

Н.В.Емельянов

**ДИНАМИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ
НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

ГАИШ МГУ - 2019

НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ

Резюме

Цель этой главы — представить методы для построения условных уравнений, с помощью которых делается уточнение параметров движения спутников на основе наблюдений, как описано ниже в Главе 6. Нужно вычислить теоретическое значение измеряемой величины и ее частные производные по уточняемым параметрам. Это делается по-разному для разных методов наблюдений. Рассматриваются случаи абсолютных измерений координат спутников на небе, относительные измерения координат спутника и планеты или двух спутников. Рассматриваются специальные методы наблюдений спутников, описана техника наземных наблюдений. В конце главы уделяется внимание шкалам времени и системам координат, сопутствующим данным наблюдений.

Отметим, что в настоящей главе описан метод уточнения массы спутника по астрометрическим наблюдениям других спутников, а в Главе 11 приводится решение этой задачи, выполненное автором данной книги.

5.1. Общие принципы наблюдений

На небесные тела мы смотрим «глазами» приборов, с помощью которых наблюдаем. Естественно, что когда мы говорим «наблюдения», подразумеваем «измерения». Что же мы измеряем? Наши приборы могут измерять углы направлений на небесные тела, расстояния до них, а также скорость изменения расстояния. В любом случае мы имеем дело с вектором, начало которого расположено в

точке наблюдения, а конец — на небесном теле, которое наблюдаем. Будем называть этот вектор *вектором наблюдения*.

Известно, что распространение света в пределах Солнечной системы описывается общей теорией относительности. Согласно этой теории, в частности, происходит искривление лучей света из-за массы Солнца. В нашем рассмотрении процессов наблюдений мы будем пренебрегать эффектами общей теории относительности.

Каждому наблюдению приписывают момент наблюдения. Это момент регистрации в фотоприемнике тех фотонов, которые были излучены наблюдаемым спутником или планетой. Следует учитывать тот факт, что из-за конечности скорости света момент старта фотонов с наблюдаемого небесного тела предшествует моменту наблюдения.

Для практических действий необходимо связать вектор наблюдения с одной стороны с прямоугольными координатами небесных тел, с другой стороны — с теми величинами, которые мы измеряем с помощью приборов и которые мы будем называть *измеряемыми величинами*.

Параметры движения спутников определяются на основе наблюдений с использованием измеряемых величин. Однако оказывается, что вывести прямую зависимость этих параметров от измеряемых величин невозможно. Для определения параметров применяется специальный метод дифференциального уточнения, который рассмотрен в следующей главе. Согласно этому методу, необходима обратная операция — вычисление измеряемой величины по заданным параметрам движения.

Прямоугольные координаты могут вычисляться с помощью процедур, разработанных при построении теорий движения. При заданных параметрах движения процедура дает координаты на любой заданный момент времени, который называют входным моментом теории. Под временем здесь имеется в виду аргумент времени, фигурирующий в дифференциальных уравнениях движения небесного тела.

В следующих разделах мы сначала выведем соотношения между векторами наблюдений и прямоугольными координатами небесных тел. Затем получим связь векторов наблюдений с измеряемыми величинами.

В конце настоящей главы мы рассмотрим некоторые детали техники наблюдений спутников планет.

Полезную информацию по рассматриваемым здесь вопросам можно найти в работе (Емельянов, 2017).

Важное замечание. Следует обратить внимание на широко используемую терминологию, связанную с наблюдениями спутников планет. Когда мы говорим «наблюдения», то подразумеваем уже не процесс, а сами результаты измерений. Очень часто наблюдениями называют данные, которые порождаются в процессе наблюдения небесных тел. Также и в настоящей книге во многих случаях под наблюдениями подразумеваются данные: числа, сопровождаемые объяснениями.

Заметим, что наблюдения, представляя собой реально существующие значения некоторых реально измеряемых величин, неминуемо связаны с понятием времени и с таким абстрактным понятием, как система координат. Время на самом деле также измеряется с помощью приборов, а системы координат моделируются путем связывания координат с некоторыми реально существующими объектами. Подробнее эти обстоятельства рассмотрены ниже в конце данной главы.

Очевидно, что время не имеет ни начала ни конца. Однако его нужно измерять. Для этого необходимо задать некоторый момент, от которого будут отсчитываться все другие моменты времени. Таким начальным моментом принято считать 12 часов 1 января 2000 года в той же шкале, в которой отсчитываются другие моменты. Этот начальный момент называют и обозначают эпохой J2000. Юлианский день эпохи J2000 равен 2451545.0.

5.2. Определение топоцентрических положений планет и спутников

Наблюдения небесных тел проводятся с поверхности Земли или с орбиты искусственного спутника Земли. Особый случай наблюдений с борта межпланетного космического аппарата мы здесь не рассматриваем.

Точку земной поверхности, в которой проводятся наблюдения, обычно называют топоцентром. Положение топоцентра относительно геоцентра определяется его положением в земной системе координат. В рассматриваемых здесь задачах это можно делать приближенно. Здесь же мы будем полагать, что топоцентр совпадает с геоцентром.

Модели движения тел в их орбитальном движении вокруг Солнца обычно рассматривают в гелиоцентрической системе координат или в барицентрической системе координат с началом, расположенном в барицентре Солнечной системы.

Теории и модели движения спутников планет строятся в системе координат с началом, расположенном либо в центре планеты, либо в барицентре системы планета-спутники. В общем случае будем называть эту точку просто планетой.

Таким образом, в настоящем разделе будут фигурировать следующие точки: центр Солнца, барицентр Солнечной системы, топоцентр, планета, спутник.

Барицентрические векторы Солнца, топоцентра и планеты будем обозначать через $\mathbf{H}(t)$, $\mathbf{T}(t)$, $\mathbf{P}(t)$, соответственно. Гелиоцентрические координаты топоцентра и планеты будут обозначены через $\mathbf{T}_h(t)$, $\mathbf{P}_h(t)$. Введенные здесь векторы рассматриваются как функции времени. Для их вычисления служат специально разрабатываемые модели движения. Заданной входной величиной таких вычислительных процедур является величина t — независимая переменная, условно называемая аргументом времени. Аргументом времени в разных теориях может быть время, отсчитываемое в разных шкалах, например, TT, TDB. Мы будем предполагать, что перед постановкой в процедуру вычисления вектора положения небесного тела время выражено в необходимой шкале.

5.3. Наблюдения планеты

Предположим для начала, что мы наблюдаем планету. Рассмотрим, как определяется в этом случае вектор наблюдения. Допустим, что наблюдение выполняется в момент времени t_0 . Вектор наблюдения имеет начало в топоцентре, а конец — в наблюдаемом небесном теле при том его положении, которое оно имело в момент, когда с него стартовали те фотоны, которые попали в фотоприемник наблюдателя в момент t_0 . Обозначим вектор наблюдения планеты через \mathbf{P}_T .

Моменту старта фотонов будем приписывать разные индексы в зависимости от объекта наблюдения. Если мы наблюдаем планету, то момент старта фотонов можно обозначить через t_1 .

На рис. 5.1 показана схема расположения планеты и топоцентра в соответствующие моменты времени. Буквой B помечен бари-

центр, буквой T — топоцентр, а буквой P — планета. На рисунке видно, что вектор наблюдения определяется равенством

$$\mathbf{P}_T = \mathbf{P}(t_1) - \mathbf{T}(t_0). \quad (5.1)$$

Моменты времени t_0 и t_1 не совпадают. Их разность, называемая световым временем, задается соотношением

$$t_0 - t_1 = \frac{|\mathbf{P}_T|}{c}, \quad (5.2)$$

где c — скорость света. Поскольку момент наблюдения t_0 задан, то уравнения (5.1) и (5.2) можно решить итерациями, полагая для начала $t_1 = t_0$.

Наиболее точные из существующих в настоящее время теорий движения планет позволяют определять их прямоугольные координаты в системе координат с началом в барицентре Солнечной системы. Обычно теория дает также координаты Солнца в этой системе. Всегда можно сделать соответствующее преобразование и определять гелиоцентрические координаты планет.

Замечание.

Здесь сделаем одно важное замечание. В некоторых работах можно встретить утверждение, что система координат берется гелиоцентрической, то есть начало системы координат помещено в центр Солнца. Положение топоцентра и положение планеты при этом задается гелиоцентрическими координатами. Требуется определить вектор наблюдения \mathbf{P}_T . Применение здесь гелиоцентрических координат приводит к неточности, которая обнаруживается при сравнении наблюдений с теорией. Поясним, в чем источник этой неточности. Покажем далее, что для вычисления вектора наблюдения необходимо брать барицентрические координаты Солнца и планет.

Обозначим через $\mathbf{P}_h(t_1)$, $\mathbf{T}_h(t_0)$ гелиоцентрические векторы планеты и топоцентра в соответствующие моменты времени. По аналогии с предыдущими рассуждениями вектор наблюдения может быть построен как разность

$$\mathbf{P}'_T = \mathbf{P}_h(t_1) - \mathbf{T}_h(t_0),$$

где для вектора наблюдения здесь использовано другое обозначение. На самом деле такое построение оказывается неправильным.

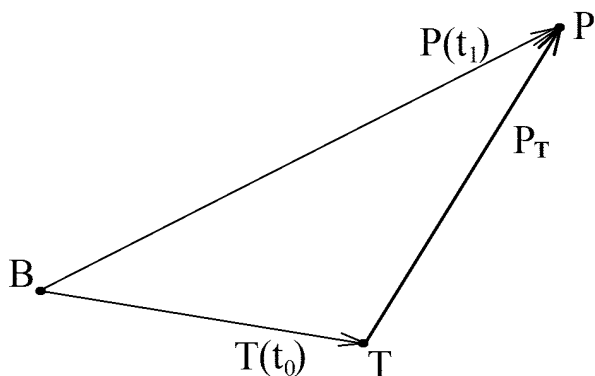


Рис. 5.1. Расположение Земли и планеты при наблюдениях.

Для объяснения введем в рассмотрение барицентрические векторы Солнца в соответствующие моменты времени $\mathbf{H}(t_0)$, $\mathbf{H}(t_1)$. При этом очевидны равенства

$$\mathbf{P}_h(t_1) = \mathbf{P}(t_1) - \mathbf{H}(t_1), \quad \mathbf{T}_h(t_0) = \mathbf{T}(t_0) - \mathbf{H}(t_0).$$

Подстановка этих равенств в предыдущую формулу дает

$$\begin{aligned} \mathbf{P}'_T &= [\mathbf{P}(t_1) - \mathbf{H}(t_1)] - [\mathbf{T}(t_0) - \mathbf{H}(t_0)] = \\ &= \mathbf{P}(t_1) - \mathbf{T}(t_0) - [\mathbf{H}(t_1) - \mathbf{H}(t_0)] = \\ &= \mathbf{P}_T - [\mathbf{H}(t_1) - \mathbf{H}(t_0)]. \end{aligned}$$

Расположение рассматриваемых векторов иллюстрирует рис. 5.2. Для построения вектора \mathbf{P}'_T мы должны совместить начало вектора $\mathbf{T}_h(t_0)$ с началом вектора $\mathbf{P}_h(t_1)$. Теперь видно, что \mathbf{P}'_T отличается от \mathbf{P}_T на разность $\mathbf{H}(t_1) - \mathbf{H}(t_0)$. Это можно интерпретировать так, что за время $t_1 - t_0$ Солнце успевает сместиться на величину $\mathbf{H}(t_1) - \mathbf{H}(t_0)$, что и приводит к разности рассматриваемых векторов. Если бы скорость света была бы бесконечной, то оказалось бы, согласно соотношению (5.2), что $t_1 - t_0 = 0$, следовательно $\mathbf{H}(t_1) - \mathbf{H}(t_0) = 0$ и $\mathbf{P}'_T = \mathbf{P}_T$.

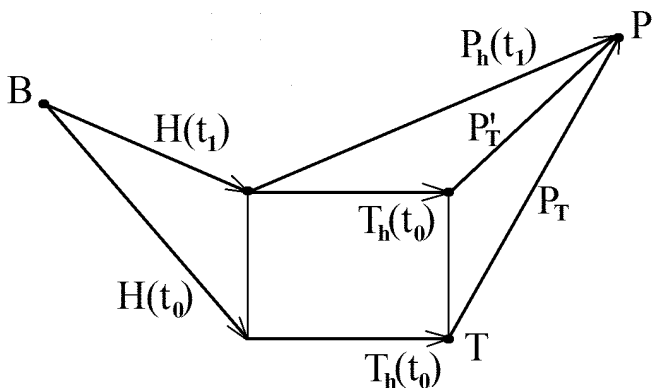


Рис. 5.2. Ошибочное построение вектора наблюдения на основе гелиоцентрических векторов планеты и Земли.

5.4. Наблюдения спутника планеты

Теперь рассмотрим ситуацию, когда мы наблюдаем одновременно планету и спутник планеты. Необходимо определить векторы наблюдений этих тел.

Аналитическая теория или численная модель движения спутника планеты позволяет определять его прямоугольные планетоцентрические координаты на любой заданный момент времени t . Вектор наблюдения спутника в этом случае имеет начало в топоцентре, а конец — в центре масс спутника на тот момент t_1 , в который с него стартовали фотоны, попавшие затем в фотоприемник в момент времени t_0 . Обозначим вектор наблюдения спутника через $\mathbf{S}_T^{(1)}$, а через $\mathbf{S}_p^{(1)}(t_1)$ — планетоцентрический вектор спутника в момент t_1 . Теперь для определения $\mathbf{S}_T^{(1)}$ можно записать соотношение

$$\mathbf{S}_T^{(1)} = \mathbf{S}_p^{(1)}(t_1) + \mathbf{P}(t_1) - \mathbf{T}(t_0).$$

Для определения момента t_1 теперь следует использовать уравнение

$$t_0 - t_1 = \frac{|\mathbf{S}_T^{(1)}|}{c}. \quad (5.3)$$

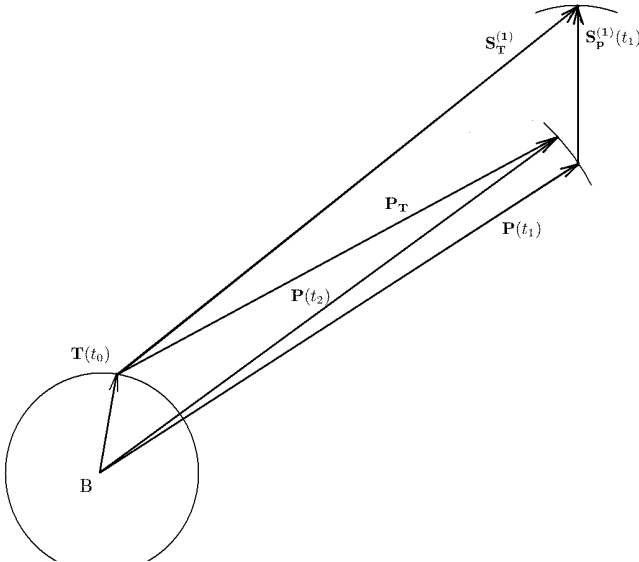


Рис. 5.3. Расположение Земли и планеты при наблюдениях.

Поскольку расстояние от топоцентра до планеты другое, чем расстояние от топоцентра до спутника, то момент старта фотонов от планеты, который мы обозначим здесь через t_2 , отличается от t_1 . Вектор наблюдения планеты в этом случае определится из соотношений

$$\mathbf{P}_T = \mathbf{P}(t_2) - \mathbf{T}(t_0), \quad (5.4)$$

$$t_0 - t_2 = \frac{|\mathbf{P}_T|}{c}. \quad (5.5)$$

5.5. Наблюдения двух спутников планеты

Рассмотрим случай, когда мы наблюдаем одновременно планету и два ее спутника. Аналитическая теория или численная модель движения спутников позволяет определять их прямоугольные планетоцентрические координаты на любой заданный момент времени t . Вектор наблюдения каждого спутника имеет начало в топоцентре, а конец — в центре масс спутника в тот момент, в который с него стартовали фотоны, попавшие затем в фотоприемник в момент

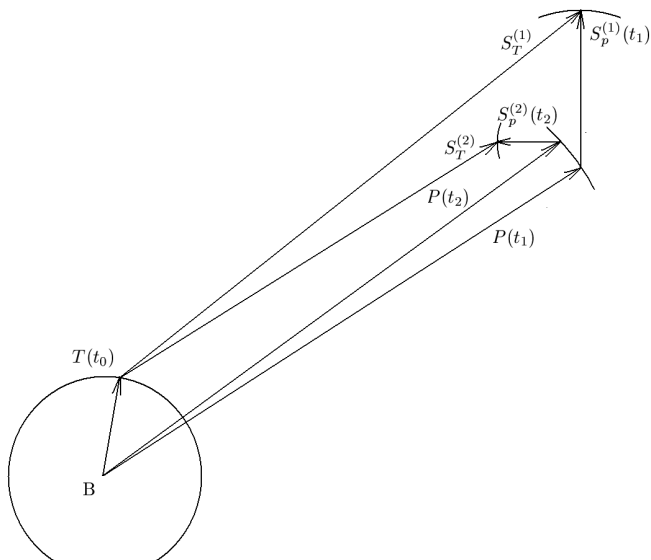


Рис. 5.4. Расположение Земли, планеты и спутников в моменты времени, соответствующие моменту наблюдения. Индекс 1 относится к спутнику номер 1, индекс 2 — к спутнику номер 2.

времени t_0 . Обозначим этот вектор первого спутника через $\mathbf{S}_T^{(1)}$, а вектор наблюдения второго — через $\mathbf{S}_T^{(2)}$.

Фотоны, попавшие в фотоприемник в момент наблюдения t_0 , стартовали с первого спутника в некоторый момент времени t_1 , а со второго — в момент времени t_2 .

Обозначим через $\mathbf{S}_p^{(1)}(t_1)$ планетоцентрический вектор первого спутника в момент t_1 . Бариецентрический вектор планеты в этот момент был $\mathbf{P}(t_1)$. Соответствующие векторы для второго спутника будут $\mathbf{S}_p^{(2)}(t_2)$ и $\mathbf{P}(t_2)$.

Все рассматриваемые здесь векторы показаны на рис. 5.4.

Теперь для определения векторов наблюдения $\mathbf{S}_T^{(1)}$ и $\mathbf{S}_T^{(2)}$ можно использовать следующие уравнения:

$$\mathbf{S}_T^{(1)} = \mathbf{S}_p^{(1)}(t_1) + \mathbf{P}(t_1) - \mathbf{T}(t_0),$$

$$\mathbf{S}_T^{(2)} = \mathbf{S}_p^{(2)}(t_2) + \mathbf{P}(t_2) - \mathbf{T}(t_0),$$

$$t_0 - t_1 = \frac{|\mathbf{S}_T^{(1)}|}{c},$$

$$t_0 - t_2 = \frac{|\mathbf{S}_T^{(2)}|}{c}.$$

Решать эти уравнения можно последовательными приближениями, полагая сначала $t_1 = t_0$, $t_2 = t_0$.

5.6. Определение угловых измеряемых величин при наблюдениях спутников планет

Аналитическая теория или численная модель движения спутника планеты позволяет определять его прямоугольные планетоцентрические координаты на любой заданный момент времени. При уточнении орбитальных параметров на основе наблюдений необходимо вычислять угловые измеряемые величины на моменты наблюдений. В предыдущих разделах рассмотрены методы определения векторов наблюдений по прямоугольным планетоцентрическим координатам спутников и барицентрическим координатам планет. Теперь необходимо связать измеряемые величины с векторами наблюдений планеты и спутников.

При уточнении параметров движения спутников в качестве измеряемых величин используются угловые топоцентрические координаты. Угловые координаты отсчитываются в геоэквиаториальной системе координат, связанной с экватором и эклипстикой некоторой эпохи. В публикациях прошлых десятилетий встречаются координаты в системе среднего экватора и точки весны различных эпох. Использовались и системы истинного экватора и равноденствия. При этом моделировались прецессия и нутация земной оси. В современных работах экваториальная система координат относится к экватору и эклиптике эпохи J2000. Однако фиксация осей координат уже не связана с вращением Земли. Система опирается на положения внегалактических источников радиоизлучения и называется международной небесной системой координат — International Celestial Reference Frame (ICRF).

В настоящем разделе мы будем предполагать, что оси всех рассматриваемых систем прямоугольных координат соответственно параллельны осям некоторой невращающейся геоэквиаториальной системы, например, ICRF. Угловые координаты планеты и спутников, определенные по векторам наблюдений, рассмотренным в

предыдущих разделах, называют *астрометрическими*. В отличие от астрометрических, использовались также так называемые видимые координаты. Для видимых координат векторы наблюдений определяются иначе, чем рассмотрено выше. Это объяснено, например, в книге Introduction aux Ephémérides Astronomiques, 1997). Здесь же мы рассматриваем только астрометрические координаты.

В геоэквиаториальной системе, наряду с прямоугольными, используют сферические координаты. Широта в геоэквиаториальной системе называется склонением, а долгота — прямым восхождением. Для любого вектора наблюдения с компонентами x, y, z прямое восхождение α и склонение δ определяются из соотношений

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x}, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Прямое восхождение и склонение небесного тела, которые называют еще *абсолютными* координатами, могут быть измеряемыми величинами.

Наряду с абсолютными используются также относительные координаты. Это разности небесных координат каких-либо двух тел: спутника и планеты, двух спутников. Если прямые восхождения первого и второго тел обозначить соответственно через α_1, α_2 , а склонения через δ_1, δ_2 , то разности

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1, \quad \Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$$

называют дифференциальными координатами и используют в качестве измеряемых величин. Чаще применяются измеряемые величины

$$X_d = (\alpha_2 - \alpha_1) \cos \delta_1, \quad Y_d = \delta_2 - \delta_1.$$

Наряду с дифференциальными угловыми координатами X_d, Y_d рассматривают также так называемые тангенциальные координаты X_t, Y_t , определяемые следующим образом. Это всегда координаты одного тела относительно другого. Если небесное тело номер 1 отображается в фокальной плоскости телескопа на оптической оси, то X_t и Y_t есть линейные координаты тела номер 2 на фокальной плоскости, выраженные в долях фокусного расстояния. При этом считается, что ось Y_t параллельна проекции оси вращения Земли в эпоху J2000 и направлена в северный полюс мира. Как вычислять тангенциальные координаты, рассмотрено ниже.

Для запуска процесса уточнения параметров движения небесных тел из наблюдений необходимо выразить измеряемые угловые координаты через компоненты векторов наблюдений. Выражение абсолютных координат через компоненты вектора наблюдения дано выше. Рассмотрим здесь, как вычислять относительные дифференциальные угловые координаты двух небесных тел.

Дифференциальные координаты можно было бы найти как разности абсолютных координат двух тел. Однако такой способ не является оптимальным. Дело в том, что наблюдаемые пары тел чаще всего располагаются на небе очень близко одно к другому. Тогда вычитание топоцентрических угловых координат тел состоит в вычитании двух близких чисел, что приводит к некоторой потере точности. Разности планетоцентрических координат двух спутников не связаны с вычитанием двух близких чисел. Именно эти разности следовало бы использовать для вычислений.

По этим причинам поступим следующим образом. Обозначим через X, Y, Z компоненты вектора наблюдения первого спутника. Тогда имеем

$$\{X, Y, Z\} = \mathbf{S}_T^{(4)}.$$

Компоненты разности векторов наблюдения второго и первого спутника обозначим через $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$. Тогда имеем

$$\{\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z\} = \mathbf{S}_T^{(2)} - \mathbf{S}_T^{(1)} = \mathbf{S}_p^{(2)}(t_2) - \mathbf{S}_p^{(1)}(t_1) + \mathbf{P}(t_2) - \mathbf{P}(t_1).$$

Здесь векторы $\mathbf{S}_p^{(2)}(t_2), \mathbf{S}_p^{(1)}(t_1)$ сами по себе малы, а векторы $\mathbf{P}(t_2)$ и $\mathbf{P}(t_1)$ вычисляются для весьма близких моментов времени. Поэтому вычитание двух близких чисел не приводит к потере точности при вычислении $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$.

Заметим, что если первым телом является не спутник, а сама планета, то в последнем соотношении нужно просто положить $\mathbf{S}_p^{(1)}(t_1) = 0$.

Для вычисления дифференциальных координат $\Delta\alpha, \Delta\delta$ в разных публикациях предлагаются простые приближенные формулы, основанные на малости отношения

$$\frac{|\mathbf{S}_T^{(2)} - \mathbf{S}_T^{(1)}|}{|\mathbf{S}_T^{(1)}|}$$

по сравнению с единицей. Однако для вычислений легко запрограммировать точные формулы, выведенные в работе (Емельянов, 1999). Вычисления выполняются по следующей цепочке формул:

$$\begin{aligned}
 R^2 &= X^2 + Y^2, \\
 \operatorname{tg} \Delta\alpha &= \frac{-Y\Delta_x + X\Delta_y}{R^2 + X\Delta_x + Y\Delta_y}, \\
 A &= 2R^2 Z\Delta_z - 2Z^2(X\Delta_x + Y\Delta_y) + R^2\Delta_z^2 - Z^2(\Delta_x^2 + \Delta_y^2), \\
 B &= R\sqrt{(X + \Delta_x)^2 + (Y + \Delta_y)^2} + Z(Z + \Delta_z), \\
 C &= R(Z + \Delta_z) + Z\sqrt{(X + \Delta_x)^2 + (Y + \Delta_y)^2}, \\
 \operatorname{tg} \Delta\delta &= \frac{A}{BC}.
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

5.7. Вычисление углового расстояния между спутниками и позиционного угла

При уточнении орбит естественных спутников планет помимо разностей угловых координат небесных тел в качестве измеряемой величины используется также угловое расстояние s между спутниками. Преимущества использования такой измеряемой величины заключается в том, что она не зависит от ошибки определения ориентации изображения по отношению к направлению на северный полюс мира.

Мы предлагаем для вычисления углового расстояния между спутниками s следующую формулу:

$$\operatorname{tg} s = \frac{\sqrt{(Y\Delta_z - Z\Delta_y)^2 + (Z\Delta_x - X\Delta_z)^2 + (X\Delta_y - Y\Delta_x)^2}}{X^2 + Y^2 + Z^2 + X\Delta_x + Y\Delta_y + Z\Delta_z}.$$

Здесь вычисление разностей не приводит к увеличению ошибки при вычитании двух близких чисел.

В качестве измеряемой величины может использоваться также позиционный угол P . Это угол на небесной сфере с вершиной в точке, соответствующей первому спутнику, между большим кругом, соединяющим направления на спутники, и линией склонений (большой круг на небесной сфере, соединяющий первый спутник и полюс мира). Для вычисления позиционного угла нужно сначала вычислить абсолютные координаты первого спутника, которые мы

здесь для краткости запишем без индексов как α, δ , затем вычислить дифференциальные координаты $\Delta\alpha, \Delta\delta$ по формулам, которые приведены выше. Тогда позиционный угол P найдется из точного соотношения

$$\operatorname{tg} P = \frac{\cos(\delta + \Delta\delta) \sin \Delta\alpha}{\sin \Delta\delta + 2 \cos(\delta + \Delta\delta) \sin \delta \sin^2 \frac{\Delta\alpha}{2}}. \quad (5.7)$$

Приближенно позиционный угол можно определить, пользуясь формулой

$$\operatorname{tg} P = \frac{X_d}{Y_d}.$$

5.8. Определение тангенциальных координат спутников

Заметим, что в практике обработки астрометрических наблюдений естественных спутников планет, кроме дифференциальных угловых координат, используют также так называемые тангенциальные координаты небесных тел. Как было указано выше, это линейные координаты в плоскости изображения. Начало координат совпадает с оптическим центром поля зрения, одна из осей, X_t , направлена по изображению небесной параллели в сторону востока, а другая, Y_t , — перпендикулярно первой оси к северу. Линейной единицей измерений является фокусное расстояние телескопа. Приближенно разности тангенциальных координат двух спутников совпадают с их дифференциальными угловыми координатами, однако точные формулы для вычисления разностей тангенциальных координат отличаются от формул для дифференциальных угловых координат.

Обычно задаются тангенциальные координаты одного небесного тела относительно другого. Тогда считают, что изображение этого другого тела находится точно на оптической оси, а плоскость изображения перпендикулярна этой оси. Допустим, что нужно вычислить тангенциальные координаты спутника 1 относительно спутника 2. Пусть, как и выше, топоцентрический радиус-вектор второго спутника есть

$$\mathbf{S}_T^{(2)} = \{X, Y, Z\},$$

а разность векторов положения спутников обозначена через $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$. Тогда тангенциальные координаты можно определить по следующим формулам:

$$X_t = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}(-\Delta_x Y + \Delta_y X)}{\sqrt{X^2 + Y^2}(X^2 + Y^2 + Z^2 + \Delta_x X + \Delta_y Y + \Delta_z Z)},$$

$$Y_t = \frac{-\Delta_x X Z - \Delta_y Y Z + \Delta_z(X^2 + Y^2)}{\sqrt{X^2 + Y^2}(X^2 + Y^2 + Z^2 + \Delta_x X + \Delta_y Y + \Delta_z Z)}.$$

Тангенциальный позиционный угол P_t находится из соотношения

$$\operatorname{tg} P_t = \frac{X_t}{Y_t}, \quad (5.8)$$

а тангенциальное расстояние s_t по формуле

$$s_t = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2}.$$

5.9. Определение разности координат двух спутников планеты в случае фотометрических наблюдений взаимных затмений спутников

Рассмотрим здесь специальный случай определения векторов наблюдений спутников при определении астрометрических координат спутников планеты на основе фотометрии спутников во время их взаимных затмений. Фотометрические наблюдения взаимных затмений двух спутников планеты позволяют с высокой точностью определять взаимные расположения спутников. Рассматриваемое явление состоит в том, что один из спутников частично или полностью попадает в тень, отбрасываемую другим спутником. При этом его яркость во время наблюдений с Земли уменьшается. Уменьшение яркости затмеваемого спутника можно измерить с помощью фотометра или ПЗС-матрицы. Яркость затмеваемого спутника в первую очередь зависит от гелиоцентрического углового расстояния двух спутников. Она зависит также от угла между направлениями с затмеваемого спутника на Солнце и на Землю, то есть от угла солнечной фазы спутника. Что касается гелиоцентрического углового расстояния двух спутников, то именно эта величина определяет изменения яркости затмеваемого спутника во времени, то есть кривую яркости спутника. При обработке рассматриваемых фотометрических наблюдений необходимо точно моделировать процесс

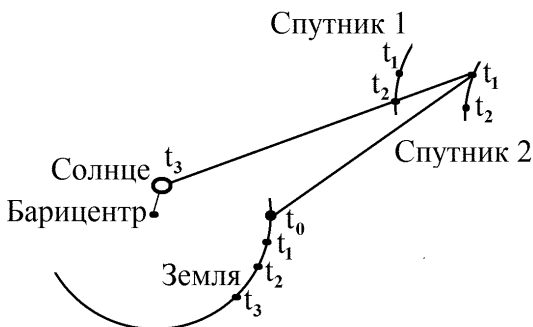


Рис. 5.5. Распространение света при наблюдениях взаимных затмений спутников планет. Последовательность моментов: $t_3 < t_2 < t_1 < t_0$.

распространения света, учитывая конечность скорости его распространения.

Модель рассматриваемого явления поясняет рис. 5.5. Фотоны, излученные Солнцем в момент t_3 , двигаясь прямолинейно, в момент t_2 достигли спутника 2. Бариецентрический вектор Солнца в момент t_3 обозначим через $\mathbf{H}(t_3)$. Часть излученных фотонов попала на поверхность спутника 2. Другие проследовали далее. Бариецентрический радиус-вектор спутника 2 в момент времени t_2 обозначим через $\mathbf{S}^{(2)}(t_2)$. Используя планетную и спутниковую теории, его можно вычислить по формуле

$$\mathbf{S}^{(2)}(t_2) = \mathbf{P}(t_2) + \mathbf{S}_p^{(2)}(t_2). \quad (5.9)$$

Рассматриваемая группа фотонов достигла спутника 1 в некоторый момент t_1 , была рассеяна его поверхностью и проследовала далее в сторону наземного наблюдателя. В момент времени t_0 они достигли Земли и сформировали изображение затмеваемого спутника в фотоприемнике телескопа.

Бариецентрический радиус-вектор спутника 1 в момент времени t_1 мы обозначим через $\mathbf{S}^{(1)}(t_1)$. Его можно вычислить по формуле

$$\mathbf{S}^{(1)}(t_1) = \mathbf{P}(t_1) + \mathbf{S}_p^{(1)}(t_1). \quad (5.10)$$

Разности моментов t_0 , t_1 , t_2 и t_3 задаются соотношениями

$$t_2 - t_3 = \frac{|\mathbf{S}^{(2)}(t_2) - \mathbf{H}(t_3)|}{c},$$

$$t_1 - t_2 = \frac{|\mathbf{S}^{(1)}(t_1) - \mathbf{S}^{(2)}(t_2)|}{c}, \quad (5.11)$$

$$t_0 - t_1 = \frac{|\mathbf{T}(t_0) - \mathbf{S}^{(1)}(t_1)|}{c}.$$

Для определения векторов $\mathbf{H}(t_3)$, $\mathbf{S}^{(2)}(t_2)$ и $\mathbf{S}^{(1)}(t_1)$ необходимо знать моменты времени t_3 , t_2 и t_1 . Искомые векторы и соответствующие моменты времени можно найти, решая итерациями систему уравнений (5.9), (5.10) и (5.11). В нулевом приближении полагаем $t_3 = t_2 = t_1 = t_0$.

Очевидно, что степень затененности спутника 1 зависит от угла между векторами $\mathbf{S}_H^{(2)}(t_2)$ и $\mathbf{S}_H^{(1)}(t_1)$, определяемыми соотношениями

$$\mathbf{S}_H^{(2)}(t_2) = \mathbf{S}^{(2)}(t_2) - \mathbf{H}(t_3), \quad \mathbf{S}_H^{(1)}(t_1) = \mathbf{S}^{(1)}(t_1) - \mathbf{H}(t_3).$$

Этот угол мы назовем эффективным гелиоцентрическим угловым расстоянием двух спутников и обозначим его через s^* .

Компоненты векторов $\mathbf{S}_H^{(2)}(t_2)$ и $\mathbf{S}_H^{(1)}(t_1)$ обозначим следующим образом:

$$\mathbf{S}_H^{(1)}(t_1) = \{\xi, \eta, \zeta\}, \quad \mathbf{S}_H^{(2)}(t_2) = \{\xi + \Delta_\xi, \eta + \Delta_\eta, \zeta + \Delta_\zeta\}.$$

Тогда s^* определится формулой

$$\operatorname{tg} s^* = \frac{\sqrt{(\eta\Delta_\zeta - \zeta\Delta_\eta)^2 + (\zeta\Delta_\xi - \xi\Delta_\zeta)^2 + (\xi\Delta_\eta - \eta\Delta_\xi)^2}}{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 + \xi\Delta_\xi + \eta\Delta_\eta + \zeta\Delta_\zeta},$$

где малые приращения Δ_ξ , Δ_η , Δ_ζ следует определять по формуле

$$\{\Delta_\xi, \Delta_\eta, \Delta_\zeta\} = \mathbf{S}_H^{(2)}(t_2) - \mathbf{S}_H^{(1)}(t_1) = \mathbf{P}(t_2) - \mathbf{P}(t_1) + \mathbf{S}_P^{(2)}(t_2) - \mathbf{S}_P^{(1)}(t_1).$$

Заметим, что при вычислениях s^* по приведенным выше формулам не происходит потери точности из-за вычитания двух близких чисел.

Если, кроме углового гелиоцентрического расстояния, необходимо вычислять разности угловых гелиоцентрических координат двух спутников, можно воспользоваться формулами, аналогичными формулам (5.6).

5.10. Заключение относительно измеряемых величин при наблюдениях спутников планет

Для определения параметров движения спутников из наблюдений необходимо применять метод дифференциального уточнения, который описан в следующей главе. Для применения этого метода требуется вычислять измеряемые при наблюдениях величины по заданным параметрам движения. Вычисления проводятся по следующей цепочке операций: параметры \Rightarrow планетоцентрические прямоугольные координаты \Rightarrow векторы наблюдений \Rightarrow измеряемые величины. Первый этап выполняется на основе моделей движения спутников. Этому посвящен вышеизложенный материал. Вторым и третьим этапами операций описаны выше в настоящей главе. Теперь мы имеем все необходимое для применения метода определения параметров движения спутников из наблюдений.

Полезную информацию по рассматриваемым здесь вопросам можно найти в работе (Емельянов, 2017).

5.11. Момент видимого сближения спутников планет как измеряемая величина при наблюдениях

Одним из типов измеряемых величин при наблюдениях спутников планет является измерение взаимных угловых расстояний d двух спутников. Поскольку это расстояние зависит от параметров движения обоих спутников, можно уточнять орбиты по базе данных наблюдений с включением таких измерений. Преимуществом оказывается независимость таких измерений от ориентации полученного при наблюдениях изображения относительно полюса мира. Так исключается обычная в таких случаях ошибка ориентации.

Преобразование результата измерения на изображениях спутников в угловое расстояние между спутниками требует знания масштаба изображения, то есть соотношения между линейными расстояниями на изображении, получаемом в фотокамере, и угловыми расстояниями на небесной сфере. Этот масштаб определяется различными способами. Однако в любом случае масштаб сопровождается ошибкой, которая бывает неизвестной и разной для разных кадров изображений, полученных в одну ночь на одном и том же телескопе. Эта ошибка даст ошибку полученного углового расстояния между спутниками, которое и участвует в определении параметров, а в конечном счете ошибку эфемерид спутника.

Чтобы избежать этой ошибки, а именно, исключить ее совсем, в работе (Morgado et al. 2016) был предложен специальный метод измерений. В этом методе сначала определяются угловые расстояния между двумя спутниками на ряд моментов времени на таком интервале, в течение которого происходит какое-нибудь видимое сближение в паре спутников. На этом интервале существует минимум видимого расстояния. Момент минимума t_0 не зависит от самого расстояния. Однако этот момент зависит от движения спутников и, следовательно, зависит от параметров движения. Идея метода, предложенного в работе (Morgado et al. 2016), состоит в том, чтобы использовать этот момент минимума видимого расстояния t_0 между спутниками в качестве измеряемой величины при уточнении параметров движения спутников. Момент минимума определяется путем аппроксимации зависимости видимого расстояния от времени какими-нибудь подходящими функциями. Можно использовать полиномы достаточно высокой степени.

Поскольку момент минимума не зависит от самого расстояния, то полностью исключается ошибка масштаба изображения. Однако измеренные расстояния содержат случайные ошибки измерений на изображениях. Поэтому найденный момент минимума также будет включать в себе некоторую ошибку.

В работе (Morgado et al. 2016) опубликован ряд таких измерений, а именно, ряд моментов видимых сближений в парах Галилеевых спутников Юпитера.

Такой подход требовал тщательного анализа. Дело в том, что точность эфемерид зависит не только от точности наблюдений, но также от состава и типа измеряемых величин. Необходимо было выяснить, как использование моментов видимых сближений спутников в качестве измеряемых величин повлияет на точность эфемерид. Именно эфемериды являются конечным результатом создания модели движения спутников.

Для такого анализа автором настоящей книги еще ранее был подготовлен необходимый инструментарий. Он описан в Главе 8. Необходимый анализ идеи авторов работы (Morgado et al. 2016) был выполнен в работе (Emelyanov, 2017). С этой целью были сформированы массивы эфемерид Галилеевых спутников Юпитера. Эти эфемериды использовались в качестве наблюдений для вычисления на конечном этапе эфемерид спутников на моменты времени, следующие после интервала времени наблюдений. Моменты таких ис-

кусственных наблюдений выбирались небольшими интервалами, на которых взаимные расстояния в парах спутников имели минимум. Наблюдения моделировались на большом множестве таких интервалов. Для анализа ошибок эфемерид к искусственным измерениям прибавлялись случайные ошибки с заданными дисперсиями и нормальным распределением плотности вероятности ошибок. В вычислительной программе использовался датчик случайных чисел. Сравнивались два варианта состава измерений по типам. В первом варианте (d) в качестве измерений моделировались видимые взаимные расстояния. Во втором варианте (t_0) использовались моменты видимых сближений спутников, вычисленные по взаимным расстояниям.

Случайные ошибки в этом эксперименте задавались следующим образом. Всем моделируемым взаимным расстояниям придавались случайные ошибки с дисперсией, соответствующей точности современных реальных наблюдений. Кроме того, на каждом интервале времени сближения пары спутников к модельным расстояниям прибавлялась одна и та же ошибка, моделирующая ошибку масштаба, присутствующую в реальных наблюдениях. Для разных интервалов сближений выбирались разные значения ошибки масштаба. Для всей совокупности интервалов ошибки выбирались случайным образом с заданной дисперсией ошибки масштаба (scale) σd_s . Так моделировалась ситуация, существующая при реальных наблюдениях.

По так смоделированным наблюдениям сначала определялись параметры орбит, а потом вычислялись эфемериды на ряд моментов времени, следующих после интервала времени наблюдений. Процесс повторялся много раз, каждый раз с новым набором случайных ошибок наблюдений. Значения эфемеридных координат оказывались разными в разных наборах случайных ошибок наблюдений. Точность эфемерид оценивалась по среднеквадратичным значениям отклонений эфемерид от некоторой опорной эфемериды, полученной при нулевых ошибках наблюдений.

Эксперимент проводился несколько раз при разных значениях ошибки масштаба σd_s . Каждый раз оценивалась точность эфемерид. Сравнивались между собой два набора состава наблюдений, различающихся по типам измерений. В первом наборе (варианте) использовались взаимные расстояния d , во втором варианте — моменты видимых сближений t_0 . Получились следующие результа-

ты. При нулевой ошибке масштаба ($\sigma d_s = 0$) ошибка эфемерид во втором наборе (t_0) оказалась существенно большей, чем в первом (d). При увеличении ошибки масштаба σd_s ошибка эфемерид в первом варианте (d) увеличивалась, а во втором варианте (t_0) оставалась неизменной. Это естественно, поскольку во втором варианте моменты взаимных сближений спутников вообще не зависят от ошибки масштаба. После увеличения σd_s при некотором значении $\sigma d_s = \sigma d_s^{(eg)}$ ошибки эфемерид в двух вариантах сравнялись. После дальнейшего увеличения σd_s ошибка эфемерид в первом варианте (d) продолжала увеличиваться.

Из результатов проведенного эксперимента следует вывод, что новая идея авторов работы (Morgado et al. 2016) дает преимущество только при достаточно больших ошибках масштаба. К сожалению, критическое значение $\sigma d_s^{(eg)}$, определяющее выбор типа наблюдений, найти весьма затруднительно в задачах, основанных на реальных наблюдениях. В работе (Emelyanov, 2017) только лишь установлено существование такого критического значения $\sigma d_s^{(eg)}$.

Проведенный в работе (Emelyanov, 2017) эксперимент показывает, что применение новых типов наблюдений всегда требует тщательного анализа точности получаемых при этом эфемерид.

5.12. Средства и техника наземных наблюдений спутников планет

Техника астрометрических наблюдений спутников планет совершенствовалась в течение веков. До XX века наблюдатели смотрели в окуляр телескопа и видели там, кроме изображений звезд, крест паутинных нитей и еще одну нить, положение которой можно было изменять, вращая микрометрический винт. Крест в окуляре поворачивался наблюдателем так, чтобы одно небесное тело попадало на центральное перекрестие нитей, а другое — на перекрестие с дополнительной нитью. При таких наблюдениях измерялось угловое расстояние между двумя небесными телами s и позиционный угол P с вершиной в одном светиле и лучами, направленными на другое светило и на северный полюс мира. При этом чаще всего эти две величины измерялись в разные моменты времени. Такие наблюдения называются в литературе *микрометрическими*.

В XX веке наблюдатели больше смотрели в микроскоп, рассматривая изображения небесных тел, запечатленных на фотопластин-

ках. Такие наблюдения называются фотографическими. Относительные координаты измерялись под микроскопом сначала в миллиметрах, затем их значения переводились в угловые величины. Координаты планет и спутников под микроскопом отсчитываются относительно звезд. Из звездных каталогов брались необходимые небесные экваториальные координаты звезд сравнения. По этим данным выводились экваториальные координаты планет и спутников, называемые в этом случае абсолютными. Ошибки координат звезд из звездных каталогов напрямую попадали в абсолютные координаты наблюдаемых небесных тел. Для уточнения моделей движения спутников могут использоваться относительные угловые координаты, то есть разности координат двух спутников. По таким данным одновременно в одной системе уравнений уточняются параметры орбит обоих тел. Относительные измерения избавлены от ошибок звездных каталогов, однако проблема точности этих данных связана с неопределенностью на практике в знании масштаба и ориентации изображения.

В конце XX века вместо фотопластинок стали применяться светочувствительные матрицы приборов с зарядовой связью (ПЗС). В англоязычном написании это Charged Coupled Device (CCD). Эти фотоприемники оказались намного более чувствительными и дающими лучшее разрешение изображения. Проблемы ограничения точности наблюдений остались те же, что и для фотопластинок. Однако обработка результатов упростилась с применением мощных компьютеров. Такие наблюдения называются просто ПЗС-наблюдениями.

Проблема внесения ошибок звездных каталогов в измеренные координаты планет и спутников решается путем создания новых более точных звездных каталогов. В последнее время значительный прогресс в этом деле был достигнут созданием мощного астрометрического инструмента, запущенного на орбиту вокруг Земли. Это проект GAIA.

Прогресс в точности звездных каталогов привел к новой необычной задаче. Дело в том, что фотографические астрометрические наблюдения планет и спутников производились с начала XX века. На основе имевшихся тогда в распоряжении звездных каталогов были определены и опубликованы координаты наблюдавшихся небесных тел. Фотопластинки этих эпох до сих пор хранятся в так называемых «стеклянных библиотеках». Теперь появилась возможность

произвести заново измерения координат планет и спутников на сохранившихся фотопластинках и получить новые астрометрические координаты этих небесных тел с помощью современных звездных каталогов. Эта деятельность развивается в последнее время в разных институтах мира. Руководят работами сотрудники парижского Института небесной механики и вычисления эфемерид (IMCCE), Франция (Robert et al., 2016).

Спекл-интерферометрические наблюдения.

Следует особо рассмотреть один особый метод астрометрических наблюдений. Прогресс в астрономической технике привел к появлению спекл-интерферометрических наблюдений. Методика таких измерений состоит в следующем. Дифракционная картина, создаваемая в фокусе телескопа светом от планеты и спутника, регистрируется приемником света (ПЗС-матрица) с очень короткой экспозицией порядка 10 мс (время «замороженности» турбуленции атмосферы). При таком способе регистрации изображение планеты получается в фокальной плоскости телескопа в виде группы пятнышек – спекул, случайно разбросанных внутри небольшой области, определяемой атмосферным кружком размытости изображения. Каждая спекула соответствует некоторой флуктуации света в турбулентной атмосфере Земли. Свет от спутника, попадающий в телескоп под небольшим углом к направлению на планету, при условии, что он проходит через те же флуктуации атмосферы (изопланатизм), создает в фокальной поверхности группу спекул, подобную группе спекул от планеты, но смещенную в соответствии с угловым расстоянием между планетой и спутником и их позиционным углом. Точность регистрации расположения спекул определяется размером дифракционного пятна для данного телескопа. Обычно регистрируют длинный ряд последовательных по времени кадров. Измеренные линейные координаты спекул со всех кадров вводятся в компьютер и подвергаются корреляционному анализу. Каждой спекуле, соответствующей планете, находится спекула, соответствующая спутнику. Статистическая обработка результатов таких измерений дает средние значения углового расстояния и их позиционного угла. В итоге точность спекл-интерферометрических наблюдений в сотни раз превосходит точность, которую дают обычные фотографические наблюдения.

5.13. Источники данных наблюдений спутников планет

Пути результатов наблюдений от наблюдателя до исследователя, который использует эти данные для получения новой информации или для создания эфемерид, бывают весьма различные. В прошлые века очень часто исследователи наблюдали, и сами же определяли орбиты спутников. Однако довольно быстро выработался обычный прием — публиковать наблюдения в научных журналах. При этом, во-первых, возникала возможность сохранить данные на многие годы, и, во-вторых, результаты наблюдений становились доступными любому желающему. Этот прием применяется до сих пор. Например, все наблюдения далеких спутников больших планет поступают в научное издание *Minor Planet Circular* (MPC), к текстам которого в наше время имеется доступ через Интернет на сайте MPC по адресу <https://minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>.

До какого-то времени результаты наблюдений помещались прямо на страницы научного журнала. Больше всего наблюдений в течение веков публикуется в журналах *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (MNRAS), *Astronomische Nachrichten* (AN), *Astronomy and Astrophysics* (AA), *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* (AAS), *Astronomical Journal* (AJ). В последнее время некоторые журналы создали свои электронные базы данных, доступные через Интернет. При этом в тексте статьи дается подробное описание наблюдений, а сами данные размещены в электронном виде в базе данных. Часто авторы приводят в статье небольшой фрагмент таблицы с наблюдениями, размещенными в электронной базе данных.

Случалось в разные времена, что наблюдатели публиковали свои наблюдения в весьма малодоступных изданиях. Примерами могут служить Труды Казанской городской астрономической обсерватории и «Рукописи, депонированные в ВИНТИ». В таких случаях труды наблюдателей могли быть забыты, а ценные научные данные потеряны. К счастью, создатели некоторых общих баз данных наблюдений спутников планет занимаются «спасением наблюдений», разыскивая данные в малодоступных научных изданиях и помещая их в базу данных. В частности, так поступали создатели базы данных наблюдений естественных спутников планет *Natural satellites Database* (NSDB), о которой подробнее написано в Главе

12 данной книги. Приведем здесь адреса NSDB в Интернете:
<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/obspos/>
<http://nsdb.imcce.fr/obspos/>

Любое наблюдение состоит, как минимум, из двух значений: момент наблюдения и значение измеряемой величины. Однако этих двух чисел на самом деле не достаточно. Дело в том, что время всегда отсчитывается в той или иной шкале времени, а измеряемая величина определяется в той или иной системе координат. Без указания на шкалу времени и на систему координат данные могли бы оказаться бесполезными. Еще одним необходимым атрибутом наблюдения является указание того, в каком месте выполнено наблюдение. На деле нужны координаты обсерватории. В некоторые эпохи все наблюдатели использовали одну и ту же шкалу времени и одну и ту же систему координат. При этом в публикациях эти детали не указывались. Подобные обстоятельства иногда затрудняли или исключали совсем использование таких наблюдений. Исследователям приходилось привлекать косвенную информацию, чтобы восстановить недостающие данные.

Иногда в публикациях результаты наблюдений снабжаются указаниями на используемые средства наблюдений: диаметр телескопа, тип фотоприемника, метеорологические условия. Эта информация бывает полезна для предварительной оценки точности наблюдений или для отбраковки наблюдательных данных.

Отметим один из особых источников данных наблюдений спутников планет. Данные, публикуемые в журнале *Astronomy and Astrophysics* (AA), очень часто размещаются в специальной электронной базе данных *VizieR On-line Data Catalog*. Это часть большой базы астрономических данных *Centre de Données astronomiques de Strasbourg – Strasbourg astronomical Data Center*. Найти результаты наблюдений в этой базе данных можно, если знать номера тома и первой страницы соответствующей статьи, опубликованной в журнале. Адрес данных в Интернете будет <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/A+A/NV/NP> где NV – это номер тома, а NP – номер страницы. В последнее время вместо номера страницы используется номер статьи. Примером адреса может служить следующая строка:
<http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/A+A/582/A36>

Кроме наблюдений, выполняемых в наземных обсерваториях, астрометрические наблюдения спутников планет велись и ведут-

ся также с помощью телескопов, расположенных на искусственных спутниках Земли. Много наблюдений, выполненных с помощью космического телескопа «Хаббл» (Hubble Space Telescope — HST) приведены в упомянутой выше базе данных NSDB. В базы данных поступают также наблюдения далеких спутников планет, выполняемые с помощью телескопа на ИСЗ WISE.

В итоге, можно заключить, что в настоящее время для поиска наблюдений естественных спутников планет следует прежде всего обращаться к какой-нибудь электронной базе данных. Подробнее о таких базах данных написано в Главе 12 настоящей книги.

5.14. Шкалы времени и системы координат при наблюдениях спутников планет

Сразу отметим, что разработкой шкал времени и систем координат занимается служащая для этого наука астрометрия. Воспроизвести все необходимые сведения в рамках данной книги невозможно. Для решения всех астрометрических проблем, возникающих при изучении динамики естественных спутников планет, следует обращаться к соответствующим статьям и книгам по астрометрии. Однако самые необходимые сведения мы здесь рассмотрим.

Шкалы времени.

Шкалы времени определяются двумя обстоятельствами. Первое — это тип физического датчика времени. Примеры: атомные часы, пульсары. Второе — это эффекты общей теории относительности, из-за которых часы, расположенные в разных местах Солнечной системы, идут не одинаково.

Основной и самой универсальной шкалой времени, используемой при изучении движения тел Солнечной системы, является шкала TDB (Barycentric Dynamical Time). Это время равномерно идущих часов, расположенных в барицентре Солнечной системы. Поскольку на самом деле там никаких часов нет, то шкала TDB — это модель. Другой универсальной шкалой является TT (Terrestrial Time). Это время равномерно идущих часов, расположенных на геоиде (совсем вблизи поверхности Земли). К сожалению, в жизни людей на Земле шкалы времени TDB и TT были бы неудобны. Наша жизнь связана с восходом и заходом Солнца, что определяется вращением Земли. Для нас могла бы быть удобной шкала вре-

мени UT1, связанная с вращением Земли. Все могло быть хорошо со шкалой UT1, но к сожалению, Земля вращается не только неравномерно, но и непредсказуемо неравномерно. Земля не может быть подходящим датчиком времени. Оказывается, отличным датчиком равномерного времени являются атомные часы. Соответствующую шкалу времени назвали TAI (Time Atomic International). Шкалу времени TT связали со шкалой TAI простым соотношением

$$TT = TAI + 32.184 \text{ с.}$$

Для удобной жизни на Земле придумали шкалу времени UTC (Universal Time Coordinated), которое никогда не отличается от UT1 более, чем на одну секунду, но в какие-то периоды постоянно идет по шкале атомного времени TAI, отличаясь от него на известную постоянную величину. Однако, из-за неравномерного хода UT1 иногда приходится прибавлять целую секунду к шкале UTC так, чтобы разность UTC-UT1 не превысила 0.9 секунды. Такие поправки приходится вносить примерно один раз в год, чаще или реже, в зависимости от причуд вращения Земли. В итоге, например, с 1 июля 2015 года до 1 января 2017 разность TT-UTC постоянно составляла 68.184 секунд. При этом разность UTC-UT1 ни разу не превысила 0.9 секунды.

Решение о внесении односторонней поправки в UTC принимает Международная служба вращения Земли (International Earth Rotation Service – IERS). Сообщение об этом решении за несколько месяцев заранее появляется на странице IERS в Интернете по адресу <https://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulc/bulletinc.dat>

Таблица разностей TT-UTC и соответствующий график размещены в Приложении 4 настоящей книги.

В настоящее время почти все наблюдения естественных спутников планет проводятся и публикуются с использованием шкалы времени UTC. Однако так было не всегда. В прошлом применялось много различных шкал времени. Если попытаться воспользоваться данными наблюдений, выполненных и опубликованных в прошлые века, то нужно знать связь применявшихся тогда шкал времени со шкалой UTC. Связи различных шкал времени, которые использовались в прошлом, приводятся в Приложении 4 настоящей книги.

Теперь выясним, как быть со шкалой времени, в которой строятся модели движения спутников. При решении дифференциальных уравнений движения предполагается, что время течет равно-

мерно. Поэтому в качестве шкалы времени теории движения спутника можно использовать только TDB или TT. Выясним, в чем разница. Между этими шкалами существует соотношение

$$TDB = TT + P,$$

где P представлено суммой периодических по времени слагаемых. Максимальную амплитуду 0.001656 секунды имеет член с периодом 1 год. Остальные слагаемые значительно меньше. Для очень точного представления P можно взять ряд, опубликованный в работе (Fairhead, Bretagnon, 1990). Так что, если нас устраивает точность времени в 0.001656 секунды, то безразлично, какую из указанных двух шкал выбрать.

Таким образом, из предыдущего изложения следует, что моменты наблюдений, опубликованные в шкале UTC, нужно сначала перевести в шкалу TT с помощью таблицы, данной в Приложении 4, а затем, если нужно, перевести их в шкалу TDB с помощью ряда, опубликованного в работе (Fairhead, Bretagnon, 1990).

При интерпретации и использовании результатов астрометрических наблюдений, опубликованных в прошлых столетиях, нужно учитывать следующую особенность. При датировании наблюдений до 1925 года началом суток считался полдень, то есть 12 часов. В полдень начинается каждый юлианский день.

Дата наблюдений может задаваться в форме календарной даты по григорианскому календарю или юлианским днем JD. Используется также Модифицированный юлианский день MJD, связанный с JD соотношением

$$JD = MJD + 2400000.5.$$

Комментарии о шкалах времени даны также в Приложении 4.

Системы координат.

Результаты астрометрических наблюдений спутников — это либо угловые геоэкваториальные координаты прямое восхождение α и склонение δ , либо разности этих координат для двух объектов: спутника и планеты или двух спутников. Если получаются непосредственно α , δ , то наблюдения называются абсолютными, если разности координат, то наблюдения считаются относительными.

Абсолютные координаты получаются путем измерения линейных координат объекта на фотопластинке или на графическом

изображении, полученным с помощью ПЗС-камеры. Затем измеряются линейные координаты опорных звезд. Берутся координаты опорных звезд из того или иного каталога. Далее путем моделирования связи линейных координат на изображении и угловых координат на небе получаются прямое восхождение и склонение объекта. При таких наблюдениях получаемые координаты спутников непосредственно зависят от использованного звездного каталога.

Относительные координаты получаются путем измерения разностей линейных координат двух объектов на изображении. Для перевода этих измеренных разностей координат в разности небесных координат необходимо знать ориентацию и масштаб изображения. Для определения этих параметров применяются разные способы. Масштаб находят калибровкой камеры по изображениям звездных скоплений с известными относительными координатами, либо по измерению фокусного расстояния телескопа различными техническими методами. Ориентацию определяют иногда по часовому ходу объектов на кадре изображения, полученному при остановленном механизме ведения телескопа. Применяются и другие методы. В силу ограниченности нашего изложения мы здесь другие методы не рассматриваем.

Обычно координаты отсчитываются в некоторой невращающейся геоэквиаториальной системе координат какой-то фиксированной эпохи экватора и равноденствия. В публикациях наблюдений естественных спутников планет встречаются три такие системы. Одна из них — это ICRF (International Celestial Reference Frame), основанная на внегалактических радиоисточниках. Вторая — динамическая система координат, связанная с движением планет. Динамическая система реализована планетными эфемеридами DE200/LE200, разработанными ранее в JPL (США). Третья — система координат звездного каталога FK5. Очень часто результаты наблюдений снабжаются простым указанием на то, что используется система координат эпохи J2000. При этом дается название звездного каталога, который использовался при редукции наблюдений. В этом случае подразумевается система координат этого звездного каталога.

При совместном использовании наблюдений, редуцированных с помощью разных звездных каталогов, необходимо преобразовывать координаты спутников из одной системы в другую. Для этого необходимо знать связь систем координат. Известна матрица перехода между системой звездного каталога FK5 и динамической систе-

мой координат. Она опубликована в статье (Standish, 1982). Связь системы координат каталога FK5 и ICRF дана в работе (Feissel, Mignard, 1998).

В прошлом наблюдения обрабатывались с использованием координат звезд из особенного звездного каталога FK4. Его особенность заключается в специальной упрощенной модели годичной aberrации. В силу этой особенности переход от координат в системе FK4 к координатам в системе FK5 не может быть сделан с помощью простой матрицы поворота. Преобразование зависит как от времени отсчета координат, так и от самих координат объекта. Как сделать такое преобразование, описано в работе (Aoki et al., 1983).

Заметим, что система координат звездного каталога FK4 связана с геоэклиптикой и экватором эпохи B1950. Поэтому в публикациях наблюдений часто указывается система координат эпохи B1950. На самом деле имеется в виду система координат звездного каталога FK4. Вообще-то, в астрометрических наблюдениях XX века встречаются различные специальные случаи систем координат. При использовании наблюдений необходимо детально рассматривать используемые системы координат, чтобы не допустить ошибки.

Все рассмотренные выше системы имеют определение как астрографические системы координат. С 1984 года с астрографической системой становится идентичной астрометрическая система координат. Это именно та система, которая принята в разделах 5.2–5.9 настоящей главы.

Кроме этой системы, при наблюдениях прошлых лет использовались также и другие системы. Прежде всего, следует рассмотреть систему координат также астрометрическую, но относящуюся к подвижным геоэкватору и точке весны. Рассматривают истинные экватор и равноденствие на тот же момент, что и момент наблюдения. Тогда говорят об истинных экваторе и равноденствии «эпохи даты». Осреднение координат полюса и точки весны в процессе нутации приводит к средним экватору и равноденствию «эпохи даты». Геоэквадориальные координаты могут быть измерены в системе истинных или средних экватора и равноденствия, соответственно. При преобразованиях от этих систем к системам с неподвижными экватором и точкой весны могут использоваться различные модели прецессии и нутации. Одна из последних версий — это модель прецессии, принятая решением Международного Астрономическо-

го Союза (МАС) в 1976 году, и модель нутации, принятая Международной службой вращения Земли (IERS) (Seidelmann, 1982). Ссылку на публикацию модели прецессии МАС 1976 можно найти в работе (Seidelmann, 1982).

Несмотря на прогресс в астрометрии, модель прецессии МАС 1976 применяется и сейчас. Однако модель нутации постоянно уточняется. Фактически в Международной службе вращения Земли (IERS) отказались от такой упрощенной модели. Вместо нее используются параметры, задающие ориентацию оси вращения Земли. На сайте IERS публикуется постоянно обновляемая таблица, в которой с шагом в 1 сутки на прошлые эпохи приводятся параметры ориентации Земли (Earth Orientation Parameters — EOP). Даются параметры, которые нужны для получения поправок к координатам оси вращения, определяемых моделью нутации МАС 1980 и параметры, прямо определяющие ориентацию оси. Адрес в Интернете этой таблицы следующий:

https://datacenter.iers.org/data/latestVersion/223_EOP_C04_14.62-NOW.IAU1980223.txt

Кроме астрометрических координат, в практике наблюдений в прошлые годы встречались и другие определения систем координат. В частности, вводилось понятие *видимые координаты*. Это координаты, определяющие направление вектора от точки положения наблюдателя в момент старта фотонов до точки положения объекта также в момент старта фотонов с наблюдаемого объекта, тех фотонов, которые достигли фотоприемника в момент наблюдения. Разность моментов — это световое время от наблюдателя до объекта. При использовании видимых координат дополнительные предположения принимались «по умолчанию». В частности, использовалось истинное положение экватора и истинное положение точки весны. В каждом случае нужно тщательно изучать, какие применялись предположения при обработке наблюдений прежде, чем они были опубликованы.

В понятие видимых координат может входить учет искривления луча зрения, вызванного гравитационным действием Солнца. Это эффект общей теории относительности. В частности, эффект искривления луча учитывается при вычислении видимых координат в эфемеридном сервере HORIZONS (JPL), доступном в Интернете по адресу <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

Описание рассмотренных здесь систем координат и соответствующих методов можно найти в книгах (Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac, 1992; Introduction aux Ephémérides Astronomiques, 1997).

Литература к Главе 5

- Емельянов Н. В.* Связь астрометрических и теоретических координат спутников планет. *Астрономический вестник*. 1999. Т. 33. № 2. С. 154–158.
- Емельянов Н. В.* Актуальные задачи динамики спутников планет и двойных астероидов на основе наблюдений. *Астрономический вестник*. 2017. Т. 51. № 1. С. 24–43.
- Aoki S., Soma M., Kinoshita H., Inoue K.* Conversion matrix of epoch B 1950.0 FK 4-based positions of stars to epoch J 2000.0 positions in accordance with the new IAU resolutions. *Astronomy and Astrophysics*. 1983. V. 128. No. 2. P. 263–267.
- Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. Edited by P.K. Seidelmann. University Science Books. Mill Valley, California. 1992.
- Emelyanov N. V.* Precision of natural satellite ephemerides from observations of different types *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2017. V. 469. Issue 4. P. 4889–4898.
- Fairhead L., Bretagnon P.* An analytical formula for the time transformation TB-TT. *Astronomy and Astrophysics*. 1990. V. 229. № 1. P. 240–247.
- Feissel M., Mignard F.* The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences. *Astronomy and Astrophysics*. 1998. V. 331. P. L33–L36.
- Introduction aux éphémérides Astronomiques. Supplément explicatif à la connaissance des temps. (eds. Simon J.-L., Chapront-Touzé M., Morando B., Thuillot W.). Bureau des Longitudes. Paris. Publisher: Les éditions de physique, France. 1997. 450 pp.
- Morgado B. E., Assafin M., Dias-Oliveira A., Gomas Jr. A.* Astrometry of mutual approximations between natural satellites. Application

to the Galilean moons *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. V. 460. P. 4086–4097.

Robert V., Pascu D., Lainey V., Arlot J.-E., De Cuyper J.-P., Dehant V., Thuillot W. New astrometric measurement and reduction of USNO photographic observations of the main Saturnian satellites: 1974-1998. *Astronomy and Astrophysics*. 2016. V. 596. Id. A37, 10 pp.

Seidelmann P. K. 1980 IAU theory of nutation - The final report of the IAU Working Group on Nutation. *Celestial Mechanics*. 1982. V. 27. P. 79–106.

Standish E. M. Jr. Orientation of the JPL Ephemerides, DE 200/LE 200, to the dynamical equinox of J2000. *Astronomy and Astrophysics*. 1982. V. 114. P. 297–302.