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 M 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* $Z_Г$ (рис. 2.1). Здесь направление на полюс мира, параллельное вращению Земли, обозначено буквой P; начальный меридиан обозначен через PG.

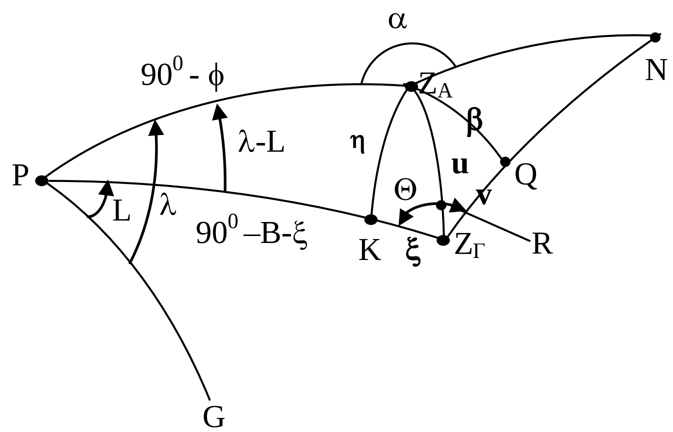

Рис. 2.1. Астрономо-геодезические уклонения отвесной линии

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 $PZ_AZ_Г$, равны:

$$PZ_A = 90^o - \phi; \quad PZ_Г = 90^o - B,$$

где $Z_AZ_Г = u$ – полное астрономо-геодезическое уклонение отвеса в точке М.

Если провести из Z_A дугу Z_AK, перпендикулярную к следу плоскости геодезического меридиана $PZ_Г$, то дуга $KZ_Г$, 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:

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

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

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

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

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

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

Пусть точка N соответствует направлению с пункта M 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 $Z_AZ_Г$) на направление $Z_ГN$. Обозначим через $Z = Z_ГN$ и $z = Z_AN$ соответственно *геодезическое* и *астрономическое зенитные расстояния* для направления MN. Тогда с учетом малости треугольника $Z_AZ_ГQ$ и угла между $NZ_Г$ 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 $Z_A Z_Г K$:

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

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

Окончательно получим составляющую уклонения отвеса в направлении азимута А:

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

Составляющая уклонения отвеса β в направлении, перпендикулярном к заданному, будет получена заменой в формуле азимута А на А + 90°:

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

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 А. 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),

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

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, необходимое для получения азимута направления, определяет большой круг, проходящий через полюс Мира и зенит.

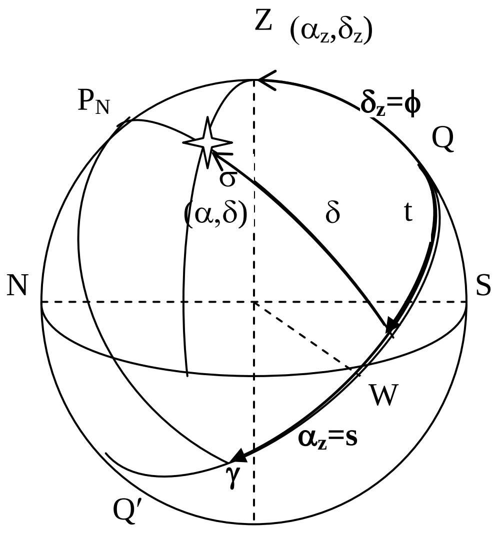

Рис. 2.2. Принципы определения географических координат

Положение зенита на небесной сфере $Z(\alpha_z,\delta_z)$ *в заданный момент времени T может быть определено*:

- зенитными расстояниями минимум двух светил: $Z_{\sigma 1} = Z_1$ и $Z_{\sigma 2} = Z_2$ с известными экваториальными координатами $\sigma_1(\alpha_1, \delta_1)$ и $\sigma_2(\alpha_2, \delta_2)$;

- как пересечение по крайней мере двух вертикалов, проходящих через эти светила, т. е. азимутами светил A_1 и A_2.

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

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

есть *формула связи зенитальных способов астрономических определений*, а выражение

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

есть *формула связи азимутальных способов астрономических определений*.

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

$$t = T_{н} + u - \alpha,$$

где $T_{н}$ – 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 $T_{н}$ светило с известными координатами (α, δ), причем поправка часов u в этот момент и широта места наблюдения ϕ должны быть известны.

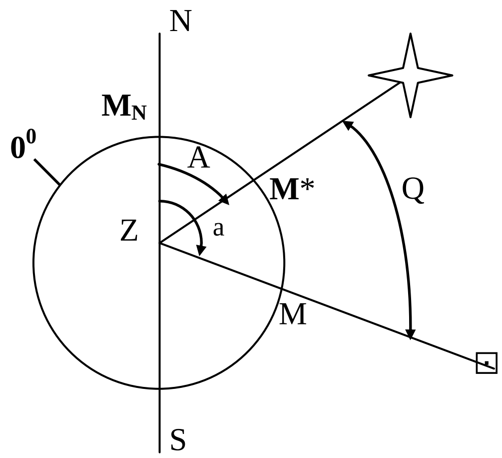

Рис. 2.3. Определение азимута направления на земной предмет

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:

$$a = M - M_N, \qquad (2.5)$$

где M_N – отсчет по горизонтальному кругу северного направления меридиана, называемый местом Севера. Место Севера определяется 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:

$$dZ = \cos A d\phi + 15\cos\phi \sin A(dT + du - d\alpha) - \cos q\, d\delta. \quad (2.6)$$

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*:

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

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

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^o или 180^o. 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* ($A = 90^o$ или $A = 270^o$).

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:

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

Дифференцируя формулу (2.9) по переменным A, ϕ и t, заменяя дифференциалы dA, dϕ 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 $\delta \approx 90^{o}$, а $A \approx 180^{o}$. 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.), ДКМ3-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 Mz 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:

$$L = L_{изм} + i.$$

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

$$i'' = \tau''\, i^{дел.},$$

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

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

где B – давление, мм рт. ст.;

t – температура, ^{o}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 $0^o < z < 50^o$, для приближенных способов – при зенитных расстояниях $0^o < z < 80^o$, 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:

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

где $Z_{геоц}$ – геоцентрическое зенитное расстояние; $Z_{топ}$ – 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 выполняются на различных высотах над горизонтом. Поэтому при измерениях горизонтальных направлений на светило необходимо учитывать влияние *наклона горизонтальной оси теодолита, коллимационной ошибки, бокового гнутия трубы, погрешности форм цапф горизонтальной оси*, а также учитывать влияние различных внешних источников погрешностей и личные погрешности наблюдателя, зависящие от зенитного расстояния светила.

Влияние наклона горизонтальной оси теодолита на измеренные горизонтальные направления

Из-за этой ошибки оптическая ось трубы при вращении вокруг негоризонтальной оси теодолита H′H′ (рис. 2.4) будет описывать наклонную плоскость Z′σ и вместо верного отсчета L на лимбе будет получен ошибочный отсчет L′. Дуга LL′ = x – ошибка отсчета вследствие наклона b = ZZ′ горизонтальной оси теодолита к горизонту. Из решения прямоугольных треугольников ZσZ′ и LσL′ имеем:

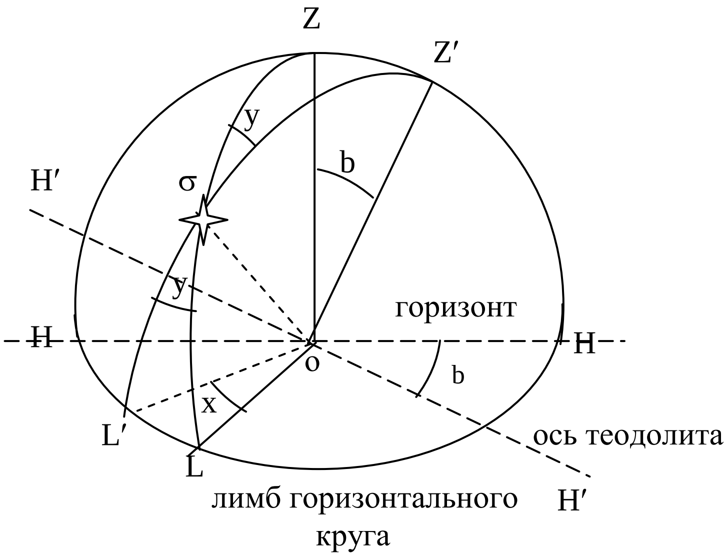

Рис. 2.4. Наклон горизонтальной оси теодолита H′H′ к горизонту HH:
L – верный отсчет; L′ – искаженный отсчет

$$\sin Z = \operatorname{tg} b \operatorname{ctg} y;$$

$$\cos Z = \operatorname{tg} x \operatorname{ctg} y.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} Z = \operatorname{tg} b / \operatorname{tg} x.$$

Преобразование этой формулы дает выражение

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

Из-за малости величин b и x, можно записать

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

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

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

Если правый конец будет ниже левого, то

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

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 Zσk:

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

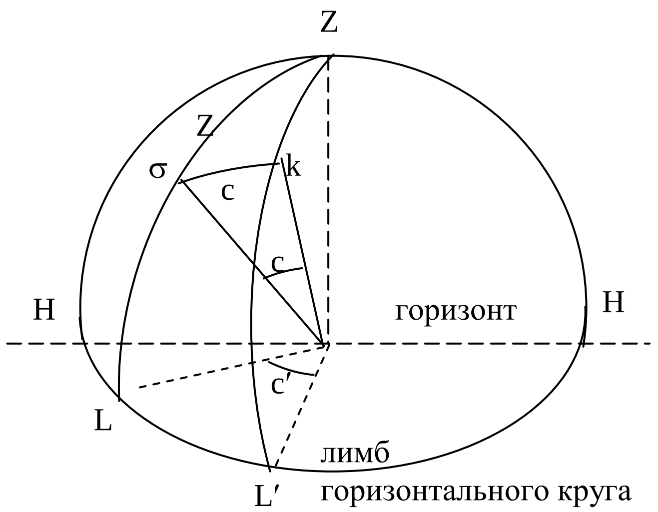

Рис. 2.5. Влияние коллимационной ошибки на измеренное горизонтальное направление:
L – отсчет при c = 0; L′ – отсчет при c ≠ 0

Из-за малости c и (L – L′) можно записать:

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

отсюда

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

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

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

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

Среднее значение наблюдаемого горизонтального направления:

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

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

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

а значение коллимационной ошибки:

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

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 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 гнутия 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:

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

Отсюда широта вычисляется как

$$\phi = ½\,(\delta_S + \delta_N) + ½(\,Z_S - Z_N).$$

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:

$$½(Z_S - Z_N)_{изм} = ½\,(M_S - M_N)R + (i_S - i_N)\,\tau/4 + ½(\rho_S - \rho_N),$$

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 уклонениях 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, наблюденной на данной высоте, значение измеренного зенитного расстояния можно представить в виде:

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

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:

$$Z_{эф} = L_0 - Mz.$$

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

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

Выражение для измеренного зенитного расстояния запишется в виде:

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

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, гнутия 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 адъюнкт-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^{o} до 40^{o}. Зенитные расстояния звезд должны заключаться в пределах от 15^{o} до 60^{o}.

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 ϕ. В связи с этим способ применим в северном полушарии для широт от 10^{o} до 60^{o};

- 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 $10^{o}05'$. 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:

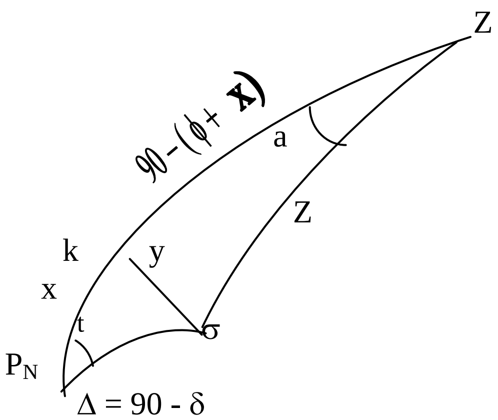

Рис. 2.6. Определение азимута земного предмета по наблюдению Полярной

$$x = \Delta\cos t,\ y = \Delta\sin t,$$

где $t = s - \alpha = Тн + u - \alpha$.

Из прямоугольного треугольника $k\sigma Z$

$$\cos(\phi + x) = \mathrm{ctg}\,(180^o - A)\mathrm{tg}\,y$$

или, обозначая $a = 180^o - A$, получим:

$$a = y\sec(\phi + x) = \Delta\sin t\sec(\phi + x).$$

В узком треугольнике $k\sigma Z$, из-за малости угла a, $kZ \approx \sigma Z$:

$$Z \approx (90^o - \phi) - x\ \text{ и }\ a = \Delta\sin t\,\mathrm{cosec}\,Z.$$

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 $T_н$, 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^o. 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 полюса Мира над горизонтом равна широте места наблюдения. Поскольку Полярная является ближайшей к полюсу Мира (полярное расстояние $\Delta = 90^o - \delta < 1^o$), то в первом приближении, с точностью до градуса, широта равна высоте Полярной:

$$\phi \approx h = 90^o - Z.$$

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:

$$\mathrm{tg}\, x = \cos t\, \mathrm{ctg}\, \delta;$$

$$\sin(\phi + x) = \cos Z \cos x / \sin \delta;$$

$$\phi = (\phi + x) - x.$$

Чтобы вычислить широту, следует измерить высоту h или зенитное расстояние Z Полярной, сопровождая измерения отсчетами по часам $T_н$. 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:

$$t = T_н + u - \alpha.$$

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

$$UT = D_n - (n + k) = T_н + u - (n + k),$$

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

$$t_\odot = 360^o - \arccos (K);\ A_\odot = 360^o - \arccos (L).$$

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 $T_н$ 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:

$$Z_\odot = Z' + \rho - P\sin Z' =$$
$$= Z' + 60{,}2''\mathrm{tg}\, Z' - 8{,}8''\sin Z'.$$

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.

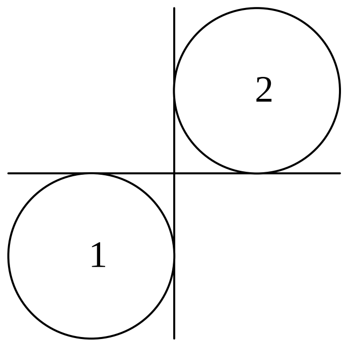

Рис. 2.7. Наведение на Солнце при определении долготы и азимута

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 K, вычисляемые по следующим формулам:

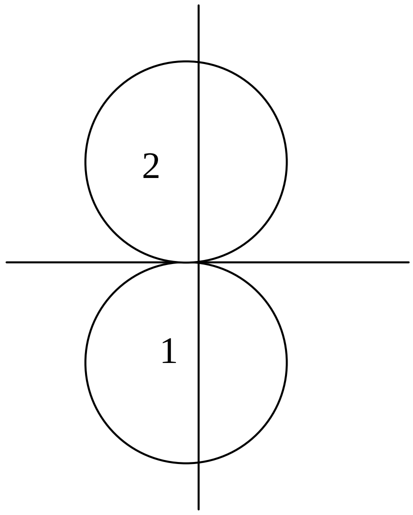

Рис. 2.8. Наведение на Солнце при определении широты

$$\mathrm{tg}\, M = \mathrm{tg}\, \delta_{\odot} / \cos t_{\odot};$$

$$\cos N = \cos Z_{\odot} \sin M / \sin \delta_{\odot}.$$

Далее вычисляется широта:

$$\phi = M + N.$$

Часовой угол Солнца вычисляется по формуле:

$$t_{\odot} = m + E,$$

где $m = Tн + u - (n + k) + \lambda$.

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 плоскоти 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 (А и а 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''.

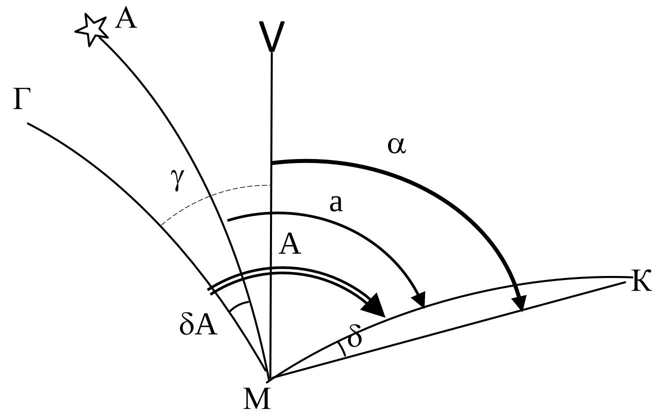

Рис. 2.9. Переход от астрономического азимута к дирекционному углу направления

Поправка *за кривизну геодезической линии на плоскости* в проекции Гаусса с точностью 0,1–0,2'' может быть вычислена по формуле:

$$\delta''_{М,К} = 0{,}00253''(x_М - x_К)y_m,$$

где $x_М$, $x_К$ – 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 В и долготы l = L – L_0, отсчитываемой от осевого меридиана:

$$\gamma'' = l'' \sin B + l''^3/3\rho''^2 \cdot \sin B \cos^2 B(1 + 3\eta^2),$$

где $\eta = e'^2\cos^2 B \approx 0{,}0067 \cos^2 B$, $\rho'' = 206\,265''$.

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 Новосибир-

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.

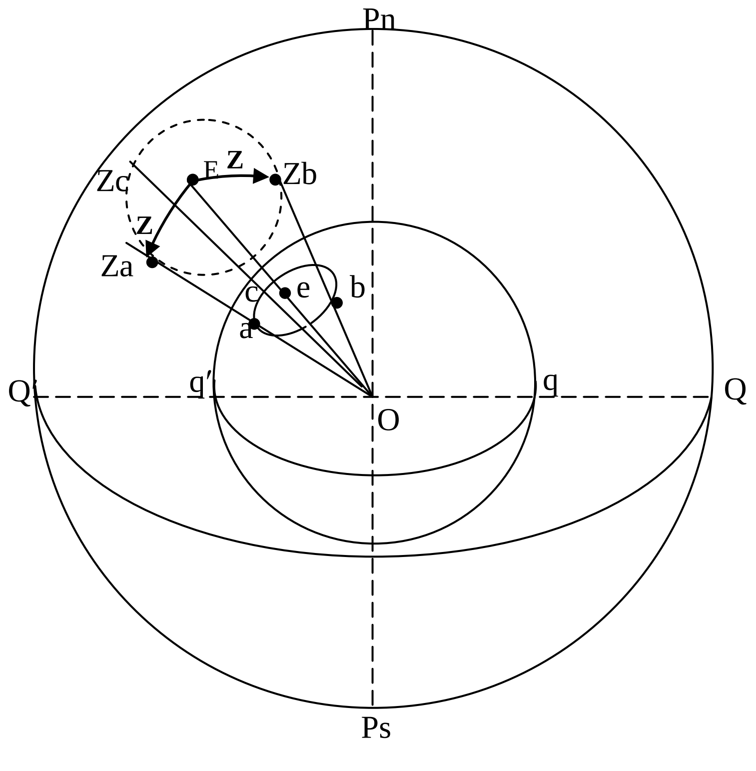

Рис. 2.10. Положение зенита наблюдателя на небесной сфере

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 а (рис. 2.10). Зенит точки а обозначен на небесной сфере, как Z_a. Пусть в некоторый момент времени T наблюдатель измерил высоту светила h. Дуга $Z_aE = 90^o - h$ 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:

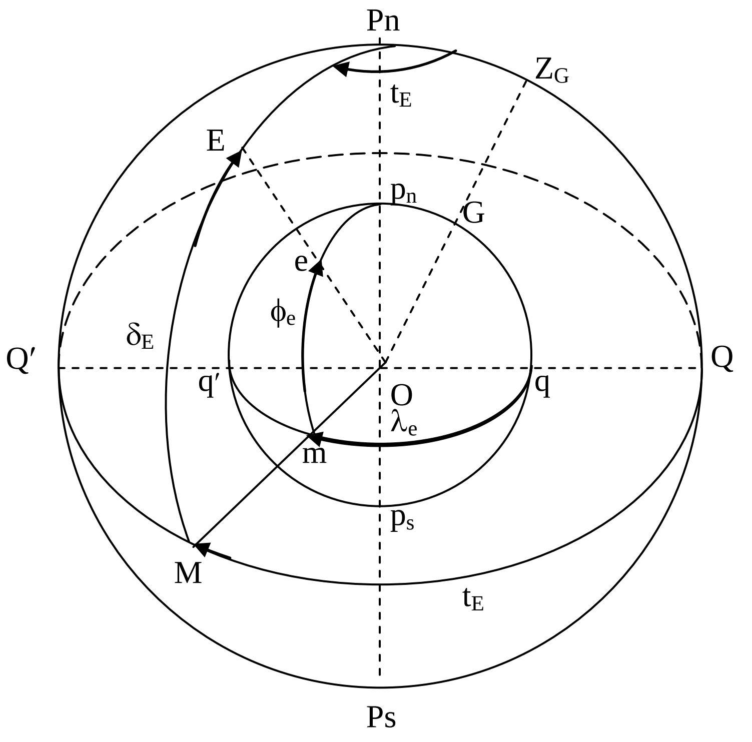

Рис. 2.11. Определение географических координат полюса освещения

$$\delta_E = \smile ME = \phi_e, \quad t_E = \smile QM = \lambda_e.$$

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:

$$\cos Z_c = \sin \phi_c \sin \delta_E + \cos \phi_c \cos \delta_E \cos t_c;$$

$$\sin A_c = \cos \delta_E \sin t_c / \sin Z_c; \tag{2.14}$$

$$t_c = T + U + \lambda_c - \alpha_E.$$

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 направлению 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.

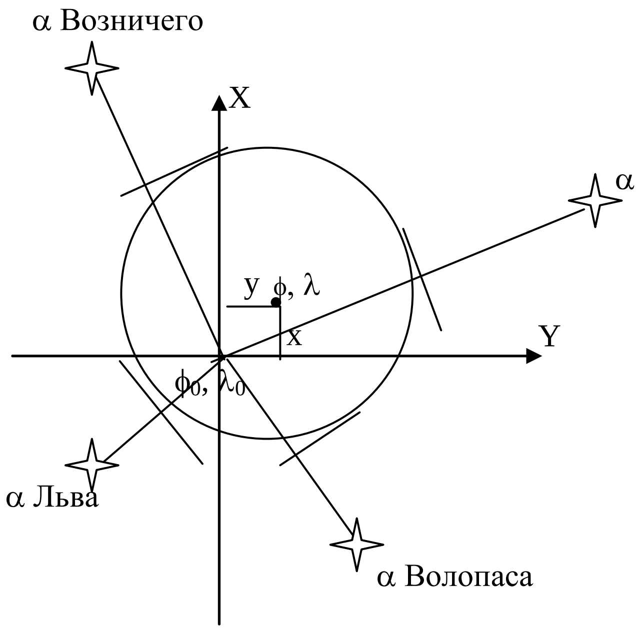

Рис. 2.12. Графический метод определения поправок в приближенные значения координат

Окончательные значения ϕ и λ вычисляются по формулам:

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi; \;\; \lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda.$$

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°, может часто доходить до 0,3°. 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.

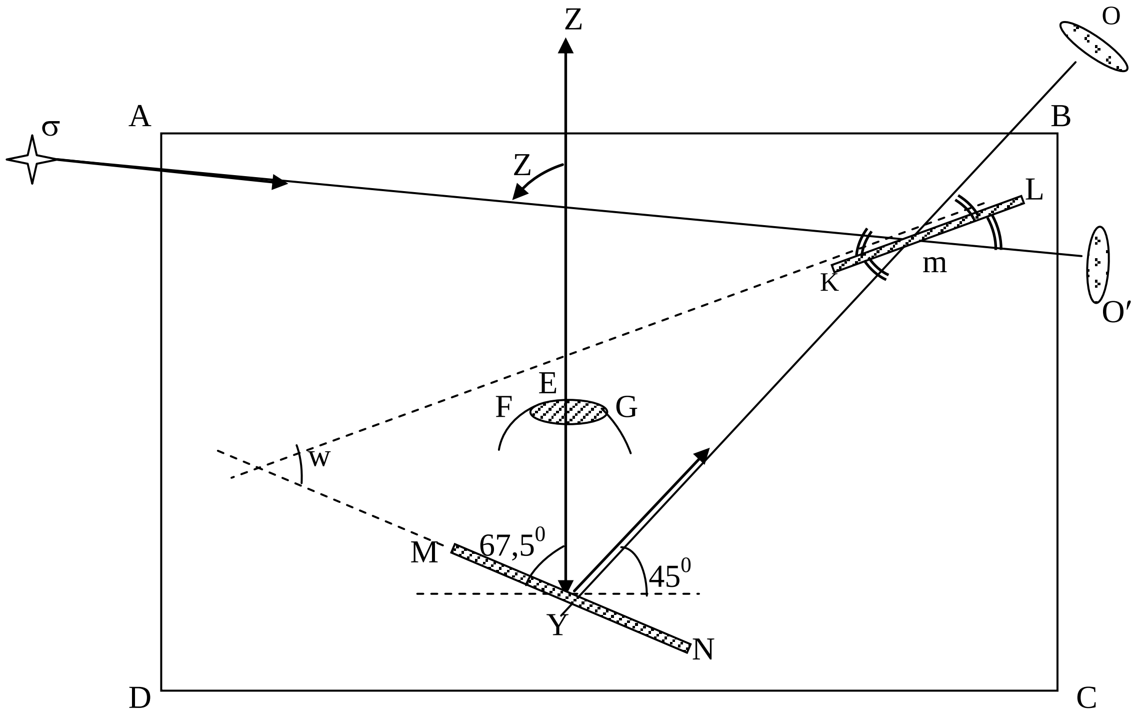

Рис. 2.13. Схема авиасекстанта

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 $67{,}5^{o}$ к направлению EY, так что луч EY отражается от него в направлении Ym под углом 45^{o} к горизонту. В точке m этот луч встречает 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 изображение 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), Процион (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*.