

ПРАКТИЧЕСКАЯ НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Оглавление.

Глава 5. Модели движения небесных тел на основе наблюдений.

5.05. Методы наблюдений небесных тел для небесной механики.

5.05.1. Измеряемые величины и свойства результатов наблюдений.

Говоря о наблюдениях небесных тел, мы всегда подразумеваем измерения. В инструментах и приборах фигурируют величины, которые мы измеряем. После наблюдений остаются реально существующие значения измеряемых величин, которые записываются в журналах наблюдений или в файлах на технических носителях информации.

Одними измеряемыми величинами невозможно описать динамику небесных тел. Поэтому придумывают различные системы координат, которые в отличие от измеряемых величин являются абстрактными объектами. В зависимости от того, какими формулами и условиями мы свяжем координаты с измеряемыми величинами, такие они и получатся. Мы рассматриваем различные системы астрономических координат в других разделах.

Результаты измерений, полученные в процессе наблюдений, часто подвергаются предварительной обработке, прежде чем они станут использоваться для определения или уточнения параметров движения небесных тел. При этом получаются другие величины, которые по-прежнему называются измеряемыми. Примером может служить отображение планеты и нескольких звезд на одной фотопластинке. С помощью микроскопа измеряются линейные расстояния между отображенными планеты и звезд. Эти расстояния можно считать исходными измеряемыми величинами. Они получаются с погрешностью, присущей процессу измерений. Далее сопоставляются линейные координаты звезд на фотопластинке и сферические координаты звезд из звездного каталога. После такой обработки наблюдений мы имеем прямое восхождение и склонение планеты, которые в дальнейшем считаются результатами наблюдений и называются измеряемыми величинами.

В процессе обработки наблюдений используется ряд модельных соотношений. Топоцентрические направления светил сопоставляются с их линейными координатами в фокальной плоскости телескопа. Эти соотношения не тривиальны из-за неидеальных свойств оптики. Используемые координаты звезд из звездного каталога являются неточными, так как были определены из измерений положений звезд и их собственных движений. В результате обработки наблюдений возникают дополнительные погрешности, которые, как правило, превышают погрешности непосредственных измерений на фотопластинке. Аналогичная ситуация возникает и при других типах наблюдений.

В дальнейшем изложении мы будем использовать общее понятие измеряемой величины, как результата наблюдений, не углубляясь в процесс обработки данных и не уточняя, на каком этапе обработки наблюдений получается данная величина.

Другим атрибутом наблюдений небесных тел является момент наблюдения. Это также величина, которая определяется условно. Она зависит от того, к какому физическому процессу относится момент наблюдения, каким способом измеряется само время. Примерами процессов, которым соответствует момент наблюдения, могут служить открытие затвора фотокамеры, приход отдельного фотона в фотоприемник, нажатие наблюдателем кнопки хронографа. Способы измерения времени определяются устройством используемых на обсерватории часов, методами передачи сигналов времени для согласования шкал времени различных часов, реализацией различных шкал времени. В дальнейшем изложении мы будем использовать общее понятие момента наблюдения, уточняя только, в какой из принятых шкал времени он отсчитывается.

В результатах наблюдений измеряемую величину связывают с небесным телом, которое наблюдают, и точкой в пространстве, из которой его наблюдают. Современная техника наблюдений позволяет измерять величины трех типов:

1. угловые координаты вектора направления на наблюдаемое тело,
2. дальность до наблюдаемого тела,
3. лучевую скорость наблюдаемого тела.

При этом угловые координаты вектора направления фактически измеряют в системе координат, жестко связанной с измерительным прибором, которым обычно является телескоп. Очень часто результатом наблюдений являются разности угловых координат направлений на два тела, наблюдаемых одновременно. В любом случае результат измерений существенно зависит от расположения пункта наблюдений в момент на-

блудений.

Измерения угловых координат или разностей угловых координат называют позиционными наблюдениями. Измерения дальности да наблюдаемого тела называют дальномерными наблюдениями. Измерения лучевой скорости тела называют допплеровскими наблюдениями, так как в процессе наблюдений используется эффект Допплера, а фактически измеряется частота электромагнитного сигнала, приходящего от наблюдаемого тела.

Практикуются еще косвенные позиционные наблюдения, когда измеряемая величина, не является угловой координатой, но существенно зависит от разности угловых координат двух тел. Выполняются фотометрические наблюдения звезды покрываемой планетой, астероидом или спутником планеты. Производятся фотометрические наблюдения спутников планет во время из взаимных затмений и покрытий. Особым случаем являются наблюдения покрытий звезд Луной.

Рассмотрим подробнее разные типы наблюдений.

5.05.2. Позиционные наблюдения небесных тел.

В процессе позиционных наблюдений небесного тела фиксируется положение его изображения относительно фотоприемника или деталей инструмента. Это можно делать различными способами. Применение некоторые из них осталось в прошлом. Постоянно идет поиск новых, более совершенных методов.

До начала 20-го века широко применялись так называемые *микрометрические наблюдения*. Фотоприемником являлся глаз наблюдателя. Фиксация изображения небесного тела делалась относительно тонких нитей, расположенных в поле изображения. Нити могли перемещаться наблюдателем в поле зрения с помощью специальных винтов, снабженных линейными шкалами. Ориентация нитей также могла изменяться и фиксироваться угломерным инструментом. Исходной измеряемой величиной при таких наблюдениях является линейное расстояние между изображениями двух небесных светил, одновременно видимых в поле зрения. Измеренное линейное расстояние связывают с угловым расстоянием между двумя телами. Для этого нужно знать параметры используемого телескопа. Измеряется также угол между линией, соединяющей изображения двух тел, и некоторой линией фиксированной в поле зрения телескопа. Измеряемая величина в первом случае называется угловым расстоянием, во втором – позиционным углом. Позиционный угол обычно отсчитывается от направления на северный

полюс мира в сторону востока от 0 до 360 градусов. В некоторых случаях при наблюдениях спутников планет позиционный угол отсчитывается от направления оси симметрии видимой орбиты спутника, тогда задается также позиционный угол этого направления относительно направления на северный полюс мира. Момент наблюдения в прошлом фиксировался наблюдателем вручную по часам или с помощью кнопки хронографа. При этом измерения углового расстояния и позиционного угла двух небесных тел часто производились в различные моменты времени.

В некоторый период времени в прошлом применялся уникальный астрономический измерительный прибор, который назывался гелиометром. Устроен он был следующим образом. Объектив телескопа был разрезан на две части по диаметру. Части могли перемещаться наблюдателем с помощью микрометрического винта. Эти перемещения фиксировались измерительным прибором. Измерялся также угол между линией разреза объектива и направлением в северный полюс мира. Естественно, в фокусе телескопа получалось по два изображения каждого небесного тела. Задача наблюдателя состояла в повороте объектива относительно оси телескопа и смещении частей объектива так, чтобы изображения двух разных светил совпали в поле зрения. Тогда угол поворота объектива и относительное смещение частей объектива давали угловое расстояние и позиционный угол двух небесных светил. Повышение точности достигалось благодаря тому, что совмещение двух изображений наблюдатель мог сделать точнее, чем совмещение светила с нитью микрометра. В настоящее время сохранился единственный из нескольких применявшихся в мире гелиометров – в Энгельгардской обсерватории в Казани.

Весь 20-й век во всем астрономическом мире производились в основном фотографические наблюдения. В фокусе телескопа размещалась фотопластинка. Производилось наведение телескопа и делалась экспозиция фотопластинки. После проявления выполнялись измерения различий линейных координат небесных тел на фотопластинке. Делалось это с помощью микроскопа. Существовали также приборы автоматического измерения линейных координат небесных тел на фотопластинках.

В конце 20-го века появились высокочувствительные фотоприемники – ПЗС матрицы. Расшифровка аббревиатуры ПЗС – прибор с зарядовой связью. Англоязычное название этого прибора – charged coupled device (CCD). При наблюдениях с ПЗС-матрицей изображение разделяется на мельчайшие квадратные ячейки - пиксели. После передачи

сигналов в компьютер получается растровое изображение части поля зрения. Величина засветки каждого пикселя записана в компьютере в виде целого числа. При наблюдениях выполняется экспозиция ПЗС-матрицы аналогично тому, как это делалось с фотопластинкой. В процессе компьютерной обработки ПЗС-видеограммы производится измерение разностей линейных координат небесных светил.

Дальнейшая обработка наблюдений делается аналогично для фотопластинок и ПЗС-видеограмм. Если выполняются наблюдения тел Солнечной системы, то применяются две различные методики. В первой из них одновременно с изображением наблюдаемого тела фиксируются изображения нескольких звезд. Угловые координаты звезд выбираются из какого-либо звездного каталога. После измерений линейных координат тела относительно звезд вычисляются угловые координаты тела в системе звездного каталога. Так получаемые экваториальные координаты называются астрометрическими. По второй методике измеряют разности линейных координат двух наблюдаемых небесных тел. Далее тем или иным способом определяют масштаб изображения в угловой мере и ориентацию фотоприемника относительно направления на полюс мира. В итоге вычисляют разности угловых координат двух небесных тел.

Существенный прогресс в точности позиционных наблюдений был достигнут тогда, когда появилась возможность выносить телескопы за пределы земной атмосферы. Такие телескопы, являющиеся искусственными спутниками Земли, были рассчитаны на широкий круг задач, в основном для создания новых более точных звездных каталогов. Одним из первых таких телескопов был Hubble Space Telescope (HST). С помощью HST были выполнены новые, более точные позиционные наблюдения тел Солнечной системы.

Постоянно ведется поиск новых методов наземных позиционных наблюдений. Значительный выигрыш в точности был достигнут применением телескопов с адаптивной оптикой. Такие оптические инструменты позволяют частично компенсировать дрожание изображения, вызванное земной атмосферой. В некоторых случаях для позиционных наблюдений подходит спектрографический метод наблюдений. Таким методом удается зафиксировать на ПЗС-видеограмме положение каждого пришедшего фотона. Дальнейшая обработка видеограммы позволяет получить с высокой точностью разности координат двух небесных тел, изображения которых попали в поле зрения.

После позиционных наблюдений результаты измерений подвергают-

ся обработке. В случаях, когда измерялись линейные координаты небесного тела относительно звезд, обработка заключается в получении прямого восхождения и склонения небесного тела в момент наблюдения. Для этого привлекаются координаты звезд из подходящего звездного каталога. В процессе обработки учитываются различные поправки, связанные с особенностями конкретного инструмента и с особенностями самих изображений. Автоматически учитывается рефракция. В настоящее время такая обработка делается автоматически с помощью специальных вычислительных программ. При этом почти автоматически распознаются звезды, отображенные на ПЗС-видеограмме. В итоге такой обработки получаются прямое восхождение и склонение небесного тела в координатной системе используемого звездного каталога. По типу такие координаты будут астрометрическими. Так как сразу даются экваториальные координаты, такие наблюдения называют еще абсолютными. Разумеется, ошибки звездного каталога полностью войдут в полученные значения координат небесного тела.

Обработка относительных измерений производится иначе. Измеренные разности линейных координат двух небесных тел должны быть сопоставлены с разностями их угловых координат. Для этого нужно знать масштаб изображения и его ориентацию. Для определения этих параметров существует несколько различных методов. В частности, для определения ориентации изображения на той же видеограмме получают следы звезд при остановленном часовом механизме телескопа. Эти следы дают ориентацию изображения по отношению к истинному экватору эпохи даты. Масштаб изображения может определяться по снимкам звездных скоплений с известными координатами звезд. При обработке относительных измерений необходимо учитывать дифференциальную рефракцию, а также ряд поправок, присущих данному инструменту. В итоге получают разности прямых восхождений и склонений двух небесных тел. При этом разность прямых восхождений оказывается умноженной на косинус склонения одного из тел. По типу такие координаты являются астрометрическими, но системы координат могут быть различными в зависимости от метода обработки.

В обоих случаях (абсолютные и относительные наблюдения) результаты должны снабжаться либо названием обсерватории либо ее географическими координатами. Иногда полученные координаты приводят к геоцентру, тогда это должно быть указано в описании наблюдений. При использования наблюдений всегда важно знать, как выполнялась их предварительная обработка.

Чтобы получить абсолютные координаты небесного тела, на той же ПЗС-видеограмме должны оказаться изображения звезд с известными координатами. Это не всегда удается сделать, особенно если поле ПЗС-матрицы в угловом измерении невелико.

Получение относительных координат небесных тел часто оказывается предпочтительным, так как при этом в результат наблюдений не вносятся ошибки звездных каталогов.

При позиционных наблюдениях следует учитывать тот факт, что наилучшая точность измерения разности координат двух объектов на ПЗС-видеограмме получается в случае, если они имеют примерно одинаковую яркость.

Наилучшие наземные позиционные наблюдения астероидов и спутников планет, выполненные в настоящее время с помощью ПЗС-матриц, имеют точность около 0.04 секунды дуги.

5.05.3. Дальномерные наблюдения небесных тел.

Дальномерные наблюдения выполняются путем посылки к наблюдаемому телу светового или радиоимпульса. При дальномерных наблюдениях измеряемой величиной является время прохождения светового импульса или радиоволны от телескопа до объекта и обратно. Световой импульс посыпается с помощью лазера. На небесном теле должен располагаться либо световой отражатель, либо ретранслятор радиосигнала. При отсутствии отражательных устройств его роль может играть поверхность планеты. Таким образом получается расстояние ρ от телескопа до небесного тела в момент наблюдения. Если обозначить через $\Delta\tau$ положительный промежуток времени между моментом излучения светового или радиоимпульса и моментом приема отраженного сигнала, то расстояние ρ можно определить по следующей приближенной формуле:

$$\rho = \frac{1}{2}c \Delta\tau,$$

где c - скорость света. Приближенность этой формулы обусловлена предположением о неизменности относительного расположения наземного пункта и отражателя во время распространения волны к отражателю и обратно. В случае дальнометрии Луны и планет это предположение принимать нельзя.

Угловые отражатели света установлены на специальных ИСЗ и на Луне. В настоящее время для лазерной локации Луны используются четыре угловых отражателя, расположенных на ее поверхности.

Отражатель устроен в виде призмы, отражающей свет всегда точно в обратном направлении, откуда бы он ни пришел.

К настоящему времени уже выполнена радиолокация Венеры. Радиотехнические измерения дальности применяются для траекторных измерений межпланетных космических аппаратов.

Ограничения на точность лазерных и радиотехнических дальномерных измерений накладываются фактом различия скорости света в различных слоях земной атмосферы.

Точность современных дальномерных наблюдений ИСЗ составляет 1 см. Точность измерения дальности от наземного дальномера до отражателя на Луне достигает 2-3 сантиметра.

Точную связь измеряемой величины $\Delta\tau$ с координатами небесного тела в некоторой системе прямоугольных координат x, y, z пренебрегая эффектами общей теории относительности можно записать с помощью соотношений

$$\begin{aligned}\Delta\tau &= \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2, \\ \Delta\tau_1 &= t_2 - t_1 = \frac{1}{c} \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2}, \\ \Delta\tau_2 &= t_3 - t_2 = \frac{1}{c} \sqrt{(x - X_3)^2 + (y - Y_3)^2 + (z - Z_3)^2},\end{aligned}$$

где t_1 - момент излучения импульса, t_2 - момент отражения импульса, t_3 - момент приема импульса. Здесь обозначены через X_1, Y_1, Z_1 координаты пункта измерений в системе x, y, z на момент t_1 , через X_3, Y_3, Z_3 - эти координаты на момент t_3 . При этом координаты небесного тела x, y, z должны быть вычислены на момент t_2 . Момент t_2 не определяется из наблюдений. Его можно вычислить точно итерациями из соотношения

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{c} \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2},$$

полагая в первом приближении $t_2 = t_1 + \Delta\tau/2$. Обычно этого первого приближения бывает достаточно.

5.05.4. Радиотехнические допплеровские наблюдения.

Измеряемой величиной при таких наблюдениях является сдвиг частоты принимаемого радиосигнала по сравнению с постоянной стандартной частотой. Такой сдвиг происходит по эффекту Допплера из-за относительного движения приемника и передатчика. Допплеровские

измерения дают нам относительную лучевую скорость приближения небесного тела v . Ее можно определить по формуле

$$v = c \frac{f - f_0}{f_0},$$

где c - скорость света, f_0 - частота радиосигнала передатчика, f - частота принимаемого радиосигнала.

Допплеровские измерения используются для наземной навигации с помощью навигационных ИСЗ. Такие измерения ведутся при определении движения межпланетных космических аппаратов.

При радиолокации планет также можно определять относительную скорость планеты. Более ценной является возможность определения скорости вращения планеты по степени "размытости" частотного спектра отраженного радиосигнала. Это явление возникает из-за различия скоростей разных частей поверхности планеты относительно Земли при вращении планеты.

Ограничения на точность допплеровских измерений также, как и в случае дальномерных измерений, накладываются фактом различия скорости света в различных слоях земной атмосферы.

Точность допплеровских наблюдений небесных тел зависит от того, какое небесное тело наблюдается, а также от цели наблюдений. Техника таких наблюдений постоянно совершенствуется. Поэтому трудно оценить реальную точность современных допплеровских наблюдений. По крайней мере эта точность в случае навигационных спутников в пересчете на координаты оказывается не хуже, чем 10 см.

5.05.5. Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой.

Прицип таких наблюдений следующий. Имеются два радиотелескопа, разнесенных на большое расстояние друг от друга. Известны достаточно точно координаты телескопов в системе координат, связанной с Землей. На двух радиотелескопах производится одновременная запись радиосигнала весьма удаленного радиоисточника. Обычно наблюдают внегалактические радиоисточники. При этом осуществляется точная привязка сигналов к общей шкале времени. В каждой из двух записей с высокой точностью по времени идентифицируются отдельные всплески сигнала. При обработке таких наблюдений определяется разность по времени приходов одного и того же сигнала на два радиотелескопа. Эта разность и является измеряемой величиной.

По таким радиоинтерферометрическим наблюдениям определяют ориентацию тела Земли в системе координат, связанной с удаленными радиоисточниками. На сегодня это самый точный способ определения параметров вращения Земли. Определяется положение мгновенной оси вращения Земли и угол поворота Земли относительно этой оси. По этим данным изучают движение полюса Земли в земной системе координат. Данные служат также для построения модели движения мгновенной оси вращения Земли относительно невращающейся системы координат, связанной с внегалактическими радиоисточниками. До недавнего времени такое движение разлагалось на два: прецессию и нутацию.

Заметим, что существуют проекты таких радиоинтерферометрических наблюдений, в которых один или оба радиотелескопа вынесены на орбиту вокруг Земли.

5.05.6. Другие типы наблюдений для небесной механики.

Постоянно ведутся поиски новых возможностей для повышения точности наблюдений небесных тел. Прогресс может достигаться совершенствованием наблюдательной техники. Время от времени изобретаются также новые способы наблюдений. Однако всегда существовала возможность получения позиционных данных о небесных телах путем фотометрии некоторых видимых явлений, обстоятельства которых зависят от взаимного расположения тел. К таким явлениям относятся покрытия звезд Луной, покрытия звезд планетами, астероидами и спутниками планет. Особый тип таких явлений – это взаимные покрытия и затмения спутников планет.

Методы наблюдений взаимных покрытий и затмений спутников планет, из обработки и использование рассматриваются в специальном разделе. Здесь же рассмотрим кратко наблюдения покрытий звезд.

Достаточно часто происходят покрытия ярких или не очень ярких звезд Луной. При фотометрических наблюдениях такого явления удается отделить мощность светового потока, приходящего от покрываемой звезды. Измеряемой величиной является звездная величина звезды или ее световой поток, как функция времени. Этот световой поток зависит от расположения звезды относительно видимого края Луны. Таким образом, если известны точно координаты Звезды, то измеряемая величина зависит от положения края Луны. Положение видимого края Луны зависит в свою очередь от положения ее центра масс в пространстве, ориентации тела Луны и рельефа Лунной поверхности. Поэтому из наблюдений покрытий звезд Луной можно уточнять параметры движе-

ния центра масс Луны, параметры ее вращения и рельеф поверхности. Определять все эти параметры только по наблюдения покрытий звезд Луной оказывается невозможным из-за большого числа этих параметров и неопределенностей, связанных с рельефом поверхности. Поэтому такие наблюдения используются только совместно с наблюдениями других типов.

Наблюдения покрытий звезд астероидами являются очень ценным источником астрометрических данных. Результаты таких наблюдений позволяют решать весьма трудную задачу связи систем координат, в которой отсчитывается движение тел Солнечной системы, с системами координат звездных каталогов. Кроме того, наблюдение покрытия звезды конкретным астероидом несет информацию о размерах и форме астероида, который при обычных наблюдениях не проявляет себя, как протяженное тело. Иногда оказывается, что в процессе наблюдения покрытия появляются один за другим два спада суммарного светового потока. Так удается открыть двойственность астероида. К сожалению, явления покрытий не очень слабых звезд астероидами весьма редки. Точность эфемерид астероидов оказывается недостаточной для того, чтобы точно предсказать явление. Поэтому приходится довольствоваться некоторой вероятностью того, что данное явление действительно произойдет на данной обсерватории. Только малая доля предвычисленных явлений действительно происходит и наблюдается. Поскольку вероятность предсказания явления для отдельной обсерватории невелика, очень важно пытаться наблюдать его на максимально возможном числе обсерваторий, покрывающих максимальную часть поверхности Земли.

Измеряемой величиной при покрытии звезды астероидом является суммарный световой поток от звезды и астероида. Эта измеряемая величина зависит от видимого положения астероида относительно звезды, за исключением моментов полного покрытия звезды, когда световой поток от звезды отсутствует, а суммарный поток неизменен. Наиболее часто происходят явления, когда звезда более яркая, чем астероид. В силу редкости рассматриваемых явлений, они рассматриваются как важные события.

Покрытия звезд большими планетами и спутниками планет еще более редки, чем покрытия астероидами. Наблюдения таких явлений выполняются и используются аналогично.

Мы не рассмотрели некоторые другие типы, более редкие в практике наблюдений, выполняемых для решения задач небесной механики. Нет возможности рассмотреть все. Отметим, что мы не рассматрива-

ем наблюдения, выполняемые с помощью межпланетных космических аппаратов. Просто следует иметь в виду, что такие наблюдения производятся.