


Рис. 3.5. Призмная астрольбия Данжона

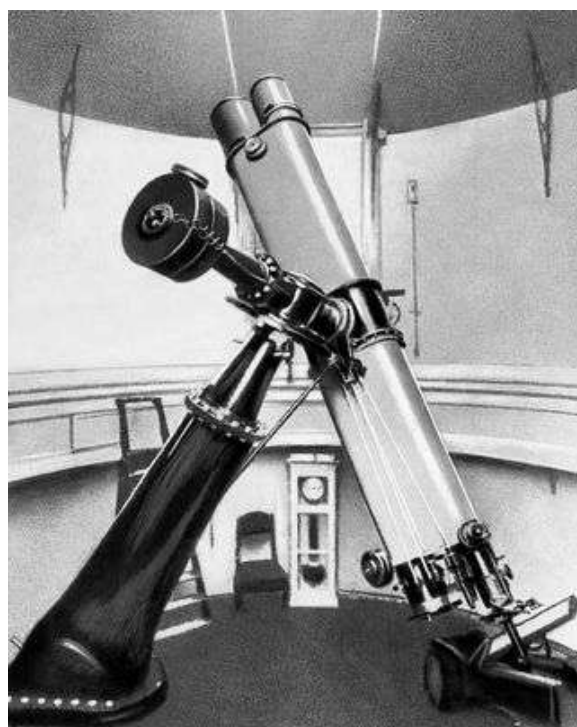


Рис. 3.6. Астрограф

фических звездных каталогов. Астрограф представляет собой телескоп, в фокусе объектива которого помещается фотопластинка; перед фотопластинкой располагается затвор. Вращение астрографа вслед за суточным движением небесной сферы осуществляется точным часовым механизмом и контролируется наблюдателем с помощью гида – второй оптической трубы, смонтированной параллельно первой на той же установке. Астрографы делятся на широкоугольные, нормальные, длиннофокусные.

Фотографическая зенитная труба предназначена для высокоточных определений широт в целях определения координат мгновенного полюса по фотографическим изображениям прохождений околозенитных звезд через меридиан. Она может использоваться также для определения склонений звезд и для определения времени. Состоит из металлической колонны, укрепленной вертикально на массивном фундаменте. На ее верхней части помещается объектив с диаметром 20–25 см и фокусным расстоянием около 400 см. Внизу под объективом на половине фокусного расстояния помещается ртутный горизонт. Лучи звезд, находящихся близко к зениту, пройдя объектив и отразившись от поверхности ртути, идут вверх и образуют точечные изображения звезд ниже объектива на несколько сантиметров. В этом месте, перпендикулярно к оптической оси, помещается кассета с фотопластинкой, которая плавно передвигается часовым механизмом перпендикулярно к плоскости небесного меридиана. Управление инструментом осуществляется либо дистанционно, либо автоматически по заданной программе. Точности определения широты и поправки часов (средняя квадратическая ошибка) при наблюдениях в течение одной ночи равны соответственно $+0,08''$ и $+0,007$ с.

Первая фотографическая зенитная труба была сконструирована американским астрономом Ф. Россом и установлена на Международной широтной станции в Гейтерсберге (США) в 1911 г.

3.2.3. Современные астрономические инструменты

В настоящее время для решения задач астрометрии используются следующие астрономические инструменты:

- автоматические меридианные телескопы;
- широкоугольные астрографы;
- большие телескопы;
- оптические интерферометры.

Все перечисленные инструменты снабжены полупроводниковыми панорамными приборами-приемниками с зарядовой связью.

Автоматические меридианные телескопы

Меридианный телескоп (МТ) – измерительное устройство, предназначенное для наземных угловых измерений координат (прямых восхождений и склонений) небесных объектов: звезд, больших и малых планет, звездообразных и дискообразных объектов. Поскольку необходимо проведение массовых наблюдений сотен тысяч и миллионов звезд в относительно короткие сроки, то это возможно лишь при полной автоматизации всего процесса наблюдений и обработки полученных данных. Современные технологии и средства связи позволяют использовать управление телескопом на значительном удалении от астронома-наблюдателя, используя глобальные информационные сети типа INTERNET в режиме удаленного доступа.

Внутренняя точность регистрирующих устройств МТ обеспечивает определение параметров системы телескопа, регистрацию небесных объектов и автоколлимационных марок по обеим координатам с точностью не хуже $0,001''$.

Быстродействие меридианного телескопа – один из факторов, определяющих эффективность его работы. Учитывая возможности ПЗС матрицы регистрировать одновременно все объекты в поле зрения, можно определить быстродействие автоматического МТ величиной не менее 7–9 тысяч звезд в час, при размере матрицы около $1\,000 \times 1\,000$ пикселей.

Наиболее известным МТ является *астрометрический телескоп-рефрактор классической системы*, используемый обычно в виде пассажного инструмента, вертикального или меридианного круга. Проведенная автоматизация некоторых МТ классического типа позволяет полнее использовать их возможности, ограниченные механическими и термическими деформациями, нестабильностью параметров и пр. Например, автоматические меридианные телескопы однотипной классической конструкции – японский РМС, датский САМС, американский FASTT [11].

Более поздним является *зеркально-линзовый меридианный телескоп*. По своей конструкции такой инструмент близок к классическому. Отличие в том, что труба зеркально-линзового телескопа в несколько раз короче трубы рефрактора и, следовательно, может быть улучшена жесткость тубуса и уменьшены весовые нагрузки. Конст-

рукция зеркально-линзового телескопа обладает симметрией и компактна. В настоящее время в рабочем состоянии находится *фотографический вертикальный круг* (ФВК) Пулковской обсерватории. В 1996 г. ФВК был оснащен ПЗС – регистрирующим окулярным устройством. Введение в работу ПЗС-микрометра позволило выполнять на ФВК наблюдения по двум координатам, и с этого времени инструмент получил новое название – Пулковский меридианный телескоп. В настоящее время ПМТ установлен в павильоне Пулковской обсерватории. В этой же обсерватории находится зеркально-линзовый *Меридианный Автоматический Горизонтальный Инструмент* (МАГИС).

Широкоугольные астрографы с ПЗС-приемниками

Широкое внедрение ПЗС-приемников, наряду с сохранением положительных свойств астрофотографии, вносит дополнительные преимущества: наблюдения более слабых объектов в разных режимах (сканирование, накопление, комбинированный метод), цифровое представление материала наблюдений, что позволяет использовать различные методы обработки данных и повышает в конечном итоге точность (до 1–2 процентов пиксела). Сняты проблемы обработки, хранения и измерения фотопластинок. ПЗС-астрографы, работающие в угловых полях до $2^\circ \times 2^\circ$, демонстрируют широкие возможности: число объектов яркостью до 21–23 звездных величин достигает в некоторых программах 100 миллионов, ожидаемая точность положений звезд, около 0,02–0,03".

В решении современных астрометрических задач участвуют такие ПЗС-телескопы-астрографы, как SLOAN (диаметр объектива 2,5 м, Apache Point Observatory, США), VST (диаметр объектива 2,65 м, Европейская южная обсерватория ESO). Телескоп VST создается для обеспечения наблюдений на крупнейшем в мире наземном оптическом интерферометре VLT, расположенном в пустыне Паранал (Чили).

Большие телескопы для астрометрии

Несмотря на то, что главные задачи больших телескопов (диаметр оптики до 8–10 м) лежат в области астрофизических исследований, в области позиционных определений для наземной астрометрии открываются уникальные возможности. Это поиск и исследование слабых спутников планет и новых объектов солнечной системы, новых планетных систем в окрестностях ближайших звезд, изучение орбит и масс двойных и кратных звездных систем и др.

В качестве примера можно привести один из крупнейших телескопов мира – телескоп SUBARU (Национальная астрономическая обсерватория Японии), установленный в обсерватории Мауна Кеа (Гавайские острова) на высоте 4 200 м, в месте с наилучшими астроклиматическими условиями. Телескоп SUBARU имеет диаметр первичного зеркала 8,2 м, оснащен ПЗС-камерой, включающей мозаику из 10 матриц, которые смогут регистрировать объекты до 26,6^м. Кроме активной оптики телескоп снабжен также узлом адаптивной оптики, что обеспечивает предельное дифракционное разрешение на уровне космического телескопа Хаббла (HST). Управление телескопом SUBARU обеспечивается наблюдателем в режиме удаленного доступа из любой обсерватории. Задачей астрометрического направления телескопа SUBARU является «глубокий» поиск и тщательное изучение слабых объектов Солнечной системы, слабее 20^м (астероиды, спутники Сатурна, Юпитера), включая планетоподобные объекты с целью определения их положений, звездных величин в пяти цветах, наблюдения двойных звезд и т. п. Точность определения положений наблюдаемых объектов посредством SUBARU около 0,01".

Оптические интерферометры

Оптический интерферометр состоит минимум из двух телескопов, синхронно наблюдающих один и тот же объект. В основе определения координат посредством оптической интерферометрии лежит явление интерференции (сложения) световых волн при условии их когерентности (т. е. согласованности по амплитуде и фазе). Этот принцип был реализован в простом двухэлементном интерферометре Майкельсона, основные идеи которого в различных модификациях присутствуют в современных наземных (и космических) проектах. Для получения координаты наблюдаемого объекта (звезды) оптический интерферометр должен измерять угол между направлением на звезду и вектором базы (вектором, соединяющим фокусы объективов двух телескопов). Для получения второй координаты необходима другая база, различно ориентированная от первой. Определение угла между объектом и базой выполняется путем измерения задержки прихода сигнала (по расположению интерференционных колец).

Разрешающая способность Δ интерферометра зависит от длины его базы D и определяется в соответствии с формулой:

$$\Delta = 1,22'' \cdot \lambda/D,$$

где λ – длина волны наблюдаемого диапазона.

При увеличении диаметра телескопа или базы интерферометра разрешающая способность может быть увеличена. Развитие волоконно-оптических средств связи привело к созданию *интерферометрических комплексов*, включающих большие телескопы с диаметрами зеркал до 8 м и базами до 200 м.

Современные крупнейшие оптические интерферометры:

- интерферометрический комплекс VLTI (ESO – Европейская южная обсерватория, Чили). Комплекс интерферометра включает 4 телескопа с зеркалами 8,2 м и базой 57–130 м, а также 2 вспомога-



Рис. 3.7. Комплекс КЕКІ-КЕКІІ

тельных телескопа диаметром 1,8 м. Здесь для исключения влияния турбулентности атмосферы применяется адаптивная оптика;

- комплекс КЕКІ-КЕКІІ (обсерватория Мауна Кеа, Гавайи, США) (рис. 3.7). Два крупных телескопа диаметром 10 м работают в режиме интерферометра Майкельсона с несколькими вспомогательными телескопами.

Имеются действующие наземные интерферометрические комплексы, связывающие десятки телескопов и проекты создания комплексов с базами до сотен метров (обсерватории Kitt Peak, Canary Islands, Cerro Tolo, La Silla, Mauna Kea и др.).

Оценивая в целом возможности оптических интерферометрических телескопов и комплексов для наземной астрометрии, можно говорить о предельной точности позиционных определений порядка $0,001''$, а с использованием активной оптики и больших интерферометрических комплексов с малым полем предел может быть отодвинут до $(10–100)'' \cdot 10^{-6}$.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к фундаментальным астрометрическим инструментам?

2. В каких системах координат устанавливаются классические астрооптические инструменты?

3. Сколько осей вращения имеет каждый оптический инструмент, перечисленный в подразд. 3.2.2?

4. Отличия современных оптических инструментов от классических.

5. Оптический интерферометр: принцип действия.

6. Приведите примеры действующих больших оптических телескопов и интерферометрических комплексов.

3.3. Создание фундаментальной и инерциальной систем координат

3.3.1. Общие положения

Инерциальная система координат – система, обладающая лишь прямолинейным и равномерным движением. Если для определения координат и скоростей тел используется классическая механика, то система отсчета должна быть инерциальной.

Фундаментальная система координат отличается от инерциальной наличием некоторого вращения. Фундаментальную систему координат иначе называют *квазиинерциальной*.

Небесная фундаментальная система – средняя экваториальная система (связанная со средним полюсом мира), обладающая лишь прецессионным движением. Небесная фундаментальная система координат закрепляется на небесной сфере данными *фундаментального каталога*, содержащими для некоторого числа звезд и некоторой эпохи значения экваториальных координат и их изменений. Эти данные позволяют воспроизводить среднюю экваториальную координатную сетку для любой эпохи.

Чтобы практически задать любую координатную систему, необходимо:

1) принять определенную *математическую модель* и развить ее теорию;

2) *реализовать* систему координат, привязав ее к реальным, физически существующим объектам (например, к ИСЗ, телам Солнечной системы, звездам, галактикам, квазарам).

Определить основные плоскости и оси системы отсчета можно двумя способами: *кинематическим* и *динамическим* [1].

Если существуют выбранные тела, координаты которых известны и постоянны, то с этими телами можно связать инерциальную систему координат. Это *кинематическое определение*. В действительности координаты небесных тел точно не известны из-за ошибок наблюдений и, кроме того, могут изменяться по ряду причин. В этом случае наилучшим приближением к инерциальной системе будет система, определяемая объектами, координаты которых известны с наилучшей точностью и искажены лишь случайными ошибками. В настоящее время наилучшей является система, задаваемая координатами внегалактических радиоисточников (ICRF). Наилучшей оптической реализацией квазиинерциальной системы является каталог звезд HIPPARCOS.

Систему координат можно определить *динамическим образом*, если в качестве тел выбрать тела солнечной системы, координаты которых определяются на основе уравнений движения. В простейшем случае – кеплеровском движении тела по эллиптической орбите относительно центрального тела – основная плоскость системы координат может быть определена плоскостью орбиты, которая в этом случае сохраняет свое положение в пространстве; ось z может быть определена как перпендикуляр к плоскости орбиты, а ось x , например, совпадать с большой полуосью эллипса. В действительности ни положение плоскости орбиты в пространстве, ни положение большой полуоси в плоскости орбиты не остаются постоянными из-за возмущений со стороны других тел солнечной системы, эффектов общей теории относительности. Поэтому динамическая система отсчета задается эфемеридами – таблицами положений Солнца, Луны и больших планет. В настоящее время широко используются эфемериды DE200/LE200, DE403/LE403 и DE405/LE405, вычисленные в Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL, США). Аналогичные по точности эфемериды EPM2004 разработаны в Институте прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН). Они используются в качестве эфемеридной основы в вычислениях эфемерид Солнца, Луны и больших планет при составлении Астрономических ежегодников.

Различные реализации координат можно классифицировать следующим образом [10]: *звездная* (фундаментальная, FK5), *планетная* (динамическая, DE405/LE405), *внегалактических радиоисточников* (ICRF – по РСДБ наблюдениям), *космическая* (HCRF – по наблюдениям с космического аппарата HIPPARCOS). Фундаментальный каталог FK6, принятый к использованию с 1998 г., является комбинацией результатов космических и наземных наблюдений звезд и квазаров.

3.3.2. Теоретические основы определения координат звезд и их изменений

3.3.2.1. Определение прямых восхождений и склонений небесных тел позиционным методом

Определение координат звезд традиционно выполняется либо позиционным методом (измерение направлений), либо фотографическим. В позиционном методе прямые восхождения и склонения светил определяются из наблюдений их прохождений через меридиан и из измерений их меридианных зенитных расстояний. Для наблюдений используются меридианные круги, вертикальные круги и пассажные инструменты. Методы схожи с методами геодезической астрономии – данные способы можно отнести к способам измерений в одном вертикале, когда горизонтальные углы не измеряются.

При прохождении светила через меридиан справедливы соотношения:

$$\delta = \phi \pm Z, \alpha = s = S + \lambda - \text{для верхней кульминации};$$

$$\delta = 180 - (\phi + Z), \alpha = s \pm 12^h = S + \lambda \pm 12^h - \text{для нижней кульминации}.$$

Таким образом, если на пункте с известными координатами ϕ, λ измерить зенитные расстояния Z звезд в меридиане и время прохождения S через меридиан, то можно найти положения звезд α, δ . На практике задаются приближенные координаты $\alpha_0, \delta_0, \phi_0, \lambda_0$. Далее из решения системы уравнений наблюдений определяются поправки к этим координатам: $\Delta\alpha, \Delta\delta, \Delta\phi, \Delta\lambda$. Кроме того, в систему уравнений наблюдений включаются параметры инструмента (в том числе величина внемеридианной установки инструмента).

Преимущества меридианных наблюдений:

- 1) наблюдения прямых восхождений и склонений независимы и их можно выполнять отдельно друг от друга;
- 2) ошибки наблюдений, искажающие прямое восхождение, не влияют на склонение и наоборот;
- 3) наблюдения производятся в одном вертикале, что обуславливает относительную простоту конструкции инструментов;
- 4) основные формулы обработки меридианных наблюдений просты, что облегчает определение различных параметров;
- 5) рефракция влияет только на склонение.

Однако остается сложным учет влияния на наблюдения инструментальных ошибок, изменения внешних условий, аномальной рефракции и других факторов. Необходимость строгого учета соответствующих поправок возрастает с повышением требований к точности наблюдений.

Существует два метода определения координат звезд: *абсолютный и относительный*. *Абсолютный метод* предполагает независимое определение координат звезд без использования точных координат из прежних наблюдений и требует специального исследования параметров инструмента. При *относительном, или дифференциальном методе* получают координаты определяемых звезд относительно координат опорных звезд, которые берутся из какого-нибудь фундаментального каталога. Параметры инструмента при этом определяют из анализа наблюдений опорных звезд.

Абсолютные определения прямых восхождений (времени прохождения через меридиан)

Определение прямых восхождений сводится к фиксации момента прохождения звезды через меридиан Т. Если учесть ошибки, возникшие из-за неправильной ориентировки инструмента и коллимации ΔT , а также поправку часов u , то прямое восхождение звезды будет определяться по формуле:

$$\alpha = T + u + \Delta T.$$

При определении абсолютных прямых восхождений основными являются три процесса.

1. Определение абсолютного азимута.

Абсолютный азимут определяется путем регулярных наблюдений прохождений Полярной в верхней и нижней кульминациях, с параллельными отсчетами мир и наблюдениями прохождений южных звезд для определения поправки часов. Наблюдения одной лишь Полярной для определения азимута не слишком выгодны, так как здесь может проявиться остаточное влияние неравенства цапф (систематической инструментальной погрешности). Поэтому целесообразно использовать наблюдения различных близполюсных звезд.

2. Выравнивание прямых восхождений внутри системы. Здесь накладывается условие $\sum \Delta \alpha = 0$ для всех звезд каталога.

3. *Определение начала координат* системы прямых восхождений – положения точки весеннего равноденствия.

При абсолютном методе определения прямых восхождений звезд необходимо наблюдать Солнце для фиксации положения точки весеннего равноденствия на небе относительно звезд. Кроме Солнца наблюдают планеты Солнечной системы и малые планеты, если элементы их орбит известны с достаточной степенью точности.

Из наблюдений Солнца можно найти его прямое восхождение $\alpha_{\odot}$, не зная прямых восхождений других светил, по формуле:

$$\sin \alpha_{\odot} = \operatorname{tg} \delta_{\odot} / \operatorname{tg} \varepsilon.$$

Склонение Солнца $\delta_{\odot}$ можно найти, измеряя зенитное расстояние Солнца в верхней кульминации $z_{\odot}$; наклон эклиптики к экватору ε определяется по теории движения Солнца.

Если при измерении зенитного расстояния Солнца отмечать по часам момент $T'_{\odot}$ прохождения Солнца через меридиан, то из уравнения

$$s = \alpha_{\odot} = T'_{\odot} + u$$

будет известна также поправка часов u для каждого дня наблюдений и ход часов w .

Таким образом, *абсолютный метод определения прямых восхождений* сводится к следующему. Выбирается несколько десятков звезд, расположенных более или менее равномерно вдоль эклиптики и небесного экватора, в том числе несколько ярких, чтобы каждую из них можно было бы наблюдать и днем, до или после наблюдений Солнца. Такие звезды называются главными, или часовыми.

При наблюдении часовых звезд отмечаются моменты их прохождения через меридиан $T'_1, T'_2, \dots, T'_n$. При наблюдении Солнца отмечается момент $T'_{\odot}$ его прохождения через меридиан и измеряется зенитное расстояние $z_{\odot}$. По измеренному зенитному расстоянию Солнца вычисляются его склонение $\delta_{\odot}$ и прямое восхождение $\alpha_{\odot}$ для каждого дня наблюдений в моменты его верхней кульминации. Далее вычисляются поправки часов на моменты наблюдений Солнца, а по ним – ход часов.

Для каждого дня наблюдений Солнца и часовых звезд составляются следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\alpha_{\odot} &= T'_{\odot} + u; \\ \alpha_1 &= T'_1 + u + w(T'_1 - T'_{\odot}); \\ \alpha_2 &= T'_2 + u + w(T'_2 - T'_{\odot}); \\ &\dots\dots\dots \\ \alpha_n &= T'_n + u + w(T'_n - T'_{\odot}).\end{aligned}$$

Из этих уравнений и определяются прямые восхождения Солнца и часовых звезд абсолютным методом. При этом выгоднее производить такие определения по наблюдениям, проведенным при небольших значениях абсолютной величины склонения Солнца, т. е. около дней весеннего и осеннего равноденствий.

Абсолютные определения склонений

Склонения звезд определяются *по измеренным зенитным расстояниям в меридиане*. При этом должны быть учтены все погрешности измерений – как инструментальные, так и рефракционные. Главной проблемой при определении склонений является независимое определение широты места. Обычно ее совмещают с определением поправки постоянной рефракции.

Данную задачу решают по измерениям зенитных расстояний множества звезд в верхней и нижней кульминациях. Для каждой звезды, наблюдавшейся в двух кульминациях, можно написать:

$$\begin{aligned}\delta_v &= \phi \pm z_v = (\phi_0 + \Delta\phi) \pm (z_{v0} + \Delta\rho_v) = \delta_{v0} + \Delta\phi \pm \Delta\rho_v; \\ \delta_n &= 180^\circ - (\phi + z_n) = 180^\circ - (\phi_0 + \Delta\phi) - (z_{n0} + \Delta\rho_n) = \delta_{n0} - \Delta\phi - \Delta\rho_n; \\ \delta_v - \delta_n &= 2\Delta\phi + (\rho_n \pm \rho_v) \Delta k/k,\end{aligned}\tag{3.1}$$

где δ_n , δ_v – склонения одной и той же звезды, вычисленные по наблюдаемым z_n , z_v с принятым значением широты ϕ_0 ; $\Delta\phi$ – поправка в принятое значение ϕ_0 ; $\Delta\rho_v$, $\Delta\rho_n$ – поправки за неучтенное влияние рефракции; Δk – поправка постоянной рефракции k .

Разность $(\delta_v - \delta_n)$ теоретически должна быть равна нулю. Поправки к широте находятся из обработки ряда наблюдений. Уравнения вида (3.1), составляемые по наблюдениям близполюсных звезд,

рассматриваются как уравнения поправок к принятому значению широты $\Delta\phi$ и постоянной рефракции Δk .

Относительные определения прямых восхождений и склонений

Относительные определения координат звезд сводятся к *измерению разностей координат определяемых и опорных звезд*. *Опорными звездами* здесь называются звезды фундаментального каталога, *определяемыми* – звезды, положения которых относительно фундаментальной системы следует определить.

Из наблюдений звезд в меридиане получают для каждой опорной и для каждой определяемой звезды моменты прохождения через меридиан T и T_i и зенитные расстояния z и z_i . При отсутствии погрешностей измерений разность моментов прохождений звезд после учета хода часов есть разность их прямых восхождений, т. е.

$$T - T_i = \alpha - \alpha_i = \Delta\alpha_i,$$

а разность зенитных расстояний есть разность склонений этих звезд, т. е.

$$z - z_i = \delta_i - \delta = \Delta\delta_i$$

(кульминация к югу от зенита),

$$z - z_i = \delta - \delta_i = \Delta\delta_i$$

(кульминация к северу от зенита).

Из этих соотношений получаются искомые координаты определяемой звезды, так как координаты опорной звезды известны.

3.3.2.2. Фотографический метод определения координат звезд

На фотографиях находятся положения *определяемых* звезд *относительно опорных*. Таким образом, фотографическим методом, в основном, определяются относительные положения звезд. Если измерения выполняются относительно внегалактических объектов, то определяются абсолютные положения.

При обработке фотографических наблюдений используют три различных вида координат: *экваториальные* (α , δ), *идеальные* (ξ , η) и *измеренные* (x , y) (рис. 3.8).

Экваториальные координаты звезд α , δ отнесены к эпохе соответствующего звездного каталога. В конкретных случаях они могут быть редуцированы к моменту наблюдений или к другой эпохе.

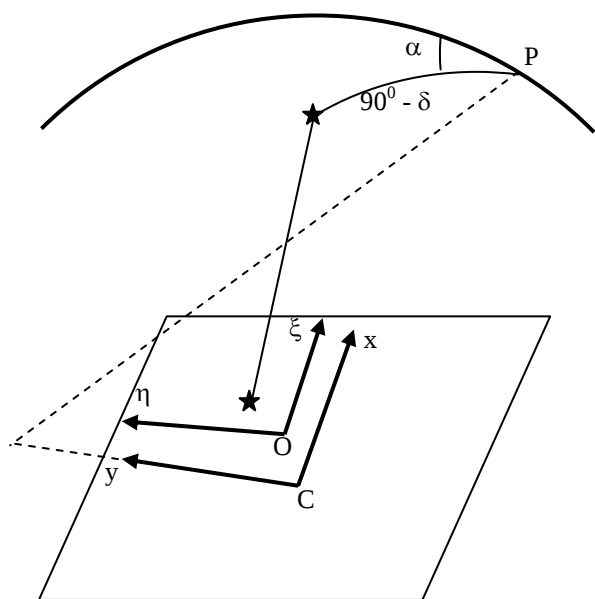


Рис. 3.8. Экваториальные, идеальные и измеренные координаты

Эти сферические координаты преобразуются в плоские на снимке по законам центральной проекции. Началом такой системы координат служит оптический центр снимка O . Ось $O\eta$ является изображением на снимке круга склонений. Положительное направление оси $O\xi$ соответствует возрастанию прямых восхождений. Эта система никак не зафиксирована на снимке и является лишь математическим описанием центрального проектирования сферической системы координат на

плоскость снимка, поэтому ее называют идеальной. Другие названия — тангенциальная, или стандартная.

Измерения на снимке ведутся относительно направлений осей координатно-измерительного прибора в системе $(хуС)$. За начало такой системы часто принимают геометрический центр снимка. Расхождение между координатами ξ , η и x , y обусловлены различными факторами, которые влияют на центральное проектирование (ошибки объектива, внешние влияния, ошибки установки осей астрографа и т. д.). Влияют также ошибки координатно-измерительного прибора и деформации фотоматериала.

Связь напрямую между экваториальными координатами объектов α , δ и их измеренными координатами не представляется возможной. Для установления этой связи используются идеальные координаты ξ , η . Здесь выполняется учет проекции, искажений снимка.

Средняя квадратическая ошибка положения звезды полученного в результате обработки астронегатива составляет $0,1-0,2''$ [9].

Описанные выше общие принципы получения координат звезд по изображениям звездного неба справедливы и для современных средств наблюдений. Использование больших телескопов и телеско-

пов-интерферометров, применение ПЗС-матриц, цифровая обработка изображений позволяют определять положения звезд с точностью $(0,01-0,1)'' \cdot 10^{-3}$.

3.3.2.3. Определение параллаксов и собственных движений звезд

Для измерения *годового параллакса* какой-либо звезды ее надо наблюдать из диаметрально противоположных точек земной орбиты (через полгода), а именно из тех точек, для которых параллактическое смещение по измеряемой координате должно быть наибольшее. Влияние годового параллакса π на координаты звезд определяется по формулам:

$$\alpha - \alpha_0 = \pi \cos \delta_{\odot} \sin(\alpha_{\odot} - \alpha_0) / \cos \delta_0 = \pi m;$$

$$\delta - \delta_0 = \pi [\sin \delta_{\odot} \cos \delta_0 - \cos \delta_{\odot} \sin \delta_0 \cos(\alpha_{\odot} - \alpha_0)] = \pi n,$$

где α_0, δ_0 – гелиоцентрические координаты звезды;

α, δ – геоцентрические координаты звезды;

$\alpha_{\odot}, \delta_{\odot}$ – координаты Солнца.

Данные формулы можно написать для первого наблюдения звезды в году в виде $\alpha_1 - \alpha_0 = \pi m_1$, $\delta_1 - \delta_0 = \pi n_1$, и для второго, тщательно учитывая при этом влияние на координаты всех других явлений (абберации, прецессии, нутации, собственного движения и т. д.): $\alpha_2 - \alpha_0 = \pi m_2$; $\delta_2 - \delta_0 = \pi n_2$. Тогда из двух измерений прямого восхождения и склонения можно вычислить параллакс:

$$\pi = (\alpha_2 - \alpha_1)/(m_2 - m_1), \quad \pi = (\delta_2 - \delta_1)/(n_2 - n_1).$$

В действительности измеряют не координаты звезды, а их изменения путем измерения положений исследуемой звезды относительно двух-трех близких к ней на небе опорных звезд с малыми параллактическими смещениями. К настоящему времени параллаксы более чем 100 тыс. звезд определены с помощью астрометрического спутника HIPPARCOS.

Годичные собственные движения звезд по прямому восхождению μ_{α} и склонению μ_{δ} определяются из меридианных и фотографических наблюдений положений звезд, выполненных в различные эпохи.

Пусть α_k , α_0 и δ_k , δ_0 – координаты одной и той же звезды, приведенные на эпоху и систему заданного каталога; t_k и t_0 – соответствующие эпохи наблюдений звезды; $\Delta\alpha_0$ и $\Delta\delta_0$ – систематические разности между заданным и текущим каталогом. Тогда можно составить уравнения поправок вида [3]:

$$\alpha_k - \alpha_0 = \Delta\alpha_0 + \mu_\alpha (t_k - t_0);$$

$$\delta_k - \delta_0 = \Delta\delta_0 + \mu_\delta (t_k - t_0)$$

с неизвестными $\Delta\alpha_0$, μ_α , $\Delta\delta_0$, μ_δ . При $k > 2$, когда звезда фигурирует во многих каталогах, эти уравнения решаются по способу наименьших квадратов. Практика показывает, что если в среднем $t_k - t_0 \approx 50$ лет, то собственные движения звезд получаются с точностью 0,003"/год.

3.3.3. Построение фундаментальной системы координат

3.3.3.1. Звездные каталоги положений и собственных движений. Систематические ошибки каталогов

Построение фундаментальной системы координат (ФСК) выполняется в два этапа:

- 1) построение целого ряда *исходных звездных каталогов*;
- 2) построение *фундаментального звездного каталога*, задающего фундаментальную систему координат на небесной сфере совместно с уточнением системы собственных движений звезд.

Каждый исходный каталог строится на основе определения координат звезд путем наблюдений на отдельном инструменте за небольшой интервал времени. Каждый исходный каталог имеет свою эпоху. Существуют два типа исходных каталогов – *абсолютные и относительные*.

В *абсолютных каталогах* экваториальные координаты звезд α , δ получены позиционными методами по наблюдениям прохождений звезд в меридиане. В *относительных каталогах* координаты звезд даются относительно опорных звезд, содержащихся в абсолютном каталоге. Исходной информацией для составления относительных каталогов являются разности координат $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ определяемых и опорных звезд. Здесь используются фотографические и позиционные методы. Относительный каталог воспроизводит систему координат опорного каталога и позволяет распространить ее на большое число

слабых звезд, что важно для практического применения системы координат, так как фундаментальная система закрепляется относительно малым числом ярких звезд.

Каталоги звезд содержат как случайные, так и систематические ошибки. Совокупность систематических ошибок каталога, искажающих координатную сетку, задаваемую этим каталогом, называется *системой каталога*. Поправки в координаты $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ за систему являются функциями α , δ , а также, если наблюдения выполнялись фотографическим или фотоэлектрическим методами, функциями блеска звезд (m) и спектрального класса (sp):

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_{\alpha} + \Delta\alpha_{\delta} + \Delta\alpha_m + \Delta\alpha_{sp};$$

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{\alpha} + \Delta\delta_{\delta} + \Delta\delta_m + \Delta\delta_{sp}.$$

Поправки к собственным движениям звезд $\Delta\mu_{\alpha}$, $\Delta\mu_{\delta}$ являются также функциями экваториальных координат:

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

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

Величины систематических поправок обычно составляют в среднем несколько сотых секунд дуги.

Для составления фундаментального каталога используются следующие исходные данные:

- n каталогов, из которых k – абсолютных, $(n - k)$ – относительных;
- $T_1 \dots T_n$ – эпохи равноденствий каталогов;
- $t_1 \dots t_n$ – эпохи их наблюдений;
- параметры прецессии;
- система собственных движений звезд.

Параметры прецессии и система собственных движений соответствуют системе фундаментального каталога.

Порядок решения задачи составления фундаментального каталога:

- 1) редуцирование (перевычисление) координат звезд на одну эпоху T_0 с учетом прецессии и собственных движений;
- 2) составление разностей координат общих звезд;
- 3) осреднение разностей;
- 4) поиск поправок к координатам $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ и собственным движениям звезд $\Delta\mu_{\alpha}$, $\Delta\mu_{\delta}$ каталога T_0 .

Результат решения задачи – вывод новой фундаментальной системы координат. Фундаментальные каталоги имеют обозначение FKN, где N – порядковый номер: FK3, FK4, FK5. В настоящее время используется фундаментальная система координат, заданная каталогом FK6 (см. подразд. 3.3.3.2).

3.3.3.2. Каталоги FK5, FK6, HIPPARCOS

Астрооптические фундаментальные каталоги FK1 – FK5

Первый фундаментальный каталог Ауверса (1879 г.), обозначение каталога FK, содержал 539 звезд и был составлен на основании восьми каталогов, причем наибольшую часть здесь составили Пулковские и Гринвичские наблюдения. Позднее составлялись и публиковались фундаментальные каталоги NFK, FK3, FK4 (табл. 3.1). Со временем повышалась точность каталогов, и увеличивалось количество звезд.

Таблица 3.1

Характеристики фундаментальных каталогов

Каталог	Эпохи каталога	Кол-во звезд	Точность положений звезд	
			по α	по δ
FK	J1870,0	539	0,03 ^s	0,5"
NFK	J1870,0 J1900,0	925	0,03 ^s	0,5"
FK3	J1900,0 J1950,0	873 осн. + + 662 доп.	0,002 ^s sec δ 0,005 ^s sec δ	0,03" 0,08"
FK4	J1975,0	1 535	(0,001–0,002 ^s)sec δ	0,02–0,03"

Последний каталог, составленный в 1988 г. на основе только астрооптических наблюдений – каталог FK5. Носители системы координат – 1 535 звезд, точность их положений того же порядка, как и в каталоге FK4: по прямому восхождению (0,001–0,002^s)sec δ , по склонению – 0,02–0,03". В линейной мере для Земли это соответствует величине 0,5 м, что не удовлетворяет современным требованиям к точности.

Основная плоскость системы FK5 задавалась экватором на стандартную эпоху J2000,0, а начало отсчета прямых восхождений – пересечением экватора с эклиптической на эпоху J2000,0. Согласно решению МАС эклиптика определялась динамическим образом на основании наблюдений тел солнечной системы.

Проблемы астрооптических каталогов:

1. FK5 на практике – результат экстраполяции ранее полученных данных на требуемую эпоху. При этом ошибки принятых собственных движений звезд приводят к тому, что с течением времени фундаментальные каталоги все менее точно воспроизводят систему небесных координат.
2. Фундаментальные каталоги, как правило, содержат малое число звезд. Наблюдения положений звезд должны периодически повторяться по все расширяющейся программе.
3. Большинство обсерваторий расположено в северном полушарии, поэтому южное небо изучено значительно хуже северного и, следовательно, система координат южного неба особенно нуждается в улучшении.
4. Атмосферные помехи существенно снижают точность каталогов.

Каталог HIPPARCOS

Hight Precision PARallax Collecting Satellite – спутник, собирающий параллаксы высокой точности.

Астрометрический спутник HIPPARCOS Европейского космического агентства (ESA) был запущен 8 августа 1989 г., передача данных выполнялась с ноября 1989 г. по март 1993 г. На спутнике установлен зеркальный телескоп, поле зрения которого около 1° . Здесь выполнялись измерения видимых взаимных расстояний между звездами. Телескоп медленно вращался с постепенным изменением направления оси вращения. Таким образом, все небо было осмотрено несколько раз. Измерены звездные величины и цвета свыше 1 млн. звезд. Открыто несколько тысяч двойных звезд.

ESA издало каталог HIPPARCOS в июне 1997 г. Он содержит 118 218 звезд, порог звездной величины $12,4^m$, точность по прямому восхождению α $0,77'' \cdot 10^{-3}$, по склонению δ $0,64'' \cdot 10^{-3}$. Систематическая ошибка астрометрических измерений менее $0,1'' \cdot 10^{-3}$. Положения звезд получены для равноденствия J2000,0 на среднюю эпоху каталога J1991,25 относительно квазаров в системе ICRF (см. подразд. 3.3.4.2). Согласование каталога HIPPARCOS с ICRF было выполнено со стандартной ошибкой $0,6'' \cdot 10^{-3}$ для ориентировки в эпоху 1991,25 и $0,25'' \cdot 10^{-3}/\text{год}$ для вращения.

Каталог FK6

По решению Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (МАС) с 1 января 1998 г. вместо FK5 была введена система фундаментального каталога FK6. Каталог является комбинацией результатов миссии HIPPARCOS и наземных наблюдений.

Положения 4 000 звезд каталога HIPPARCOS были перевычислены на равноденствие и эпоху J2000,0. Они образовали фундаментальный каталог FK6. Таким образом, каталог FK6 отличается от каталога FK5 иной реализацией, большим количеством звезд и более высокой точностью (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Характеристики каталогов FK5 и FK6

Каталоги	FK5	FK6
Система координат	Экватор и равноденствие на эпоху J2000,0, барицентрические положения звезд	
Реализация	Астрооптические наблюдения звезд (абсолютные и относительные)	Результаты работы астрометрического спутника HIPPARCOS – положения звезд относительно квазаров в системе ICRF
Количество звезд	1 535	4 000
Точность прямого Восхождения	$[(1-2^s) \cdot 10^{-3}] \cdot \sec \delta$	$0,77'' \cdot 10^{-3}$
Точность склонения	$(2-3'') \cdot 10^{-3}$	$0,64'' \cdot 10^{-3}$

Каталоги Астрономического ежегодника (АЕ) с 2004 г. содержат положения звезд в системе FK6.

3.3.4. Построение инерциальной системы координат

3.3.4.1. Уточнение теории прецессии и нутации.

Понятие небесного эфемеридного полюса

Теория прецессии и нутации, задающая параметры ориентации оси Мира (средней оси вращения Земли), постоянно уточняется. Теория прецессии МАС (1976 г.) и нутации МАС (1980 г.) была разработана на основе оптических наблюдений. Модель нутации МАС (1980 г.) содержит 106 членов разложения и основана на теории твердой Земли Киношита и геофизической модели Джильберта и Дзевонски (твердое

внутреннее ядро, жидкое внешнее ядро и распределение эластических параметров, выведенных по большому набору сейсмологических данных). Модель нутации IERS (1996 г.), определенная по наблюдениям ПВЗ, включает в себя по 263 члена нутации в долготе и в наклоне. И, наконец, модели нутации MAC 2000 и MAC 2000A содержат 678 членов лунно-солнечной нутации и 678 членов планетарной нутации. Новая теория основана на решении линеаризованного динамического уравнения с использованием данных, полученных по набору измерений РСДБ. В моделях нутации MAC 2000 направление на полюс обеспечивается с точностью $2'' \cdot 10^{-4}$. Здесь появились суточные и субсуточные члены. В резолюции В1.6 XXIV Генеральной Ассамблеи MAC (2000 г.) указывается, что новая теория нутации MAC 2000 должна применяться при астрономических вычислениях всеми пользователями, начиная с 1 января 2003 г. В то же время рекомендуется продолжить теоретические разработки новых теорий нутации неупругой Земли, продолжить РСДБ-наблюдения, чтобы увеличить точность вычисления нутационных углов, а также исследовать непредсказуемую субсуточную нутацию.

По решению XXVI Генеральной ассамблеи MAC (2006 г.), начиная с 1 января 2009 г. рекомендуется использовать новые теории прецессии IAU2006 и нутации IAU200A_R06. Новая модель прецессии согласуется с динамической теорией; в этой модели по данным РСДБ-измерений уточнены скорость прецессии и скорость изменения динамического сжатия Земли ΔJ_2 . В теорию нутации внесены небольшие поправки из-за изменений среднего наклона эклиптики к экватору ε_0 .

На основании теории прецессии и нутации устанавливается положение истинного полюса мира. Такой полюс называется *небесным эфемеридным полюсом (НЭП)*. Референц-ось, проходящая через НЭП, не совпадает с мгновенной осью вращения Земли и вектором кинетического момента и почти не имеет суточных колебаний ни в инерциальной, ни в земной системах. Степень удаления НЭП от истинного небесного полюса зависит от точности принятых моделей прецессии и нутации.

Вычисляемое на основе теории положение НЭП стало возможным оперативно уточнять по наблюдениям РСДБ. Смещения небесного полюса публикуются в МСВЗ в бюллетене А как поправки к нутации по долготе $\delta d\psi \sin \varepsilon$ и по наклону $\delta d\varepsilon$. Точность этих поправок $0,0005''$.

В связи с повышением точности наблюдений на Генеральной Ассамблее МАС в 2000 г. было принято расширенное определение НЭП. Для астрометрических задач, в которых требуется микросекундный уровень точности, с 1 января 2003 г. необходимо использовать *небесный промежуточный полюс* (НПП, англ. Celestial Intermediate Pole, CIP). Задание небесного промежуточного полюса связано с концепцией «невращающегося начала отсчета» (см. подразд. 3.3.4.4).

3.3.4.2. Построение инерциальной системы координат на основе наблюдений квазаров методами РСДБ. *Международная небесная система координат ICRS*

С 1 января 1998 г. по решению МАС определена *Международная небесная система координат* (International Celestial Reference System – ICRS), оси которой фиксированы по отношению к квазарам, причем направления осей согласованы с системой FK5. Начало – в центре масс Солнечной системы (барицентре), основная плоскость – средний экватор J2000.0. Новая система отсчета основывается на кинематическом принципе: считается, что оси системы остаются неподвижными относительно самых удаленных из известных объектов Вселенной.

Система ICRS реализуется через *Международную небесную опорную систему отсчета* (International Celestial Reference Frame – ICRF). ICRF содержит координаты 212 опорных радиоисточников. Для более плотного заполнения к ним добавлены 396 дополнительных источников, координаты которых измерены с худшей точностью. Создание новой системы отсчета стало возможным благодаря результатам 20-летних наблюдений на РСДБ. Направления осей установлены относительно квазаров с точностью не хуже $250'' \cdot 10^{-6}$. Постоянство направлений осей ICRF в пространстве основано на предположении, что внегалактические объекты не имеют никаких собственных движений.

Полюс системы ICRF согласуется с полюсом FK5 в пределах ошибок последнего ($\sigma_{\text{FK5}} = 50'' \cdot 10^{-3}$). Начало отсчета прямых восхождений системы ICRF близко к динамическому равноденствию J2000.0 и согласовано с системой FK5. Наблюдения на РСДБ показали, что средний небесный экватор на эпоху J2000,0 не совпадает с экватором системы ICRF. Причиной этого являются ошибки в теории нутации МАС 1980. В результате полюс $P_{\text{J2000,0}}$, соответствующий среднему экватору J2000,0, смещен относительно полюса ICRF (P_{ICRF}).

В соответствии с рекомендациями МАС и международного союза геодезии и геофизики (МГГС) МСВЗ (IERS) определяет и ежегодно публикует данные и стандарты небесной и земной систем координат.

Вторая реализация каталога ICRF-2 – совместный проект МАС, МСВЗ и международной РСДБ-службы, закончена к 2009 г. По сравнению с первой версией здесь наблюдается повышение точности ($100'' \cdot 10^{-6}$) за счет:

- увеличения числа наблюдательных данных;
- идентификации и учета нестабильности положений радиоисточников;
- улучшения методов обработки и моделей;
- анализа ошибок каталогов;
- расширения на другие диапазоны волн.

В 2010 г. начинает работу *международная РСДБ-система VLBI2010*, основная задача которой – уточнение небесной инерциальной системы координат; соответствующий каталог ICRF, составленный к 2015 г., должен иметь точность $30'' \cdot 10^{-6}$.

Следующее обновление в ICRF будет сделано в космосе. Европейское космическое агентство (ESA) планирует запустить спутник Gaia в 2012 г., который сможет наблюдать за полумиллионом квазаров. Аппарат будет оснащен оптическим телескопом, но атмосфера уже не будет помехой. Достаточное количество данных для системы ICRF следующего поколения будет собрано к 2018–2020 гг., ожидаемая точность каталога на порядок выше точности ICRF-2 – $10'' \cdot 10^{-6}$.

3.3.4.3. Земные геоцентрические системы координат

В *земных геоцентрических системах координат* начало помещается в центр масс Земли, направление координатных осей определяется положением полюса Земли, ее экватора и меридиана Гринвича.

Положение центра масс Земли. Определяется по наблюдению спутников, движущихся в гравитационном поле Земли. По рекомендациям IERS 1996 г., 2003 г. начало системы координат помещается в центр масс Земли, включая океаны и атмосферу. Исследования стабильности геоцентра выполнялись с применением геофизических моделей, с помощью лазерных измерений, GPS, DORIS. В результате выявлены годовые колебания центра масс с амплитудой около 4 мм по осям X, Y и 10 мм по оси Z; полугодовые, с периодами около 140 суток, 60–70 суток, 20 суток и 14 суток с амплитудами несколько миллиметров и погрешностями амплитуд почти такого же порядка. При-

чины смещения положения центра масс Земли – изменение уровня моря, изменения в ледяном щите (вековые смещения), тектонические смещения в земной коре (постледниковая отдача, движение тектонических плит и т. д.).

Полюс Земли. По решению МСВЗ был введен *Условный земной полюс* (УЗП). УЗП выбирается так, чтобы он находился недалеко от положения эфемеридного полюса, усредненного на некотором интервале времени. Одна из задач МСВЗ – определение координат полюса x_p , y_p , т. е. координат НЭП относительно УЗП. Средняя квадратическая погрешность определения x_p , y_p по данным МСВЗ – 0,0003"

Системы ITRS/ITRF

ITRS – International Terrestrial Reference System – международная земная система координат. Реализуется путем построения земной опорной основы ITRF (Frame), закрепленной сетью наземных пунктов с координатами, являющимися функциями времени.

Центр ITRS – в центре масс всей Земли, включая океаны и атмосферу. Единица длины – метр в системе SI, определенный по релятивистской теории гравитации. Ориентировка осей – в системе МБВ на эпоху 1984,0. ITRS является динамической системой: не имеет остаточной вращательной скорости в плане по отношению к земной коре, поскольку здесь учитывается движение тектонических плит (различные модели движения), в форме

$$R(T) = R(T_0) + V_0(T - T_0) + \Sigma \Delta R_i,$$

где $R(T_0)$ – положение пункта в эпоху T_0 ;

V_0 – скорость в эпоху T_0 ;

ΔR_i – подлежащие учету поправки за различные геофизические эффекты.

Реализацией ITRS является *земная опорная основа ITRF*, насчитывающая более 800 станций в более чем 500 пунктах. Последние реализации – ITRF2005 и ITRF2008 (с 31.05.2010 г.) содержат на заданную эпоху координаты станций, скорости их движения и параметры ориентации Земли. Для получения этих данных использовались многолетние ряды наблюдений методами космической геодезии: РСДБ, лазерной локации спутников и Луны, GPS и DORIS. Информация об ITRF и ее решения доступны на сайте <http://itrf.ign.fr/>. Этот сайт поддерживают две организации: Международная служба вращения Земли (МСВЗ, IERS) и Международная ассоциация геодезии (МАГ, IAG).

3.3.4.4. Барицентрическая и земная небесные системы отсчета (BCRS и GCRS).

Концепция невращающегося начала отсчета

В резолюции B1.3 XXIV Генеральной Ассамблеи МАС (2000 г.) определяются *барицентрическая* и *земная небесные системы отсчета* (BCRS и GCRS), которые должны использоваться при вычислении четырехмерных координат объектов при наблюдении из барицентра Солнечной системы и из центра Земли соответственно. Оси GCRS параллельны осям барицентрической системы ICRS, а начало совпадает с центром масс Земли. Временной шкалой GCRS является координатное время TCG. Геоцентрическая небесная система координат (GCRS) лежит в основе вычислений временных задержек сигналов при РСДБ наблюдениях квазаров, лазерных наблюдений спутников и Луны.

Вместо точки весеннего равноденствия в качестве начала отчета долгот в небесной и земной системах координат вводятся «*невращающиеся начала отсчета*» (или not-rotation Origin, NRO), концепция которых была предложена в работе [14]. Точки – новые начала отсчета – были названы *небесным эфемеридным началом* (Celestial Ephemeris Origin, CEO) для небесной системы и, соответственно, *земным эфемеридным началом* (Terrestrial Ephemeris Origin, TEO) для земной системы (резолюция B1.8). В резолюции определяется также «*угол поворота Земли*» θ (Earth Rotation Angle), который равен двугранному углу между началами CEO и TEO и измеряется вдоль экватора, соответствующего небесному промежуточному полюсу (НПП). Всемирное время UT1 линейно пропорционально θ . Преобразование координат вектора из земной системы ITRS в небесную систему GCRS определяется положением НПП в GCRS, положением НПП в ITRS и углом поворота Земли.

В основе концепции NRO лежат следующие соображения.

Классическое преобразование включает прецессионные z_A , θ_A , ζ_A и нутационные параметры $\Delta\psi$, $\varepsilon + \Delta\varepsilon$, гринвичское истинное звездное время. Эти параметры относятся к экватору и равноденствию даты и эклиптике даты. Однако современные системы, такие как РСДБ, GPS, лазерные дальномеры, используемые для изучения вращения Земли, практически не чувствительны к ориентации эклиптики и, значит, к положению точек равноденствий.

Кроме того, есть и другие недостатки классического преобразования. Во-первых, угол поворота Земли, называемый гринвичским

истинным звездным временем, определяется положением точки весеннего равноденствия γ_T . Следовательно, практически невозможно отделить неравномерности вращения Земли от движения мгновенного экватора в пространстве или смещения точки γ_T вдоль экватора из-за поворота эклиптики. Во-вторых, прецессия и нутация рассматриваются отдельно друг от друга, из-за этого определяются две матрицы **P** и **N**, хотя по природе это не независимые явления. В-третьих, повышение точности наблюдений требует новых, более точных методов редукции.

Выбор невращающегося начала отсчета в качестве оси x небесной системы координат приводит к вековому вращению системы. Это происходит потому, что по определению «невращающееся начало» NRO не имеет вращательного движения относительно мгновенного полюса. Но, если полюс имеет вековое движение относительно инерциальной системы, то и NRO будет двигаться вековым образом в пространстве. Скорость векового вращения небесного эфемеридного начала достаточно велика: примерно – $4,15''/\text{год}$.

Все сказанное справедливо и для земного эфемеридного начала. Последнее имеет вековое вращение, так как полюс в земной системе имеет хорошо известные чандлеровскую и годичную гармоника.

В результате, принимая концепцию NRO, приходится работать во *вращающихся* системах отсчета, что значительно усложняет уравнения динамики, в частности, уравнения небесной механики.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение инерциальной и фундаментальной системам координат и приведите примеры.
2. Назовите основные принципы определения прямых восхождений и склонений небесных тел позиционным методом.
3. Что значит абсолютные и относительные определения координат звезд?
4. Приведите примеры астрооптических фундаментальных каталогов и назовите их недостатки.
5. Как был получен фундаментальный каталог FK6?
6. Дайте определение небесного эфемеридного полюса.
7. В чем отличие ICRS от ICRF?
8. Почему реализация системы координат через положения квазаров точнее реализации через положения звезд?

9. Как определяются начало и направление координатных осей в земных геоцентрических системах координат?

10. Почему систему координат ITRS называют динамической системой?

3.4. Установление систем измерения времени и определение параметров ориентации Земли

3.4.1. Установление шкалы точного времени

Установление шкалы точного времени – одна из существенных частей установления систем координат и изучения вращения Земли. Задача решается в три этапа.

1. Установление шкалы времени, основывающейся на стабильном периодическом природном явлении (вращении Земли вокруг оси).

2. Создание высокоточных часов (стандартов частоты).

3. Регулярное сопоставление часов с периодическим природным процессом.

Построением шкал времени занимаются национальные службы времени и Международное Бюро времени, в России – Государственная служба времени и частоты (ГСВЧ).

Установление шкалы времени, основывающейся на суточном вращении Земли вокруг оси

Непосредственно из астрономических наблюдений может быть получено среднее солнечное время на Гринвиче UT0. По измеренному часовому углу Солнца $t_{\text{солнца}}$ оно вычисляется, как

$$UT0 = t_{\text{солнца}} - E - \lambda,$$

где E – уравнение времени,

λ – долгота пункта, на котором выполнялись наблюдения Солнца.

Так как наблюдения Солнца сопровождаются значительными ошибками измерений, то на практике UT0 определяется из точных наблюдений звезд. Сначала находится звездное время на Гринвиче:

$$S = \alpha + t - \lambda$$

или при меридианных прохождении звезд:

$$S = \alpha - \lambda.$$

Связь между звездным и средним солнечным временем определяется известными формулами:

$$S = UT0 + \mu UT0 + S_0;$$

$$UT0 = (S - S_0)(1 + \nu),$$

где S_0 – звездное время в гринвичскую полночь,

μ , ν – масштабные коэффициенты перехода от средних солнечных единиц времени к звездным и наоборот;

При установлении шкал времени используется время на среднем гринвичском меридиане $UT1$, *исправленное за движение земных полюсов*:

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda,$$

где поправка за положение полюса вычисляется по формуле:

$$\Delta\lambda = - (x_p \sin \lambda + y_p \cos \lambda) \operatorname{tg} \phi,$$

где x_p , y_p – координаты мгновенного полюса, отсчитываемые относительно общепринятого среднего полюса.

Создание высокоточных атомных часов

Международное атомное время (Time Atomic International – TAI) есть материальное воплощение идеально равномерной шкалы времени. Атомные стандарты частоты – сверхстабильные эталоны частоты, основанные на физическом явлении квантовых переходов между энергетическими уровнями атомов и молекул (см. подразд. 1.2.9). Точность воспроизведения атомной секунды – 10^{-12} – 10^{-14} с. Существуют реальные перспективы повышения точности до 10^{-16} – 10^{-17} с к 2010 г. [12].

Шкала международного атомного времени TAI строится международным бюро мер и весов (МБМВ) путем осреднения шкал атомного времени, формируемых на основе частоты ряда учреждений и лабораторий (служб времени) мира.

В России принята шкала атомного времени государственной службы времени и частоты (ГСВЧ) TA(SU) – Soviet Union.

Связь между шкалами TAI, TA(SU), UTC:

$$TAI - TA(SU) = 2,82724 \text{ с};$$

$$TA(SU) - UTC = 29,17276 \text{ с};$$

$$TAI - UTC = 32,00000 \text{ с}.$$

*Регулярное сопоставление высокоточных атомных часов
с периодическим природным процессом.*

Шкала всемирного координированного времени UTC

Для согласования наблюдаемого всемирного времени UT1 и строго равномерного времени TAI с 1964 года была введена равномерно-переменная шкала времени UTC – *всемирное координированное время* (см. подразд. 1.2.11).

Всемирное координированное время есть не что иное, как международное атомное время, скорректированное на целое число секунд для того, чтобы приблизительно соответствовать всемирному времени UT1, связанному с вращением Земли. Всемирное координированное время используется как практическая опора по всему миру, его использование, как и применение акронима UTC, одинакового на всех языках, рекомендовано международными организациями. Шкала UTC реализуется национальными лабораториями как UTC(k) и используется радиостанциями для передачи сигналов времени и частоты.

Разница (UTC – UT1) называется поправкой часов, характеризует неравномерность вращения Земли и является одной из компонент параметров ориентации Земли.

3.4.2. Определение параметров ориентации Земли

3.4.2.1. Общие положения

К *параметрам ориентации Земли* (ПОЗ) относятся следующие величины:

- разность между всемирным временем UT1 и всемирным координированным временем UTC: $UT1 - UTC = U$, иначе говоря, поправка часов;
- D – эксцесс длительности суток – разница между действительной и средней продолжительностями суток;
- x_p, y_p – координаты НЭП относительно УЗП;
- $d\psi, d\epsilon$ – короткопериодические члены нутации в долготе и наклоне.

Параметры ориентации Земли регулярно определяются на основе наблюдений Международной службой вращения Земли.

Набор параметров (UT1 – UTC), x_p, y_p , характеризующий неравномерность вращения Земли и движение земного полюса, иначе называют *параметрами вращения Земли*.

Поправка часов, или эксцесс длительности суток, координаты полюса определяются астрооптическими методами: SLR, LLR, GPS/ГЛОНАСС; короткопериодические члены нутации определяются методами РСДБ.

Потребителями информации о параметрах ориентировки Земли являются национальные службы времени, астрономические обсерватории, станции Международной геодинамической сети IGS, военные службы, центры контроля и управления космическими аппаратами (в том числе глобальные навигационные спутниковые системы ГЛОНАСС, GPS, GALILEO) и др.

В России определением ПВЗ занимается Государственная служба времени и частоты; несколько десятков станций по всему миру доставляют сведения для Международной службы вращения Земли (International Earth Rotation Service, IERS). Параметры ориентации Земли публикуются в специальных бюллетенях на эпоху наблюдения.

3.4.2.2. Принципы определения параметров вращения Земли по наблюдению звезд

Определение параметров вращения Земли по наблюдению звезд состоит в определении мгновенной широты ϕ и времени UT0 прохождения звезды через мгновенный меридиан или заданный альмуканторат методами геодезической астрономии. При этом используются пассажный инструмент, призменная астролябия, фотографическая зенитная труба, циркумзенитал. Несмотря на частичную или полную автоматизацию измерений и вычислений, астрооптические методы ограничены по точности (главным образом, из-за атмосферных помех): 0,01'' предел точности определения координат полюса; 0,001s – предел точности определения поправки часов. В настоящее время на смену астрооптическим методам определения параметров вращения Земли пришли методы космической геодезии.

Определение поправки часов с помощью пассажного инструмента

При определении поправки часов измеряется момент прохождения светила через меридиан. При установке прибора точно в меридиане соблюдается условие:

$$T + U - \alpha = 0, \quad (3.2)$$

где T – наблюдаемый момент прохождения светила;

U – поправка часов;

α – прямое восхождение.

В действительности инструмент устанавливается с погрешностью, поэтому формула (3.2) дополняется и принимает вид:

$$T + U - \alpha + a \sin Z \sec \delta + b \cos Z \sec \delta \pm c \sec \delta = 0, \quad (3.3)$$

где a – малый азимут инструмента;

b – наклон горизонтальной оси;

c – коллимация.

Формула (3.3) носит имя *Майера*, разработавшего теорию пассажного инструмента.

Наблюдения прохождений светил производятся с перекладкой трубы при двух положениях инструмента, с отсчетами подвесного уровня до и после наблюдений. Влияние коллимации исключается при использовании приведенной методики. Наклон горизонтальной оси b вычисляется по отсчетам уровня с условием неравенства диаметров. Поправка часов и азимут находятся из решения системы уравнений наблюдений (3.3) по методу наименьших квадратов.

Определение поправки часов и координат полюса с помощью астробии Данжона

Астробия Данжона предназначена для наблюдения звезд на равных высотах ($Z_{\text{эф}} = 45^\circ$ или $Z_{\text{эф}} = 30^\circ$); здесь автоматически регистрируются моменты T прохождения звезд через альмукантарат. По теории зенитальных способов астрономических определений уравнение поправок для каждого наблюдения звезды имеет вид:

$$Z' - (Z_{\text{эф}} + \zeta) = v,$$

где ζ – поправка к эфемеридному значению $Z_{\text{эф}}$;

Z' – измеренное значение зенитного расстояния. Оно определяется по формуле:

$$Z' = Z_{\text{эф}} - \Delta Z + \Delta \rho,$$

где $\Delta Z = -\cos A \Delta \phi - 15 \sin A \cos \phi_0 \Delta t$ – поправка в измеренное зенитное расстояние;

$\Delta \rho$ – неучтенное влияние рефракции;

$\Delta \phi$ – поправка к приближенному значению широты ϕ_0 .

Поправка к часовому углу Δt :

$$\Delta t = (T + U - \alpha) - t_0,$$

где приближенное значение часового угла t_0 вычисляется из решения параллактического треугольника по теореме косинусов.

Окончательно *уравнение поправок для наблюдений звезд на астеролябии Данжона* имеет вид:

$$-\zeta + \cos A \Delta\phi + 15 \sin A \cos \phi_0 U + 15 \sin A \cos \phi_0 (T - \alpha - t_0) + \Delta\rho = v. \quad (3.4)$$

Из решения системы уравнений поправок (3.4) оцениваются ζ , $\Delta\phi$, U , $\Delta\rho$. Координаты полюса x_p , y_p находятся на основании вычисленных поправок $\Delta\phi$ к приближенной широте наблюдаемого пункта (см. подразд. 1.3.8) из решения системы уравнений вида:

$$\Delta\phi = x_p \cos \lambda - y_p \sin \lambda.$$

3.4.2.3. Принципы определения параметров вращения Земли методами космической геодезии

Впервые определения параметров вращения Земли космическими методами были выполнены при реализации международного проекта MERIT (1980–1984 гг.). Международная служба вращения Земли (IERS – International Earth Rotation Service), функционирующая с 1988 г., основана только на использовании космических методов и средств: лазерной локации спутников и Луны, радиотехнических методов (доплеровских, ГНСС, ГЛОНАСС), РСДБ.

Принцип определения ПВЗ методами космической геодезии заключается в следующем. Координаты полюса и поправка часов выступают в качестве параметров, устанавливающих взаимное положение двух систем координат, которыми являются:

1) небесная система координат $ox'y'z'$, относящаяся к эпохе наблюдений (ось Oz' – в небесный эфемеридный полюс, ось Ox' – в истинную точку весеннего равноденствия);

2) средняя земная система координат $oxuz$ (ось Oz – в условный земной полюс, ось Ox – в точку пересечения плоскости начального меридиана со средним экватором Земли (плоскости, перпендикулярной линии Oz)).

Связь между двумя системами координат устанавливается соотношениями:

$$\mathbf{r}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{S} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{r},$$

где $\mathbf{S}$ – матрица поворота в плоскости XOY от направления на точку гамма до направления на точку пересечения плоскости начального меридиана со средним экватором Земли;

$\mathbf{P}$ – матрица учета положения мгновенного полюса Земли относительно УЗП:

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}_3(-S) = \begin{bmatrix} \cos S & -\sin S & 0 \\ \sin S & \cos S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{bmatrix}.$$

Координаты полюса x_p, y_p содержатся в матрице $\mathbf{P}$, а поправка часов $u = UT1 - UTC$ входит в звездное время $S = (UTC + u)(1 + \mu) + S_0$.

Чтобы составить параметрические уравнения связи, следует преобразовать координаты спутника из небесной системы координат в земную, учитывая координаты полюса и неравномерность вращения Земли.

Наблюдения спутников позволяют определить взаимное положение наибольшей главной оси инерции и мгновенной оси вращения Земли. При этом необходима точность измерения расстояний лучше, чем 2–3 см; с такой же точностью должна быть известна орбита.

Для решения задачи определения параметров вращения Земли необходимо:

- учесть все возмущения в движении ИСЗ или Луны;
- выполнить точные траекторные измерения;
- иметь точную реализацию системы координат, жестко связанную с Землей (ITRF – учет приливов, движения литосферных плит и т. д.).

3.4.3. Организация службы времени, частоты и определения параметров ориентации Земли

В России определение времени и ПВЗ, в соответствии с законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» и Постановлением правительства РФ от 23 марта 2001 г., осуществляется

коллективными усилиями научно-исследовательских организаций Госстандарта, министерства обороны, образования, академии наук и др. Оперативное обеспечение работ возложено на Главный метрологический центр (ГМЦ) ГСВЧ. В обязанность ГСВЧ вменено осуществление научно-технической и метрологической деятельности по непрерывному воспроизведению и хранению национальной шкалы времени РФ, эталонных частот, по определению параметров вращения Земли, по обеспечению единства измерений в этой области. Информация ГСВЧ о значениях времени, частоты и ПВЗ является обязательной для использования на территории РФ (пункт 10 Положения о ГСВЧ).

Межведомственной комиссией по времени и эталонным частотам для Государственной службы времени была утверждена *концепция ее развития* к 2010 г. [12]. Ключевые мероприятия Концепции:

- повышение точности Госэталона времени и частоты более чем в 10 раз (10^{-14} – 10^{-15} с) с помощью создаваемого комплекса первичного цезиевого эталона частоты нового поколения типа «Фонтан» и создания научного и технологического задела для достижения точности 10^{-16} – 10^{-17} с к 2011 г.;

- повышение надежности и устойчивости непрерывного функционирования систем и аппаратурных комплексов ГСВЧ;

- поддержка работ по созданию Российской системы РСДБ («Квазар»);

- поддержка создания отечественной сети лазерных дальномерных станций на пунктах ГСВЧ;

- поддержка Федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система» по развитию и эффективному использованию КНС ГЛОНАСС как главного и самого точного средства передачи национальной шкалы времени в глобальном масштабе.

Организация службы времени в России

В институте метрологии времени и пространства (ИМВП) ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, расположен Первичный эталон частоты (Государственный атомный эталон времени и частоты – ГЭВЧ). Это цезиевый стандарт частоты, предназначенный для хранения 1 с СИ на основе колебаний атома цезия. Кроме того, там же расположены альянс (группа) водородных стандартов частоты (с периодическим сличением, осреднением для контроля и хранения секунды), группа кварцевых часов, вспомогательная электронная аппаратура.

Вторичные эталоны частоты (альянсы водородных стандартов) расположены в нескольких НИИ Метрологии в России. Связь между первичным и вторичными эталонами осуществляется по радио, посредством наблюдения спутников GPS-ГЛОНАСС и другими методами. Сигналы точного времени передаются потребителям по радио на определенных частотах.

Определение параметров ориентации Земли

В настоящее время в ГМЦ ГСВЧ текущие значения ПВЗ вычисляются путем комбинированной обработки независимых рядов данных астрооптических, спутниковых (лазерная локация и GPS) и РСДБ-наблюдений. Вычисления ПВЗ по фазовым измерениям сигналов GPS/ГЛОНАСС проводятся в ГМЦ ГСВЧ по данным непрерывно действующих приемников на территории России и других стран СНГ (в настоящее время их насчитывается около 40). Для вычисления ПВЗ по данным лазерной локации спутников Lageos1&2 привлекаются, в основном, наблюдения зарубежных станций. Данные РСДБ-наблюдений берутся, в основном, из международного центра CDDIS (NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA), а также используются РСДБ-наблюдения сети «Квазар-КВО». Точность получаемых по совокупности всех измерительных средств значений ПВЗ, публикуемых в официальных бюллетенях ГСВЧ, сейчас составляет около 0,2 мс – по всемирному времени и 0,001" – по координатам полюса.

В Институте прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) служба параметров вращения Земли поддерживается лабораторией космической геодезии и вращения Земли. В настоящее время служба ПВЗ ИПА вычисляет оперативные и долговременные ряды ПВЗ по РСДБ-, SLR- и GPS-наблюдениям. Вычисляемые данные регулярно представляются в международную службу вращения Земли IERS и IVS (международная РСДБ-служба) и используются ими для вычисления сводных оперативных и окончательных решений. Результаты вычислений ПВЗ за предшествующий месяц также публикуются в бюллетенях службы ПВЗ ИПА РАН (www.ipa.nw.ru).

В международном плане координацию работ по определениям ПВЗ, их совместную математическую обработку и публикацию официальных данных осуществляет Международная служба вращения Земли IERS. В сферу ее деятельности входит практическая реализация общеземной и небесной систем координат и установление их вза-

имной ориентировки (т. е. параметров ориентации Земли (ПОЗ)). Эта работа ведется на основе документа «IERS Conventions» [13], содержащего согласованные данные обо всех константах, моделях и параметрах, связанных с определениями ПОЗ.

Контрольные вопросы

1. Назовите этапы в процессе установления шкалы точного времени. Приведите примеры.
2. Перечислите параметры ориентации Земли. Какими методами они определяются?
3. Принципы определения параметров вращения Земли методами космической геодезии.
4. Назовите основные функции Международной службы вращения Земли (IERS).
5. Как организована служба времени и определения ПВЗ в России?
6. Какими методами определяются ПВЗ в настоящее время в России?

3.5. Фундаментальные астрономические постоянные

3.5.1. Общие положения

Формулы, описывающие движение небесных тел, содержат большое число постоянных величин, которые должны быть определены из наблюдений или экспериментов. Например, это массы и размеры планет, компоненты угловой скорости их вращения, элементы их орбит и т. п. Очевидно, значения этих величин зависят как от совокупности наблюдений, по которым они определены, так и от системы формул, описывающих движение небесных тел. Таким образом, каждая новая теория или даже каждое новое наблюдение требуют пересмотра всей совокупности постоянных величин.

Система фундаментальных астрономических постоянных (ФАП) есть совокупность полученных из наблюдений и согласованных на основе теории тяготения значений параметров, характеризующих движение Земли и ее тело.

В качестве *системы единиц* применяются астрономические единицы времени, массы и длины, однозначно выражаемые через единицы Международной системы SI (секунда, килограмм, метр); система SI в астрономии не применяется вследствие ее неудобства.

Астрономическая единица времени – интервал времени в одни сутки (D), содержащий 86 400 средних секунд в шкале TAI; интервал времени 36 525 суток – одно юлианское столетие. В настоящее время иногда используют и юлианское тысячелетие (10 юлианских столетий).

Астрономическая единица массы – масса Солнца (S). Масса Солнца (выводимая постоянная) в килограммах определяется отношением гелиоцентрической солнечной постоянной к гравитационной постоянной тяготения.

Астрономическая единица длины («астрономическая единица» – а. е.) – расстояние (A), для которого гауссова гравитационная постоянная принимает значение, равное

$$k = 0,01720209895,$$

когда за единицы измерения выбраны астрономические единицы времени, массы и длины. Гауссова гравитационная постоянная вычисляется по формуле $k = (GS)^{1/2}$, где G – гравитационная постоянная, S – масса Солнца, При этом размерность k^2 совпадает с размерностью G.

Методы определения фундаментальных астрономических постоянных:

- на основании анализа рядов астрометрических наблюдений;
- свето- и радиолокация Луны, планет и ИСЗ;
- анализ движения ИСЗ;
- РСДБ;
- физические методы и т. д.

Применение астрономических постоянных:

- в астрономии и геодезии – все редуцированные вычисления, в том числе вычисления в Астрономическом ежегоднике;
- в небесной механике – при решении практических задач по изучению движения тел Солнечной системы;
- в космонавтике – для вычисления траекторий и анализа условий полета космических аппаратов;
- в геодезии, геофизике, метеорологии и других смежных науках.

3.5.2. Классификация фундаментальных астрономических постоянных

Совокупность фундаментальных астрономических постоянных определяет *три группы характеристик*.

1. *Геометрические характеристики* Земли, системы Земля–Луна, орбиты центра масс этой системы:

- экваториальный радиус Земли;
- среднее расстояние между центрами масс Земли и Луны и связанный с этой характеристикой параллакс Луны;
- величина астрономической единицы и связанный с ней параллакс Солнца;
- средний наклон эклиптики к экватору и т. д.

2. *Кинематические характеристики* поступательно-вращательного движения Земли и движения Луны по орбите:

- общая прецессия по долготе;
- постоянная лунно-солнечной прецессии;
- постоянная нутации;
- постоянная абберации и т. д.

3. *Динамические свойства* Земли и параметры, обусловленные ее взаимодействием с Солнцем и Луной:

- геоцентрическая и гелиоцентрическая постоянные тяготения;
- сжатие Земли;
- отношения масс и т. д.

В настоящее время к последней группе можно отнести масштабные коэффициенты преобразования между различными шкалами времени.

По *методу задания* фундаментальные астрономические постоянные разделяются на три класса:

- 1) *определяющие* – постоянные, выбираемые произвольно;
- 2) *основные* – постоянные, определяемые независимо на основе наблюдений;

3) *производные (выводимые)* – связаны математическими соотношениями с определяющей и основными постоянными. В целях согласования всей системы постоянных они могут быть просто вычислены.

В системе астрономических постоянных одна *определяющая* – *Гауссова гравитационная постоянная* $k = 0,01720209895$. Она была получена Гауссом в 1809 г. по третьему закону Кеплера при тогдашних значениях периода обращения центра масс системы Земля–Луна, суммы масс Земли и Луны и большой полуоси орбиты центра масс системы Земля–Луна, принимаемой за единицу. Данная величина применялась в течение всего XIX столетия во всех вычислениях, теориях и таблицах движения небесных тел. После уточнения значений

упомянутого периода обращения и масс Земли и Луны оказалось, что большая полуось орбиты центра масс системы Земля–Луна при гауссовом значении k уже не будет равняться единице. Тогда было принято решение (МАС, 1938 г.) зафиксировать гауссово значение k и оставить его впредь без изменений; большую же полуось орбиты центра масс системы Земля–Луна тогда можно вычислить по третьему закону Кеплера при фиксированном значении k :

$$a = \left(\frac{1}{2\pi} \cdot kT \sqrt{1 + M_3 + M_{\text{Л}}} \right)^{2/3}.$$

Понятно, что по мере уточнения T , M_3 , $M_{\text{Л}}$ значение a также будет меняться, и за астрономическую единицу это значение уже принять нельзя.

Единичное расстояние A – астрономическая единица (а. е.) – раньше определялась через экваториальный горизонтальный параллакс Солнца, находимый из наблюдений. Затем (с начала XX в.) с целью повышения точности это расстояние определяли по наблюдениям малых планет как тригонометрическим методом, так и динамическим, основанным на равенстве центробежной силы, приложенной к центру масс системы Земля–Луна и силе притяжения, приложенной к той же точке. С конца 50-х начала 60-х гг. XX в. астрономическую единицу стали определять с помощью радиолокации внутренних планет, в результате чего точность определений заметно повысилась.

При радиолокационных измерениях, когда определяется запаздывание сигнала (либо доплеровское смещение частоты), масштаб определяется принятым значением скорости света c , определяемой независимо физическими методами и являющейся одной из основных фундаментальных постоянных.

С другой стороны, скорость света определяет постоянную абберации, определяемую из астрономических наблюдений. Ее значение по точности астрономов давно не удовлетворяет.

Поэтому в настоящее время за *основную фундаментальную постоянную*, определяющую масштаб при заданном значении скорости света, принимается так называемый *световой промежуток τ_A* для единичного расстояния A (абберационное время), такой, что $A = c \cdot \tau_A$, причем единичное расстояние A (а. е.) – радиус круговой гауссовой орбиты, по которой движется «нулевая» масса. Единичное расстояние A тем самым относится к *производным постоянным*.

3.5.3. Международная система астрономических постоянных

На XVI Генеральной Ассамблее МАС 1976 г. была принята *международная система астрономических постоянных*. Она используется для вычисления эфемерид и астрономических ежегодников, начиная с 1984 г. В системе 1976 г. осталась одна определяющая постоянная – гауссова гравитационная постоянная, десять основных, восемь выводимых постоянных и массы девяти больших планет и Солнца. Новой стандартной эпохой равноденствия в системе 1976 г. является эпоха 2000, январь 1,5, что соответствует юлианской дате JD2451545,0, обозначаемой как J2000,0. В формулах вычисления прецессионных параметров в качестве единицы времени используется юлианское столетие, в отличие от прежних систем, где использовалось тропическое столетие.

В прил. 1 приведены значения фундаментальных астрономических постоянных, принятых МАС 1976 г.: определяющей, основных и производных.

За прошедшие годы решений об изменении системы постоянных не было. Поэтому в настоящее время должна использоваться система постоянных 1976 г., утвержденная МАС. Однако уже в начале 80-х гг. точность наблюдений повысилась настолько, что потребовалось при их редукции использовать новые, более точные значения постоянных. Международная служба вращения Земли начала использовать новые значения и новые алгоритмы редукции. Так называемые «Стандарты» или «Соглашения» МСВЗ были выпущены в 1989 г., 1992 г., 1996 г. и 2003 г. В соглашениях приводятся определения основных систем координат, значения постоянных, которые должны использоваться при обработке наблюдений, описываются методы вычисления различных поправок к координатам станций, указывается, какие эфемериды, модели геопотенциала необходимо использовать.

В связи с этим на Генеральной Ассамблее МАС в 1994 г. было принято решение о сохранении системы МАС 1976 г. как долговременной основы для вычислений в астрономии. В то же время некоторые постоянные, значения которых будут определены более точно, будут периодически заменяться, как это делается в МСВЗ.

Аналогичные решения приняты и Международной Ассоциацией Геодезии (МАГ), которая сохранила Геодезическую систему отсчета (Geodetic Reference System) 1980 г. как основу для геодезических вы-

числений. Численные значения отдельных постоянных могут быть изменены, при этом сама система не меняется. Так как МАГ публикует свой список параметров, общих для астрономии, геодезии и геодинамики (Parameters of Common Relevance of Astronomy, Geodesy, and Geodynamics), то это приводит к путанице, так как постоянные МАГ и постоянные МАС не согласованы друг с другом. Например, числовые значения экваториального радиуса Земли a_E являются разными, что связано с различными способами учета поправок за приливы. Рекомендованное МАГ значение большой полуоси Земли относится к эллипсоиду, соответствующему так называемой поверхности «средней» коры для геодезических и поверхности «нулевого прилива» для гравиметрических измерений: $a_E = 6\,378\,136,62 \pm 0,10$ м (резолюция XVIII Генеральной Ассамблеи МАГ). Это значение должно использоваться и при астрономических вычислениях. Вопреки этой резолюции при астрономической редукции используется значение $a_E = 6\,378\,136,3$ м, определяющее кору Земли, «условно свободную от приливов». Именно в этой системе приводятся координаты станций, задающие земную систему координат.

При обработке наблюдений искусственных спутников Земли рекомендуется использовать модель геопотенциала EGM2008, для которой $a_E = 6\,378\,136,3$ м и $GM_\oplus = 3,986004415 \times 10^{14} \text{ м}^3 \text{ с}^{-2}$ (в «ТТ»-единицах).

В прил. 2 приведены астрономические постоянные, включенные в стандарты МСВЗ 2003 г. (IERS Conventions 2003). Эти постоянные согласованы для использования с геоцентрическим координатным временем TCG, которое является временной координатой для геоцентрической системы, или с барицентрическим координатным временем TCB, которое является временной координатой для барицентрической системы. Значения постоянных τ_A и σ_A приводятся в «TDB»-единицах. Координаты пунктов в системе ITRF приводятся в «ТТ»-единицах.

Контрольные вопросы

1. Назовите астрономические единицы времени, массы, длины.
2. К каким группам характеристик относятся постоянная аберрации, астрономическая единица, сжатие Земли. Обоснуйте ответ.
3. Какая фундаментальная постоянная определяет масштаб при заданной скорости света?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жаров В.Е. Сферическая астрономия. – М.: Век-2, 2006. – 480 с.
2. Астрономический ежегодник на 2010 год. – Спб.: Наука, 2009. – 685 с.
3. Абалакин В.К. и др. Геодезическая астрономия и астрометрия: справочное пособие / В.К. Абалакин, И.И. Краснорылов, Ю.В. Плахов. – М.: Картцентр-Геодезиздат, 1996. – 435 с.
4. Гиенко, Е.Г., Канушин В.Ф. Геодезическая астрономия: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2006. – 137 с.
5. Уралов С.С. Курс геодезической астрономии: учебник для вузов. – М.: Недра, 1980. – 592 с.
6. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. – М.: Недра, 1966.
7. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации. ГКИНП (ГНТА) – 01-006-03. – М.: ЦНИИГАиК, 2004. – 28 с.
8. Глазунов А.С. и др. Полевой астрономический оптико-электронный комплекс / А.С. Глазунов, Д.Н. Голдобин, В.В. Коржиков // ГЕО-Сибирь-2007. Т. 1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч. 2: сб. матер. III Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2007», 25–27 апреля 2007 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 231–233.
9. Подобед В.В., Нестеров В.В. Общая астрометрия. – М.: Наука, 1982. – 576 с.
10. Илясов, Ю.П. Пульсарное время. – Труды ИПА РАН. – М.: Наука, 2007. – Вып. 17. – С. 27–41.
11. Пинигин Г.И. Телескопы наземной оптической астрометрии: учеб. пособие. – Николаев: Атолл, 2000. – 104 с.
12. Костромитин В.П. и др. Концепция развития Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли на период до 2010 года / В.П. Костромитин, П.А. Красовский, В.Н. Крутиков // Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение: тезисы Всероссийской конференции КВО-2005. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 39–40.
13. IERS Conventions 2003. D.D. McCarthy, G. Petit (eds.) IERS Tech. Note 32. IERS Conventions Centre, 2004.
14. *Capitaine, N., Guinot, B., and McCarthy, D. D.* Definition of the Celestial Ephemeris origin and of UT1 in the International Reference Frame. *Astron. Astrophys.*, 2000, 355, 398–405.
15. *Wallace, P.T. and N. Capitaine.* «Precession-nutation procedures consistent with IAU 2006 resolutions.» *Astronomy & Astrophysics*, 2006, Vol. 459, pp. 981–85, + Online Material p. 1–4.

**Система фундаментальных
астрономических постоянных МАС 1976 г.**

№ п/п	Название постоянной	Обозначение	Значение постоянной	Пределы истинно- го значения
Определяющая постоянная				
1	Гауссова гравитационная постоянная	K	0,01720209895	—
Основные постоянные				
2	Скорость света в м/с	C	299 792 458	299 792 456,8 299 792 459,2
3	Астрономическая единица в с	τ_A	499,004782	499,004776 499,004788
4	Экваториальный радиус Земли в м	a_E	6 378 140	6378135 6378145
5	Динамический коэффициент сжатия Земли	J_2	0,00108263	0,00108262 0,00108264
6	Геоцентрическая постоянная тяготения в $\text{м}^3/\text{с}^2$	$GM_{\oplus}$	$3,986004415 \times 10^{14}$	$3,9860020 \times 10^{14}$ $3,9860028 \times 10^{14}$
7	Постоянная тяготения в $\text{м}^3 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-2}$	G	$6,672 \times 10^{-11}$	$6,668 \times 10^{-11}$ $6,676 \times 10^{-11}$
8	Отношение масс Земли и Луны	μ	$1/81,30068 =$ $= 0,01230002$	0,01230006 0,01229997
9	Общая прецессия в долготе для юлианского столетия (2000,0)	p_1	5029,0966"	5028,95" 5029,25"
10	Наклон эклиптики к экватору (2000,0)	ε_0	23°26'21,448"	23°26'21,35" 23°26'21,55"
11	Постоянная нутации (2000,0)	N	9,2109"	9,200" 9,211"

№ п/п	Название постоянной	Обозначение	Значение постоянной	Пределы истинного значения
Выводимые постоянные				
12	Астрономическая единица в м	$A = c \tau_A$	$1,49597870 \times 10^{11}$	$1,49597868 \times 10^{11}$ $1,49597872 \times 10^{11}$
13	Параллакс Солнца	$\pi_{\odot} = a_E/A$	8,794148"	8,794141" 8,794155"
14	Постоянная аберра- ции (2 000,0)	K	20,49552"	20,495518" 20,495520"
15	Сжатие Земли	f	$1/298,257 =$ $= 0,00335281$	0,00335279 0,00335283
16	Гелиоцентрическая гравитационная постоянная в м ³ /с ²	$GM_{\odot} = A^3 k^2 / D^2$	$1,32712438 \times 10^{20}$	$1,32712433 \times 10^{20}$ $1,32712443 \times 10^{20}$
17	Отношение масс Солнца и Земли	$M_{\odot} / M_{\oplus} =$ $= GM_{\odot} / GM_{\oplus}$	332 946,0	332 945,7 332 946,3
18	Отношение массы Солнца и массы сис- темы Земля–Луна	$M_{\odot} / M_{\oplus}(1 + \mu)$	328 900,5	328 900,2 328 900,8
19	Масса Солнца в кг	$M_{\odot} = GM_{\odot} / G$	$1,9891 \times 10^{30}$	$1,9879 \times 10^{30}$ $1,9891 \times 10^{30}$
Система масс планет (обратные значения)				
20	Солнце	$M_{\odot}$	1,000000	—
21	Меркурий	$M_{\text{☿}}$	6 023 600	6 020 000 6 027 000
22	Венера	$M_{\text{♀}}$	408 523,5	408 521 408 526
23	Земля–Луна		328 900,5	328 900 328 901
24	Марс	$M_{\text{♂}}$	3 098 710	3 098 600 3 098 760
25	Юпитер	$M_{\text{♃}}$	1 047,355	1 047,330 1 047,380
26	Сатурн	$M_{\text{♄}}$	3 498,5	3 497 3 500
27	Уран	$M_{\text{♅}}$	22 869	22 650 23 100
28	Нептун	$M_{\text{♆}}$	19 314	19 300 19 450
29	Плутон	$M_{\text{♇}}$	3 000 000	2 000 000 15 000 000

Астрономические постоянные. Стандарты IERS 2003 г.

Постоянная, размерность	Значение	Ошибка	Комментарий
$c, \text{мс}^{-1}$	299 792 458	Определяющая	Скорость света
L_B	$1,55051976772 \times 10^{-8}$	2×10^{-17}	Среднее значение $1 - d(\text{TT})/d(\text{TCB})$
L_C	$1,48082686741 \times 10^{-8}$	2×10^{-17}	Среднее значение $1 - d(\text{TCG})/d(\text{TCB})$
L_G	$6,969290134 \times 10^{-10}$	Определяющая	$1 - d(\text{TT})/d(\text{TCG})$
$G, \text{м}^3 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-2}$	$6,673 \times 10^{-11}$	1×10^{-13}	Гравитационная постоянная
$GM_\odot, \text{м}^3 \text{с}^{-2}$	$1,32712442076 \times 10^{20}$	5×10^{10}	Гелиоцентрическая грави- тационная постоянная
* $\tau_A, \text{с}$	499,0047838061	2×10^{-8}	Астрономическая единица в с
* $c \tau_A, \text{м}$	149 597 870 691	6	Астрономическая единица в м
ε_0	84 381, 4059"	0, 0003"	Наклон эклиптики на эпоху J2000?0
$J_{2\odot}$	2×10^{-7}	(принято для DE405)	Динамический форм-фактор Солнца
μ	0,0123000383	5×10^{-10}	Отношение масс Луна/Земля
$GM_\oplus, \text{м}^3 \text{с}^{-2}$	$3,986004418 \times 10^{14}$	8×10^5	Геоцентрическая гавита- ционная постоянная (EGM96)
+ $a_E, \text{м}$	6 378 136,6	0,10	Экваториальный радиус Земли
+ $1/f$	298,25642	0,00001	Обратная величина сжатия Земли
+ $J_{2\oplus}$	$1,0826359 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-10}$	Динамический форм-фактор
$w, \text{рад/с}$	$7,292115 \times 10^{-5}$	Переменная	Номинальное среднее значение угловой скорости Земли
+ $g_E, \text{мс}^{-2}$	9,7803278	1×10^{-6}	Среднее значение ускоре- ния силы тяжести на экваторе
$W_0, \text{м}^2 \text{с}^{-2}$	62 636 856,0	0,5	Потенциал на геоиде
$R_0 =$ $= GM_\oplus / W_0, \text{м}$	6 363 672,6	0,1	Геопотенциальный коэффициент

* – значения постоянных τ_A и $c\tau_A$ даны в «TDB»-единицах;

+ – значения постоянных a_E , $1/f$, $J_{2\oplus}$ и g_E даны в системе «нулевого прилива» ("«zero tide»");

«TDB»-единицы и «TCB»-единицы времени t и длины l связаны соотношениями:

$$t_{TDB} = t_{TCB}(1 - L_B), l_{TDB} = l_{TCB}(1 - L_B), GM_{TDB} = GM_{TCB}(1 - L_B).$$

Преобразование величины X , имеющей размерность времени или длины и численное значение x_{TCB} , взятое из таблицы в «TCB» (СИ-единицах), к численному значению x_{TDB} в «TDB»-единицах, имеет вид:

$$x_{TDB} = x_{TCB}(1 - L_B).$$

Аналогично, численное значение x_{TCG} (из таблицы) связано с численным значением x_{TT} в «TT»-единицах уравнением

$$x_{TT} = x_{TCG}(1 - L_G).$$

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СФЕРИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ	5
1.1. Системы координат, используемые в геодезической астрономии и связь между ними	5
1.1.1. Вспомогательная небесная сфера	5
1.1.2. Системы координат на небесной сфере	9
1.1.3. Географические координаты точек на поверхности Земли	14
1.1.4. Связь между различными системами координат.....	15
1.1.5. Видимое суточное вращение небесной сферы.....	18
1.1.6. Составление эфемерид светил. Эфемерида Полярной звезды.....	22
Контрольные вопросы.....	24
1.2. Измерение времени в астрономии	25
1.2.1. Общие положения	25
1.2.2. Звездное время.....	26
1.2.3. Истинное и среднее солнечное время. Уравнение времени	26
1.2.4. Юлианские дни.....	29
1.2.5. Местное время на разных меридианах. Всемирное, поясное и декретное время	30
1.2.6. Связь между средним солнечным и звездным временем	31
1.2.7. Неравномерность вращения Земли	34
1.2.8. Эфемеридное время.....	35
1.2.9. Атомное время	36
1.2.10. Динамическое и координатное время	36
1.2.11. Системы Всемирного времени. Всемирное координированное время	37
1.2.12. Время спутниковых навигационных систем.....	38
Контрольные вопросы.....	39
1.3. Астрономические факторы.....	40
1.3.1. Общие положения	40

1.3.2. Астрономическая рефракция	40
1.3.3. Параллакс	43
1.3.4. Абберация.....	46
1.3.5. Собственное движение звезд	51
1.3.6. Гравитационное отклонение света	52
1.3.7. Движение земных полюсов	53
1.3.8. Изменение положения оси мира в пространстве. Прецессия	55
1.3.9. Изменение положения оси мира в пространстве. Нутация	60
1.3.10. Совместный учет редукций.....	62
1.3.11. Вычисление видимых мест звезд.....	64
Контрольные вопросы.....	65
2. ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ.....	67
2.1. Предмет и задачи геодезической астрономии.....	67
2.1.1. Использование астрономических данных при решении задач геодезии.....	67
2.1.2. Астрономо-геодезические отклонения отвесной линии и уравнение Лапласа	69
2.1.3. Современные задачи и перспективы развития геодезической астрономии	72
Контрольные вопросы.....	73
2.2. Теория методов геодезической астрономии.....	73
2.2.1. Общие принципы определения географических координат и азимутов направлений из наблюдений светил.....	73
2.2.2. Выгоднейшие условия определения времени и широты в зенитальных способах астрономических определений.....	76
2.2.3. Выгоднейшие условия определения азимута, времени и широты в азимутальных способах астрономических определений	77
Контрольные вопросы.....	78
2.3. Приборное обеспечение в геодезической астрономии.....	79
2.3.1. Особенности приборного обеспечения в геодезической астрономии	79
2.3.2. Астрономические теодолиты	80

2.3.3. Приборы для измерения и регистрации времени	80
Контрольные вопросы.....	81
2.4. Особенности наблюдения светил в геодезической астрономии. Редукции астрономических наблюдений.....	82
2.4.1. Методы визирования светил	82
2.4.2. Поправки в измеренные зенитные расстояния	82
2.4.3. Поправки в измеренные горизонтальные направления.....	84
Контрольные вопросы.....	88
2.5. Понятие о точных способах астрономических определений	89
2.5.1. Определение широты по измеренным малым разностям зенитных расстояний пар звезд в меридиане (способ Талькотта).....	89
2.5.2. Способы определения широты и долготы из наблюдений звезд на равных высотах (способы равных высот).....	90
2.5.3. Определение астрономического азимута направления на земной предмет по наблюдениям Полярной	92
Контрольные вопросы.....	93
2.6. Приближенные способы астрономических определений.....	93
2.6.1. Приближенные определения азимута земного предмета по наблюдениям Полярной.....	93
2.6.2. Приближенные определения широты по наблюдениям Полярной	94
2.6.3. Приближенные определения долготы и азимута по измеренным зенитным расстояниям Солнца	96
2.6.4. Приближенные определения широты по измеренным зенитным расстояниям Солнца.....	98
2.6.5. Определение дирекционного угла направления на земной предмет по наблюдениям светил	98
Контрольные вопросы.....	99
2.7. Авиационная и мореходная астрономия.....	100
2.7.1. Определение долготы и широты по высотам светил в произвольных азимутах	100
2.7.2. Элементы авиационной астрономии. Авиасекстант.....	103
Контрольные вопросы.....	105

3. АСТРОМЕТРИЯ.....	106
3.1. Задачи астрометрии и методы их решения.....	106
3.1.1. Предмет и задачи астрометрии.....	106
3.1.2. Обзор методов астрометрии.....	108
3.1.3. Современное состояние и перспективы развития астрометрии.....	111
Контрольные вопросы.....	112
3.2. Инструменты фундаментальной астрометрии	113
3.2.1. Требования к инструментам фундаментальной астрометрии.....	113
3.2.2. Классические астрооптические инструменты.....	114
3.2.3. Современные астрономические инструменты	118
Контрольные вопросы.....	122
3.3. Создание фундаментальной и инерциальной систем координат.....	123
3.3.1. Общие положения	123
3.3.2. Теоретические основы определения координат звезд и их изменений.....	125
3.3.2.1. Определение прямых восхождений и склонений небесных тел позиционным методом	125
3.3.2.2. Фотографический метод определения ко- ординат звезд	129
3.3.2.3. Определение параллаксов и собственных движений звезд.....	131
3.3.3. Построение фундаментальной системы координат	132
3.3.3.1. Звездные каталоги положений и собст- венных движений. Систематические ошибки каталогов.....	132
3.3.3.2. Каталоги FK5, FK6, HIPPARCOS	134
3.3.4. Построение инерциальной системы координат	136
3.3.4.1. Уточнение теории прецессии и нутации. Понятие небесного эфемеридного полюса	136
3.3.4.2. Построение инерциальной системы коор- динат на основе наблюдений квазаров методами РСДБ. Международная небес- ная система координат ICRS.....	138

3.3.4.3. Земные геоцентрические системы координат	139
3.3.4.4. Барицентрическая и земная небесные системы отсчета (BCRS и GCRS). Концепция невращающегося начала отсчета	141
Контрольные вопросы.....	142
3.4. Установление систем измерения времени и определение параметров ориентации Земли	143
3.4.1. Установление шкалы точного времени	143
3.4.2. Определение параметров ориентации Земли	145
3.4.2.1. Общие положения.....	145
3.4.2.2. Принципы определения параметров вращения Земли по наблюдению звезд	146
3.4.2.3. Принципы определения параметров вращения Земли методами космической геодезии	148
3.4.3. Организация службы времени, частоты и определения параметров ориентации Земли	149
Контрольные вопросы.....	152
3.5. Фундаментальные астрономические постоянные	152
3.5.1. Общие положения	152
3.5.2. Классификация фундаментальных астрономических постоянных	153
3.5.3. Международная система астрономических постоянных.....	156
Контрольные вопросы.....	157
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	158
Приложение 1. Система фундаментальных астрономических постоянных МАС 1976 г.....	159
Приложение 2. Астрономические постоянные. Стандарты IERS 2003 г.....	161

Учебное издание

Гиенко Елена Геннадьевна

АСТРОМЕТРИЯ И ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Редактор *Е.Н. Ученова*

Компьютерная верстка *Л.Н.Шиловой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 20.02.2011. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 9,76. Тираж 150 экз. Заказ .

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02 от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГГА

630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА

630108, Новосибирск, 108, Плеханова, 8.