

ПРАКТИЧЕСКАЯ НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Оглавление.

Глава 5. Модели движения небесных тел на основе наблюдений.

5.31. Земные и небесные системы координат.

5.31.1. Основные понятия и определения.

Изучение динамики небесных тел неизбежно связано с использованием систем координат. Координаты определяют положение небесных тел и являются промежуточными переменными между измеряемыми величинами и параметрами движения. Реально существуют только измеряемые величины, поскольку они проявляются как результат наблюдений. Измерительные приборы и другие средства наблюдений оставляют в процессе наблюдений реальные "следы" в виде записанных и хранимых чисел.

В отличие от измеряемых величин, координаты являются абстрактными понятиями. Связь координат с измеряемыми величинами описывается той или иной моделью, то есть некоторыми соглашениями, формулами и вычислительными алгоритмами.

Огромное множество систем координат, используемых в небесной механике и астрометрии, можно разделить на две группы: системы небесных координат и системы земных координат.

При рассмотрении различных уравнений движения часто используют системы координат без указания их конкретной модели. Законы взаимодействия диктуют лишь некоторые свойства координатных систем. Например, в ньютоновой механике рассматривают понятие неинерциальной системы координат. В конечном счете при изучении динамики небесных тел любую систему координат связывают с реальными объектами с помощью ее модели.

Небесные системы координат связывают с наиболее удаленными объектами. При этом считается, что чем более удален объект от изучаемых небесных тел, тем более пренебрежимым становится факт его движения. Выбор объектов для небесной системы координат определяется также возможностью наиболее точной фиксации направлений на эти объекты с помощью имеющихся измерительных приборов.

В небесной механике используется абстрактное понятие абсолютной системы координат, неподвижной относительно некоторых небесных светил, которые по определению считаются неподвижными.

В качестве неподвижных объектов Вселенной считались сначала удаленные звезды нашей Галактики, затем наиболее удаленные другие галактики. Наиболее совершенной моделью системы небесных координат считается система, связанная с квазарами.

Привязка небесной системы координат к звездам нашей Галактики неизбежно связана с составом и моделью собственных движений опорных звезд. Так создаются системы координат, называемые системами звездных каталогов.

Системы небесных координат, связанные с той или иной моделью движения тел Солнечной системы, называют динамическими системами координат.

Наблюдая небесные тела, которые используются как опорные объекты для систем небесных координат, можно находить связь между различными системами.

Рассмотрим теперь земную систему координат. Такая система должна привязываться к объектам на Земле. Однако на земной поверхности невозможно найти неподвижные объекты. Вся поверхность подвержена перемещениям различного характера. Необходимо изучать и уточнять приливные деформации, вековые перемещения отдельных частей поверхности, изменения во времени внутреннего строения Земли для того, чтобы построить модель движения каждой опорной точки земной поверхности, на которых основана земная система координат. Фактически выбирается сеть опорных обсерваторий. Для каждой обсерватории задается закон ее движения относительно некоторой принятой опорной земной системы координат. На практике построено несколько таких систем, изучаются их малые относительные постоянные смещения и относительные движения.

Заметим, что начало небесной системы координат может быть расположено в любой точке Солнечной системы. Соответствующие оси всех таких систем будут параллельны.

Особенностью моделирования геоэкваториальной системы небесных координат является связь этой системы с земной эклиптической. До недавнего времени, отсчет прямых восхождений делался от линии пересечения геоэкватора с некоторым осредненным положением плоскости земной орбиты. При современной высокой точности наблюдений такой подход создает сложности. Точку отсчета прямых восхождений стали

связывать, также как и положение основной плоскости, с опорными объектами – звездами и квазарами.

Связь между небесной и земной системами оказывается сложной из-за особенного характера перемещения мгновенной оси вращения Земли в каждой из этих систем. Напомним, что перемещение мгновенной оси вращения Земли относительно земной системы координат называют движением полюса. Перемещения этой оси в небесной системе координат раскладывают условно на сумму двух движений: прецессии и нутации. Уточнение модели каждого из этих процессов привело в конечном счете к тому, что в последнее время пришлось отказаться от их раздельного рассмотрения. Применяется комбинированная модель движения оси вращения Земли в небесной системе координат.

Что касается движения полюса, то сложность его моделирования связана с неопределенностью внутреннего строения Земли и ее деформаций. Предвычислить движение полюса Земли с точностью, с которой оно определяется из наблюдений, на несколько лет вперед невозможно.

Отсчет координат небесных тел в небесной системе делается следующим образом. Совместно наблюдаются исследуемое тело и одно или несколько опорных тел, определяющих систему координат. Например, для определения координат планеты необходимо зафиксировать на той же самой фотопластинке или ПЗС-видеограмме несколько звезд из опорного каталога. Тогда линейные измерения разностей координат планеты и звезд дадут координаты планеты в системе звездного каталога.

Связь системы звездного каталога с квазарной системой небесных координат осуществляется наблюдениями квазаров, видимых как звезды, на фоне опорных звезд звездного каталога.

Связь системы звездного каталога с динамической системой координат небесных координат определяют совместным использованием радиолокационных и других, не связанных со звездами наблюдений, и наблюдений планет на фоне звезд.

О моделировании небесных и земных систем координат, а также связи между ними, написано множество статей и книг по астрометрии. В качестве основных источников сведений по этим вопросам можно использовать те, которые указаны в списке литературы к данному разделу.

5.31.2. Упрощенные модели небесной и земной систем координат и связь между ними.

Чтобы легче было понять суть небесной и земной систем координат, связи между ними и способы применения этих систем на практике, примем некоторые упрощенные свойства Земли и ее вращения. Такой вариант может применяться на практике, когда не требуется самая высокая точность вычислений.

Допустим, что тело Земли абсолютно твердое (недеформируемое), ее ось вращения неподвижна в небесной и земной системах координат, а вращение Земли происходит равномерно. Оси небесной системы координат свяжем с плоскостью земного экватора и обозначим через x, y, z . Ось x направим в точку весны. Основную плоскость земной системы координат x', y', z' совместим с экватором Земли, а ось x' направим по Гринвичскому меридиану. Тогда связь этих двух систем координат определится соотношениями

$$\begin{aligned} x &= x' \cos S - y' \sin S, \\ y &= x' \sin S + y' \cos S, \\ z &= z', \end{aligned} \tag{1}$$

где S - звездное время, то есть угол поворота Гринвичского меридиана относительно точки весны. Формулы обратного перехода имеют вид

$$\begin{aligned} x' &= x \cos S + y \sin S, \\ y' &= -x \sin S + y \cos S, \\ z' &= z. \end{aligned} \tag{2}$$

При сделанных упрощениях S является известной линейной функцией времени. Для достаточно точного вычисления звездного времени можно использовать формулы

$$t = MJD - 51544.5, \quad T = t/36525, \tag{3}$$

$$\begin{aligned} S &= (24110.54841 + 86400 d + 236.55536790873 t + \\ &+ 0.093104 T^2 - 0.0000062 T^3)/86400, \end{aligned} \tag{4}$$

где MJD - модифицированный юлианский день заданного момента времени, выраженный в шкале времени UT1, а d является дробной частью от t . Звездное время будет выражено в оборотах.

Наряду с рассмотренной выше земной экваториальной системой координат иногда применяется горизонтальная система координат, связанная с плоскостью горизонта данной обсерватории. Здесь мы будем применять упрощенное понятие горизонта как плоскости, перпендикулярной геоцентрическому радиусу-вектору точки наблюдения.

Оси горизонтальной системы координат с началом в точке наблюдений обозначим через x'', y'', z'' . Ось x'' направим в плоскости горизонта по местному меридиану на юг, а ось z'' - в зенит. Обозначим через λ_0, φ_0 долготу и широту обсерватории в земной экваториальной системе координат. Тогда связь между земной экваториальной и горизонтальной системами координат выразится соотношениями

$$\begin{aligned}x'' &= x' \cos \lambda_0 \sin \varphi_0 + y' \sin \lambda_0 \sin \varphi_0 - z' \cos \varphi_0, \\y'' &= -x' \sin \lambda_0 + y' \cos \lambda_0, \\z'' &= x' \cos \lambda_0 \cos \varphi_0 + y' \sin \lambda_0 \cos \varphi_0 + z' \sin \varphi_0 - R,\end{aligned}\tag{5}$$

где R - геоцентрическое расстояние точки наблюдений.

Формулы обратного перехода имеют вид

$$\begin{aligned}x' &= x'' \sin \varphi_0 \cos \lambda_0 - y'' \sin \lambda_0 + (z'' + R) \cos \varphi_0 \cos \lambda_0, \\y' &= x'' \sin \varphi_0 \sin \lambda_0 + y'' \cos \lambda_0 + (z'' + R) \cos \varphi_0 \sin \lambda_0, \\z' &= -x'' \cos \varphi_0 + (z'' + R) \sin \varphi_0.\end{aligned}\tag{6}$$

Приведенные здесь формулы перехода между земными системами координат можно использовать для вычислений направляющих косинусов различных векторов. В этом случае следует положить $R = 0$.

Литература

- Брумберг В. А., Глебова Н. И., Лукашова М. В., Малков А. А., Питьева Е. В., Румянцева Л. И., Свешников М. Л., Фурсенко М. А.* Расширенное объяснение к "Астрономическому ежегоднику". Труды ИПА РАН. Вып. 10. – СПб.: ИПА РАН, 2004, 488 с.
- Introduction aux éphémérides astronomiques. Supplément explicatif à la connaissance des temps. (eds. Simon J.-L., Chapront-Touzé M., Morando B., Thuillot W.). 1997, Paris: BDL, 450 с.
- Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac (ed. Seidelmann P. K.). 1992, Mill Valley: Univ. Science Books, 752 p.