Уралов С.С.

Курс геодезической астрономии

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 528
ББК 38.2
У68

Уралов С.С.
У68 Курс геодезической астрономии / Уралов С.С. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 592 с.

ISBN 978-5-458-28682-4

Уралов С.С. Курс геодезической астрономии: Учебник для вузов. - М.: « Недра», 1980. - 592 с.В книге детально рассмотрена общая теория методов геодезической астрономии. Описаны различные способы астрономических определений географических координат и азимута. Приведены универсальные алгоритмы и стандартные схемы вычислений для всей совокупности способов, основанных на измерении зенитных расстояний и азимутов светил. Дано описание астрономических, угломерных приборов и их исследований. Для студентов геодезических вузов, преподавателей, аспирантов и инженерно-технических работников.

ISBN 978-5-458-28682-4

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

Геодезической астрономией называется раздел астрономии, в котором изучают способы определения географических координат точек земной поверхности и азимутов направлений из наблюдений светил.

В предмет геодезической астрономии входит также изучение соответствующих приборов, с помощью которых производят астрономические определения для указанных целей.

Термин «Геодезическая астрономия» указывает на большое значение этого раздела астрономии для решения научных и практических задач геодезии.

Астрономические определения широт, долгот и азимутов совместно с результатами геодезических и гравиметрических измерений обеспечивают установление исходных геодезических дат и ориентировку государственной геодезической сети, определение параметров земного эллипсоида, ориентирование осей референцной системы геодезических координат и определение высот квазигеоида относительно референц-эллипсоида.

Геодезические азимуты сторон триангуляции, полученные из астрономических наблюдений, называемые азимутами Лапласа, 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.

Таким образом, астрономические определения высокой точности, выполняемые в государственной триангуляции, составляют неразрывное целое с геодезическими работами. Они являются непременной частью современной геодезической сети, отвечающей различным научным и практическим задачам.

Пункты геодезической сети, на которых произведены определения астрономических широт, долгот и азимутов, называют пунктами Лапласа. Согласно «Инструкции о построении государственной геодезической сети Союза ССР», пункты Лапласа определяются:

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

на промежуточных пунктах рядов триангуляции (полигонометрии) 1 класса через 70—110 км;

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

Кроме того, астрономические определения широт и долгот производятся на пунктах государственной геодезической сети 1 и 2 классов, расположенных на основных линиях астрономо-гравиметрического нивелирования. Распределение астрономических пунктов на этих линиях зависит от плотности гравиметрической съемки и рельефа местности. Так, например, при плотности детальной гравиметрической съемки один пункт на 200 км^2 астрономические определения на линиях астрономо-гравиметрического нивелирования производятся на двух смежных пунктах не реже чем через 125 км. При прохождении линий астрономо-гравиметрического нивелирования по районам, не покрытым детальными гравиметрическими съемками, астрономические пункты располагаются в среднем через 60 км.

Астрономические определения на пунктах Лапласа в геодезических сетях 1 и 2 класса, а также на пунктах основных линий астрономо-гравиметрического нивелирования выполняются с одинаковой точностью. Точность, получаемая по внутренней сходимости результатов наблюдений на пункте, характеризуется средними квадратическими погрешностями определения:

широты — не более $0,3''$

долготы — не более $0,03^s$

астрономического азимута — не более $0,5''$.

В недавнем прошлом астрономические определения имели большое значение при производстве топографических съемок в малообжитых, удаленных районах, в которых геодезическая сеть еще отсутствовала. В этих районах астрономические пункты с учетом данных гравиметрических определений, использовались как опорные для съемок масштаба 1 : 100 000 и мельче.

В настоящее время, в связи с возрастанием объема крупномасштабных съемок, резко увеличился объем восстановления пунктов государственной геодезической сети.

Одним из важных элементов этих работ является определение дирекционных углов направлений на ориентирные пункты. При утрате наружных геодезических знаков наиболее целесообразным и экономичным является автономный метод определения дирекционных углов из астрономических определений.

Методы геодезической астрономии успешно применяются в космических исследованиях: при построении базисов космической триангуляции, при определениях астрономических координат пунктов космической триангуляции. Принципиально эти методы можно применить для определения координат искусственных спутников Земли и других космических аппаратов.

Астрономические определения географических координат и азимута находят широкое применение в прикладной геодезии, при геодезическом обеспечении различных инженерных работ:

развитии и ориентировании геодезических сетей специального назначения;

автономном определении геодезических азимутов и дирекционных углов специальных направлений;

контроле угловых измерений в точных полигонометрических ходах и других угловых построениях;

эталонировании точных гироскопических приборов, применяемых в маркшейдерском деле и других инженерных работах и т. д.

Во всех указанных случаях точность астрономических наблюдений определяется специальными инструкциями.

§ 2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ И АЗИМУТА НАПРАВЛЕНИЯ

Из геометрии небесной сферы (рис. 1) следует, что географическая широта φ, направление меридиана NS и местное звездное время s в некоторый момент T в каком-либо пункте земной поверхности могут быть определены, если для этого момента определено положение зенита z на небесной сфере.

Действительно, склонение зенита численно равно широте места $\delta_z = \varphi$, его прямое восхождение — местному звездному времени $\alpha_z = s$, а большой круг, проходящий через полюс и зенит, определит небесный меридиан и полуденную линию NS.

Вследствие суточного вращения Земли положение зенита точки наблюдения непрерывно меняется относительно «неподвижных» звезд.

В каждый данный момент положение зенита на небесной сфере относительно звезд может быть определено или зенитными расстояниями $z_{\sigma_1} = z_1$ и $z_{\sigma_2} = z_2$ минимум двух данных светил с известными экваториальными координатами σ_1 (α_1, δ_1) и σ_2 (α_2, δ_2), или как пересечение по крайней мере двух вертикалов, проходящих через эти светила, т. е. азимутами светил A_1 и A_2.

Из рис. 1 следует, что для наиболее точного определения положения зенита по измеренным зенитным расстояниям или азимутам двух светил необходимо, чтобы разность их азимутов была бы близка к 90°, т. е. светила наблюдались в двух взаимно перпендикулярных вертикалах.

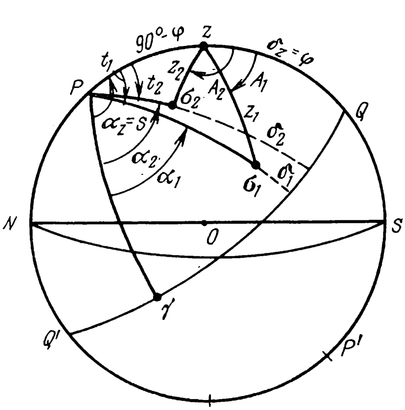

РИС. 1

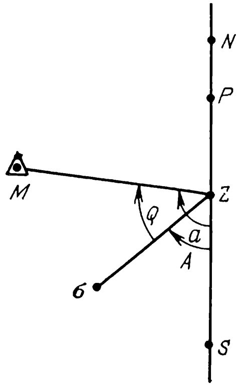

РИС. 2

В соответствии с изложенным все способы астрономических определений широты, времени и направления меридиана строятся на двух основных принципах измерения:

1) зенитных расстояний светил, способы, основанные на этом принципе, называются зенитальными;

2) азимутов светил (точнее, горизонтальных направлений на светила), способы этой группы называются азимутальными.

Принципиально положение зенита на небесной сфере может быть определено еще и третьим методом, а именно — путем одновременного измерения зенитного расстояния и азимута какого-либо светила.

Отсюда могла бы быть и третья группа способов астрономических определений — зенитально-азимутальная (комбинированная).

Однако в общем случае практическое осуществление одновременных наблюдений зенитного расстояния и азимута светила, перемещающегося в поле зрения трубы, дело весьма трудное. Поэтому для точных определений широты, времени и направления меридиана способы третьей группы, как правило, не применяются.

Как известно, географическая долгота пункта относительно начального меридиана численно равна разности одноименных местных времен [1], определенных одновременно (или приведенных к одному и тому же моменту) как в пункте наблюдения, так и в пункте, расположенном на начальном меридиане, т. е.

$$\lambda = s - S = m - \mathrm{UT1}.$$

Поэтому задача определения долготы пункта состоит из:

определения местного времени s или m в некоторый момент T по измерениям зенитных расстояний светил или их азимутов;

определения времени начального меридиана S или UT1 в тот же самый момент T, например из приема радиосигналов времени.

Задача определения азимута a направления на земной предмет (рис. 2) сводится обычно к определению азимута светила A и измерению горизонтального угла Q между светилом и местным предметом. В этом случае азимут направления на земной предмет определяется формулой

$$a = A + Q.$$

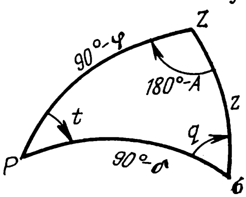

РИС. 3

Аналитическое обоснование различных способов определения широты, времени и азимута вытекает из решения параллактического треугольника $PZ\sigma$ (рис. 3), построенного для каждого наблюдаемого светила.

[1] О шкалах времени см. в главе 2.

Рассмотрим вначале в самых общих чертах обоснование некоторых зенитальных способов астрономических определений, а затем азимутальных.

§ 3. ПОНЯТИЕ О ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБАХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В этой группе способов основным уравнением, вытекающим из параллактического треугольника $PZ\sigma$ и связывающим измеряемую величину z в некоторый момент T по хронометру с определяемыми значениями широты φ и времени s (поправки хронометра u), является известное уравнение связи

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \tag{1}$$

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

Полагая, что z и T известны из измерений, а значения экваториальных координат α и δ выбираются из звездного каталога на момент наблюдений, в уравнении (1) будем иметь два неизвестных: φ и u.

Определение этих неизвестных на основании уравнения (1) можно производить как совместно, так и раздельно. При этом в обоих случаях нахождение искомых величин облегчается тем обстоятельством, что их приближенные значения бывают уже наперед известны. Поэтому, как правило, в способах совместного определения приходится находить малые поправки $\Delta\varphi$ и Δu к приближенным значениям неизвестных φ_0 и u_0, а в способах раздельного определения — определять точно или поправку часов u при известной широте φ, или же, наоборот, широту φ при известной поправке часов u.

Для совместного определения, как указывалось выше, необходимо измерить зенитные расстояния минимум двух светил, расположенных вблизи плоскостей двух произвольных взаимно перпендикулярных вертикалов. Тогда из совместного решения двух уравнений вида (1)

$$\cos z_1 = \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos (T_1 + u - \alpha_1);$$

$$\cos z_2 = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos (T_2 + u - \alpha_2)$$

принципиально можно найти искомые значения широты φ и поправки хронометра u.

В общем случае задача совместного определения широты и времени решается по измеренным зенитным расстояниям n светил, где $n > 2$, для чего уравнения (1), приведенные к линейному виду, решаются по методу наименьших квадратов.

Обоснование тех или иных способов астрономических определений строится на общем принципе, применяемом при любых измерениях, а именно, на принципе максимальной точности определяемых величин.

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

При соблюдении выгоднейших условий наблюдений влияние погрешностей измерений, а также исходных данных должно быть минимальным.

Для обоснования выгоднейших условий определения широты, времени и азимута обычно пользуются известными из сферической астрономии дифференциальными формулами изменения зенитного расстояния и азимута светила.

В зенитальных способах для этой цели применяют дифференциальную формулу изменения зенитного расстояния светила, получаемую путем разложения в ряд Тейлора выражения (1), с учетом членов первого порядка

$$\Delta z = 15 \cos \varphi \sin A \ \Delta t + \cos \Delta \varphi - \cos q \Delta \delta, \tag{2}$$

где $\Delta t = \Delta T + \Delta u - \Delta \alpha$.

Решив выражение (2) относительно $\Delta\varphi$ и Δu, получим соответственно

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta z}{\cos A} - 15 \cos\varphi \operatorname{tg} A \,(\Delta T + \Delta u - \Delta\alpha) + \frac{\cos q}{\cos A} \Delta\delta, \tag{3}$$

$$\Delta u = -\Delta T + \Delta\alpha + \frac{\Delta z}{15 \cos\varphi \sin A} - \frac{\Delta\varphi}{15 \cos\varphi \operatorname{tg} A} + \frac{\cos q \Delta\delta}{15 \cos\varphi \sin A}. \tag{4}$$

Анализ дифференциальных формул (3) и (4) позволяет сделать следующие выводы.

Выгоднейшими условиями для определения широты по измеренным зенитным расстояниям светил [формула (3)] являются наблюдения их в меридиане.

При этом истинная погрешность определения широты $\Delta\varphi$ не зависит от погрешностей поправки хронометра Δu, оценки момента наблюдения светила ΔT и прямого восхождения $\Delta\alpha$, так как для наблюдений в меридиане коэффициент при указанных погрешностях обращается в нуль ($\operatorname{tg} A = \theta$).

Влияние погрешности измерения зенитного расстояния светила Δz при наблюдении в меридиане также будет наименьшим, так как для меридиана $\cos A = 1$. Если для определения широты произвести наблюдение двух звезд в меридиане, одной к югу от зенита ($\cos A = +1$), а другой к северу ($\cos A = -1$), то в среднем выводе широты исключится влияние постоянной составляющей погрешности Δz, не зависящей от зенитного расстояния светила. При наблюдении же двух звезд на близких или равных зенитных расстояниях в меридиане или вблизи от него влияние систематической части Δz исключится полностью.

В соответствии с указанными выгоднейшими условиями и строятся способы определения широты по измеренным зенитным расстояниям пар звезд в меридиане или в непосредственной близости от него.

Выгоднейшими условиями для определения поправки хронометра по измеренным зенитным расстояниям светил [формула (4)] являются наблюдения их в первом вертикале.

При этом погрешность определения поправки хронометра Δu не зависит от погрешности $\Delta\varphi$ принятого для вычислений значения широты ($\operatorname{tg} A = \infty$), а влияние погрешностей Δz и $\Delta\delta$ будет наименьшим ($\sin A = 1$).

Для исключения постоянной составляющей погрешности Δz определение времени целесообразно производить по наблюдениям двух звезд в первом вертикале, на равных или близких зенитных расстояниях, одной к западу ($\sin A = +1$), другой к востоку ($\sin A = -1$) от зенита. Среднее значение поправки хронометра, выведенное из наблюдений такой пары звезд, будет свободно от влияния постоянной составляющей погрешности Δz. Заметим, что погрешность оценки момента ΔT наблюдения светила и его прямого восхождения $\Delta\alpha$ целиком входит в погрешность определения времени, а следовательно, и долготы пункта. При этом особую опасность представляет систематическая часть ∂T погрешности ΔT, называемая лично-инструментальной погрешностью, или лично-инструментальным уравнением.

При определениях долгот пунктов нужно принимать все меры для точного определения величины этой систематической погрешности и исключения ее влияния из результатов определения долготы пункта.

Необходимо также отметить, что влияние случайных погрешностей измерения зенитных расстояний светил на точность определения времени или долготы возрастает с увеличением широты пункта наблюдения пропорционально $\sec\varphi$.

Приведем некоторые примеры зенитальных способов определения широты и времени.

Наиболее полное исключение погрешностей измерения зенитных расстояний в результатах определения широты или поправки хронометра получается при наблюдении двух (или нескольких) звезд на равных зенитных расстояниях. Для двух звезд, наблюденных на равных зенитных расстояниях ($z_1 = z_2 = z$), можем написать уравнения вида (1):

$$\cos z = \sin\varphi \sin\delta_1 + \cos\varphi \cos\delta_1 \cos(T_1 + u - \alpha_1);$$

$$\cos z = \sin\varphi \sin\delta_2 + \cos\varphi \cos\delta_2 \cos(T_2 + u - \alpha_2).$$

Поскольку левые части этих выражений равны, следовательно, равны и правые, т. е.

$$\sin\varphi \sin\delta_1 + \cos\varphi \cos\delta_1 \cos(T_1 + u - \alpha_1) = \\ = \sin\varphi \sin\delta_2 + \cos\varphi \cos\delta_2 \cos(T_2 + u - \alpha_2). \quad (5)$$

В равенстве (5) имеется два неизвестных: φ и u. При условии, например, что u известно, из выражения (5) по наблюдениям двух звезд на равной высоте можно определить широту φ по формуле

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\cos\delta_2 \cos(T_2 + u - \alpha_2) - \cos\delta_1 \cos(T_1 + u - \alpha_1)}{\sin\delta_1 - \sin\delta_2}. \qquad (6)$$

Из выгоднейших условий определения широты следует, что звезды в паре необходимо выбирать вблизи меридиана, на севере и на юге.

Подобным образом из выражения (5) можно определить u, при условии что известно φ.

Для этого, в соответствии с выгоднейшими условиями определения u, необходимо произвести наблюдения пары звезд на равных высотах в первом вертикале или вблизи от него, причем одна звезда пары выбирается на западе, а другая на востоке.

Из выражения (5) видно, что для определения широты или времени по наблюдениям двух звезд на равной высоте необходимо заметить по хронометру только моменты T_1 и T_2 прохождения звезд через горизонтальную нить зрительной трубы, установленной на зенитное расстояние z данной пары [1]. Производить же отсчеты по вертикальному кругу не нужно.

Следовательно, в данных способах определения широты и времени полностью исключаются погрешности, связанные с отсчетами по вертикальному кругу (систематические и случайные погрешности диаметров круга, отсчетных приспособлений, непосредственные погрешности отсчетов по кругу и т. д.).

Таким образом, наряду с максимальным ослаблением систематических погрешностей в разобранных способах определения широты и времени значительно ослаблено также и влияние случайных погрешностей наблюдений. Поэтому оба эти способа рекомендуются инструкцией для точных определений широты и времени в астрономо-геодезической сети. Первый из них называется способом Певцова, второй способом Цингера, по имени двух русских военных геодезистов, разработавших их в восьмидесятых годах прошлого столетия.

На этом же принципе основывается способ совместного определения широты и времени по наблюдениям n звезд на равных высотах ($n \geqslant 3$). Значения φ и u (λ) здесь находят из уравнивания путем совместного решения n уравнений (1), приведенных к линейному виду, по методу наименьших квадратов. Этот способ называется способом равных высот. Идея этого способа принадлежит немецкому ученому Гауссу. При наблюдениях астрономическим теодолитом способ равных высот известен как способ Мазаева, по имени советского военного геодезиста, раз-

[1] Кроме отсчетов по хронометру T_1 и T_2, соответствующих моментам прохождения двух звезд через одну и ту же нить, для приведения наблюдений к одной высоте производятся отсчеты по уровню, скрепленному с трубой.

работавшего методику наблюдений серии звезд на равной высоте с помощью астрономического теодолита.

Для определения широты по наблюдениям звезд в самом меридиане их очень трудно подобрать точно на равных зенитных расстояниях.

Кроме того, в меридиане нельзя производить наблюдение прохождений звезд через горизонтальные нити неподвижной по высоте трубы, так как звезды в меридиане перемещаются параллельно горизонтальным нитям. В этом случае для определения широты наблюдают пары звезд в меридиане с малой разностью зенитных расстояний, одну на Севере, другую на Юге от зенита.

Имея в виду, что в меридиане $\cos t = 1$, для южной звезды из формулы (1) получим

$$\cos z_S = \sin\varphi \sin\delta_S + \cos\varphi \cos\delta_S = \cos(\varphi - \delta_S),$$

откуда

$$\varphi_1 = z_S + \delta_S.$$

Для северной звезды в верхней кульминации на том же основании будем иметь

$$\varphi_2 = \delta_N - z_N.$$

Среднее значение широты по наблюдениям северной и южной звезд будет

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2) = \frac{1}{2}(\delta_S + \delta_N) + \frac{1}{2}(z_S - z_N). \tag{7}$$

Разность $z_S - z_N$, если она превышает рабочую часть поля зрения трубы, можно определить по измеренным зенитным расстояниям каждой звезды пары. Этот способ был разработан для наблюдений с вертикальным кругом основателем Пулковской обсерватории В. Я. Струве. Для определения широты полевых пунктов с помощью астрономического теодолита этот способ находит широкое применение до настоящего времени.

Если разность $z_S - z_N$ не превышает рабочей части поля зрения трубы ($| z_S - z_N | < 30'$), то ее измеряют при неподвижной установке трубы по высоте с помощью подвижной горизонтальной нити окулярного микрометра без отсчетов по вертикальному кругу.

Этот способ определения широты называется способом Талькотта, по имени американского геодезиста, разработавшего его в середине прошлого столетия. Способ Талькотта также рекомендуется инструкцией для определения широты пунктов 1 и 2 классов как один из основных способов.

§ 4. ПОНЯТИЕ ОБ АЗИМУТАЛЬНЫХ СПОСОБАХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В азимутальных способах основным уравнением, связывающим измеряемую величину A (см. рис. 3) с определенными значениями широты φ и времени s, является

$$\operatorname{ctg} A_N = \sin\varphi \operatorname{ctg} t - \cos\varphi \operatorname{tg}\delta \operatorname{cosec} t, \tag{8}$$

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

Практически с помощью угломерного прибора измеряются не азимуты светил A, а горизонтальные направления на светила N (рис. 4), так как точное направление меридиана на определяемом пункте, как правило, неизвестно.

В функции измеренного горизонтального направления N азимут светила, отсчитываемый от точки Севера, найдется из следующего выражения

$$A_N = N - M_N, \tag{9}$$

где M_N — место Севера — отсчет горизонтального круга, соответствующий при данном ориентировании круга направлению на Север.

При определении азимута светила по формуле (9) место Севера M_N входит с одним и тем же знаком как для наблюдений при КЛ, так и при КП, и поэтому не может быть исключено методикой наблюдений.

Поэтому при определении азимута по измеренному горизонтальному направлению на светило в уравнении (8), с учетом равенства (9), будет три неизвестных: M_N, φ и u, которые можно найти путем как совместных, так и раздельных определений. Для совместного их определения необходимо произвести наблюдения по крайней мере трех светил минимум в двух различных вертикалах и решить совместно три уравнения связи (8).

В общем случае задача совместного определения решается по измерениям горизонтальных направлений на n светил и соответствующем решении n уравнений (8), приведенных к линейному виду, по методу наименьших квадратов.

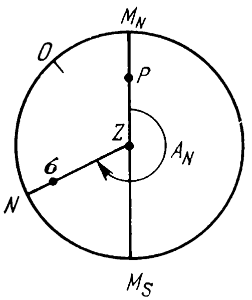

РИС. 4

В способах раздельного определения M_N, φ и u, пользуясь приближенными или точными значениями одних величин, производят определение других в условиях, при которых погрешности измерений, а также погрешности величин, принятых за известные, не оказывают существенного влияния на результат определений.

Для обоснования выгоднейших условий определения азимута светила, широты и