

ПРАКТИЧЕСКАЯ НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Оглавление.

Глава 8. Построенные и используемые модели движения реальных небесных тел.

8.21. О численных эфемеридах планет DE-200/LE-200.

Цели вычисления эфемерид планет

Основной этап изучения динамики тел Солнечной системы состоит в построении модели движения больших планет на основе наблюдений. В любой момент уже имеется та или иная модель движения планет. Дальнейшие исследования состоят в производстве новых наблюдений и уточнении параметров модели на основе результатов измерения величин, зависящих от координат планет. На различных этапах этого процесса требуется знать координаты планет на заданные моменты времени. Координаты вычисляются на основе имеющейся модели движения планет. Эта операция называется вычислением эфемерид. Сами эфемериды могут быть представлены в различных формах в зависимости от решаемой задачи.

В практике астрономических исследований эфемериды вычисляются в следующих целях:

- прогнозирование особых явлений в движении планет и их спутников (солнечных и лунных затмений, покрытий звезд планетами и спутниками и др.),
- составление оптимальных наблюдательных программ для решения конкретных астрономических задач,
- организация и проведение наблюдений планет,
- контроль точности проведенных наблюдений,

- описание эволюции Солнечной системы.

Основной этап вычисления эфемерид состоит в вычислении прямоугольных координат планеты на заданный момент времени. При этом заранее фиксируются система координат и шкала времени. В дальнейшем могут определяться видимые координаты или иные функции от прямоугольных координат планеты.

Выбор модели движения планет

Движение планет описывается дифференциальными уравнениями и начальными условиями – значениями координат и скорости каждой планеты в некоторый начальный момент времени. В зависимости от способа решения уравнений движения различают численные, аналитические и полуаналитические модели движения планет. Выбранная модель движения определяет способ хранения и воспроизведения координат планет. Аналитическая модель основана на аналитической теории движения планет. Она отображена в памяти компьютера в форме алгоритма вычислений координат планеты по формулам аналитической теории. Вывод формул представляет собой сложный процесс, но выполнить его нужно всего один раз. Определение координат планеты на заданный момент времени на основе аналитической модели состоит в вычислении координат по формулам теории. Существующие в мире высокоточные аналитические теории движения планет (например, теория Бретаньона [1]) чрезвычайно громоздки, алгоритм вычисления координат планеты весьма объемён, а время вычисления координат планеты на заданный момент времени достаточно велико. Однако в тех случаях, когда требуемая точность определения координат планет невысока, соответствующие формулы могут быть приемлемы для вычисления эфемерид.

Значительный прогресс в повышении быстродействия компьютеров позволил эффективно применять методы численного интегрирования уравнений движения планет. Алгоритм таких вычислений существенно проще алгоритма вывода формул аналитической теории движения планет. Время вычислений велико, но выполнить их нужно всего один раз при фиксированных начальных условиях. Точность вычислений оказывается достаточно высокой. При использовании численной модели движения планет возникают проблемы хранения этой модели в памяти компьютера и воспроизведения координат планеты на заданный момент

времени. После решения этих проблем говорят о создании численной эфемериды планет.

Задание системы прямоугольных координат планет

Уравнения движения планет составляются и решаются в прямоугольных координатах. Однако прямоугольные координаты планеты являются абстрактным понятием. Их нельзя измерить никаким прибором, их даже нельзя отмерить ни по какой шкале. В то же время существуют параметры, зависящие от прямоугольных координат планет, которые могут быть непосредственно измерены различными способами, их можно отмерить по шкале прибора. В современных приборах значения измеряемых величин автоматически записываются прямо в память компьютера.

По указанным причинам модель движения планет, основанная на результатах наблюдений, непременно включает в себя закон, связывающий измеряемые величинами с прямоугольными координатами планеты. Обычно этот закон называют моделью системы координат. Он описывается набором формул, основанных на теории вращения Земли и теориях, описывающих процесс наблюдений.

Можно построить системе координат, основанную на измерениях взаимных положений планет. В этих случаях измеряются дальности до поверхностей планет методами радиолокации либо измеряются видимые взаимные угловые координаты Солнца и Луны при наблюдениях солнечных и лунных затмений. Существуют и другие способы измерений взаимных расположений планет. Во всех таких случаях модель системы координат является чисто динамической. Она никак не связана с системой координат звезд.

Кроме указанных выше измерений взаимного расположения планет производятся также определения видимых угловых координат планет относительно звезд. При использовании таких наблюдений моделируемая система координат уже будет связана с системой координат звездного каталога. Существенным здесь является то, что эта связь зависит от результатов измерений видимых координат планет относительно звезд, которые всегда получают с некоторыми ошибками. Поэтому связь системы координат, в которой отсчитываются координаты планет, с системой координат звездного каталога определяется набором использованных наблюдательных данных. При проведении новых, более точ-

ных наблюдений закон, связывающий две системы координат, может быть изменен. Пример анализа связи динамической и звездной (каталожной) систем координат приводится в работе [2]. С другой стороны, для любой новой звездной (каталожной) системы координат закон, связывающий эту систему с динамической системой координат, нужно устанавливать заново на основе пересчета измеренных координат планет в новой звездной системе координат.

Кроме модели системы координат при вычислении эфемерид планет фиксируется используемая шкала времени. Из-за отличия реальной динамики планет от ньютоновой модели природы (релятивистские эффекты) время, отсчитываемое в разных точках Солнечной системы, различается. Связь различных шкал времени моделируется законами релятивистской динамики и оказывается не совсем простой.

Способ хранения и воспроизведения координат планет

Для практических вычислений эфемерид нужно выбрать подходящий способ хранения и воспроизведения координат планет. Многие современные средства вычисления эфемерид основаны на представлении координат планет отрезками рядов по полиномам Чебышева, аргумент которых является линейной функцией времени. Периоды обращения планет и Луны различаются в сотни раз. Поэтому для каждой планеты или Луны применяют специальное разбиение шкалы времени на отрезки. На каждом отрезке времени разложения прямоугольных координат небесного тела строятся отдельно. Коэффициенты разложения координат по полиномам Чебышева определяются для каждого отрезка времени по той или иной модели движения планет. Это может быть как численная модель, так и аналитическая теория.

Разложение прямоугольных координат в ряды по полиномам Чебышева имеет вид

$$x = \sum_{i=0}^N C_i^{(x)} T_i(\tau), \quad y = \sum_{i=0}^N C_i^{(y)} T_i(\tau), \quad z = \sum_{i=0}^N C_i^{(z)} T_i(\tau), \quad (1)$$

где $T_i(\tau)$ – полиномы Чебышева, $C_i^{(x)}$, $C_i^{(y)}$, $C_i^{(z)}$ численные коэффициенты. Аргумент полиномов Чебышева τ связан со временем t соотно-

шением

$$\tau = \frac{2t - t_1 - t_2}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

где t_1 и t_2 – границы отрезка времени, которому принадлежит момент t .

Предел суммирования N определяет точность представления координат отрезком ряда по полиномам Чебышева. На практике по заданной точности представления координат определяют необходимое число членов в отрезке ряда. При современной точности определения координат планет в несколько километров и точности определения координат Луны в несколько метров число учитываемых членов N составляет 12 – 14. При этом подинтервал времени, на котором представляются координаты планет, должен быть не более 16 суток, а подинтервал времени для представления координат Луны – не более 4 суток.

Если для вычисления эфемерид используется численная модель движения планет, то коэффициенты разложения $C_i^{(x)}$, $C_i^{(y)}$, $C_i^{(z)}$ вычисляются сразу в процессе численного интегрирования уравнений движения планет. В случае, если модель движения планет задана аналитической теорией, то коэффициенты разложения могут быть определены в любое время.

После выбора способа представления прямоугольных координат планет, как функций времени, необходимо придумать способ расположения коэффициентов разложения в памяти компьютера. Этот способ разрабатывается одновременно с алгоритмом вычислений прямоугольных координат планет на заданные моменты времени. Алгоритм реализует вычисления по формулам (1) и (2). Кроме того он включает в себя поиск в памяти компьютера набора коэффициентов $C_i^{(x)}$, $C_i^{(y)}$, $C_i^{(z)}$, соответствующих заданному моменту времени.

Совокупность всех рассмотренных выше понятий и методов составляют некий комплекс, который с некоторых пор стали называть эфемеридой планет и Луны. Перечислим ее компоненты:

- теория движения планет и Луны или метод численного интегрирования уравнений движения,
- база данных всех имеющихся в мире наблюдений планет и Луны,
- набор формул модели системы координат и шкала времени,
- уточненные на основе всех имеющихся наблюдений параметры движения планет и Луны,

- таблица коэффициентов разложения координат планет и Луны в виде отрезков рядов по полиномам Чебышева,
- вычислительная программа для вычисления прямоугольных координат планет и Луны на любой заданный момент времени по таблице коэффициентов принятого представления.

Эфемериды планет и Луны DE200/LE200, разработанные в Лаборатории реактивного движения, Пасадена, США

Одна из наиболее развитых и распространенных в мире эфемерид планет и Луны разработана в Лаборатории реактивного движения, Пасадена, США (Jet propulsion laboratory, California institute of technology, Pasadena, USA). Она получила название DEXXX/LEXXX, где XXX – некоторый трехзначный номер, идентифицирующий версию эфемериды. Одним из главных авторов этой работы является Е.Стендиш (Standish E.M. Jr.). Точно неизвестно, когда была начата эта разработка. В распоряжении исследователей Советского союза "американская" эфемерида DE200/LE200 появилась в начале восьмидесятых годов. Версия DE200/LE200 является наиболее распространенной и используемой. Поэтому последующее описание относится именно к этой версии.

Эфемерида DE200/LE200 имеет следующие характеристики. Эфемерида дает координаты девяти больших планет и Луны. Кроме того, она включает в себя формулы для вычисления прецессии и нутации. Наблюдения, на которых основана эфемерида, были выполнены на интервале времени с 1715 по 1976 год. Наблюдательный базис эфемериды DE200/LE200 подробно описан в работе [3]. Модель движения планет и Луны построена численным интегрированием уравнений движения. Представление координат планет и Луны в виде отрезков рядов по полиномам Чебышева выполнено на интервале времени с 1750 по 2050 год. Максимальная длина подинтервала времени – 16 суток. Максимальная степень полиномов – 14. Эфемерида распространяется в виде набора файлов, записанных на магнитной ленте или на дискетах, и прилагаемой к ним программе на одном из процедурно-ориентированных языков программирования (Фортран, Си или др.) для определения координат Луны или планеты на заданный момент времени.

Система прямоугольных координат планет, используемая в эфемериде DE200/LE200, – неподвижная барицентрическая (Солнечной системы) геоэкваториальная эпохи равноденствия и экватора J2000. Для представления координат Луны используется невращающаяся барицентрическая (системы Земля–Луна) геоэкваториальная эпохи равноденствия и экватора J2000. Единицы измерения координат – астрономическая единица. Шкала времени – TDB (барицентрическое динамическое время).

Первоначально полагалось, что система координат, моделируемая с помощью эфемериды DE200/LE200, совпадает с системой координат звездного каталога FK5. Однако последующий анализ показал, что существует некоторый весьма незначительный (около 0.05 секунды дуги) угол между соответствующими осями координат двух систем [2].

Точность эфемерид DE200/LE200 была проанализирована ее автором [4], а также другими исследователями.

Эфемерида серии DEXXX/LEXXX постоянно совершенствуется в соответствии с новым наблюдательным базисом и новыми, уточненными моделями прецессии и нутации. Существуют различные версии этой эфемериды, соответствующие различным звездным каталогам. Специальная версия DE102 описана в работе [5].

Аналитические модели движения планет также продолжают развиваться [6, 7]. Для представления и вычисления эфемерид планет в этих моделях часто используется форма, описываемая формулами (1) и (2).

С 1986 года эфемериды планет, публикуемые в Астрономическом ежегоднике, вычисляются с помощью эфемериды DE200/LE200.

Литература

1. Bretagnon P. Theory for the motion of all the planets - The VSOP82 solution (In french). *Astronomy and Astrophysics*. 1982. V. 114, No. 2, p. 278-288.
2. Standish E.M.Jr. Orientation of the JPL Ephemerides, DE200/LE200, to the dynamical equinox of J 2000. *Astronomy and Astrophysics*. 1982. V. 114, No. 2, p. 297-302.
3. Standish E. M. Jr. The observational basis for JPL's DE200, the planetary ephemerides of the *Astronomical Almanac*. *Astronomy and Astrophysics*. 1990. V. 233, No. 1, p. 252-271.
4. Standish E. M. Jr. An approximation to the outer planet ephemeris errors in JPL's DE200. *Astronomy and Astrophysics*. 1990. V. 233, No. 1, p. 272-274.
5. Newhall X. X., Standish E. M., Willams J. G. DE102 - A numerically integrated ephemeris of the moon and planets spanning forty-four centuries. *Astronomy and Astrophysics*. 1983. V. 125, No. 1, p. 150-167.
6. Bretagnon P. Improvement of analytic planetary theories (In french). *Celestial Mechanics*. 1984. V. 34, p. 193-201.
7. Bretagnon P., Francou G. Planetary theories in rectangular and spherical variables - VSOP 87 solutions. *Astronomy and Astrophysics*. 1988. V. 202, No. 1-2, p. 309-315.