Изв. Крымской Астрофиз. Обс. 104, № 6, 212–216 (2009)

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

УДК 523.34

Построение единой селеноцентрической системы координат в системе центра масс и главных осей инерции Луны

С.Г. Валеев[2], *Ю.А. Нефедьев*[1], *И.М. Шарафутдинов*[2], *М.В. Кутленков*[1]

[1] Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта, 422526, Россия, Татарстан
star1955@mail.ru
[2] Ульяновский государственный технический унивеtситет, УРО АН РТ, 432027, Ульяновск, Россия
sgv@ulstu.ru

Поступила в редакцию 16 октября 2008 г.

Аннотация. Построение глобальной опорной сети на поверхности Луны является одной из важнейших задач современной селенодезии. В работе разработан метод создания единой селеноцентрической системы координат в системе центра масс и главных осей инерции Луны на основе объединения космических и наземных наблюдений.

BUILDING UNITED SELENOCENTRIC NET IN CENTRE OF THE MASSES AND MAIN LUNAR INERTIAS AXISES, *by S.G. Valeev, Yu.A. Nefedjev, I.M. Sharafutdinov, M.V. Kutlenkov.*

Ключевые слова: селеноцентрические опорные сети, инерциальная система координат, наблюдения

1 Введение

В настоящее время Луна является объектом исследований многих космических экспериментов и центром пристального внимания ученых как в области астрономии, так и планетологии. Запуск американских научных спутников “CLEMENTINE” и “Lunar Prospector” стремительно и качественно изменил ситуацию в исследовании Луны (Нефедьев, 2004, 2006). Мощный поток высокоточной и многопараметрической информации, полученной с бортов современных космических аппаратов, породил сильный всплеск всестороннего интереса и исследовательского энтузиазма по промышленному, робототехническому освоению Луны к 2018 г. и полету человека на Марс в 2025–2030 гг. после создания долговременных обитаемых лунных баз. Развитие космических технологий предъявляет особые требования к результатам координатно-временного обеспечения, включающего реализацию систем отсчета, установление взаимной ориентации инерциальной и динамической систем координат, исследованию динамики и геометрии небесных тел. Это в полной мере касается динамических и геометрических параметров Луны, отнесенных к центру ее масс. Однако космические исследования Луны, выполняемые не только в научных, но и в практических целях, не обеспечены селенодезической координатной сетью – каталогом опорных объектов, достаточно полно охватывающим видимую и обратную стороны Луны и имеющим центр, близкий к центру масс. Каталог, построенный по наблюдениям с КК “Апполон”, и опорные сети на западном полушарии Луны, полученные при обработке ряда снимков обратной стороны Луны с АМС “Зонд-6”, “Зонд-8”, охватывают лишь часть лунной поверхности. В работе (Доул и др., 1977) был выполнен подробный анализ внутренней точности системы Аполлонов. На основе этого анализа можно сформулировать следующие выводы. Для трансформирования топографических координат Аполлона использовались три станции ALSEP. Поскольку среднеквадратичные ошибки трансформации оказались менее 80 м и ошибка измерений около 60 м, можно считать, что точки вблизи и между тремя станциями ALSEP имеют ошибки положения менее чем 150 м. Смещение от места расположения ALSEP увеличивает предполагаемую плановую ошибку до 300 м, и это большинство территорий в области охвата измерений. Ошибки положений точек, находящихся вблизи границ изученных областей, могут достичь 300 м и даже превысить 1000 м.

Для видимой стороны есть несколько координатных систем, среди которых наиболее информативен каталог 1162 объектов (КСК-1162) (Нефедьев, 2003), построенный в Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта (АОЭ) по крупномасштабным снимкам Луны со звездами, и каталог 264 кратеров (Хабибуллин, Ризванов, 1984), основанный на этих же наблюдениях. Следует отметить также систему из 4900 кратеров, построенную в Киеве в Голосеевской обсерватории И.В. Гавриловым и др. (Гаврилов и др., 1977). В отличие от казанских каталогов, построенных в динамической системе координат, киевские получены в квазидинамической. Следует также отметить, что несмотря на исследования Луны космическими средствами, в настоящее время наземные наблюдения не утратили своей актуальности, поэтому оптимальным путем выполнения селенодезических исследований следует считать разумное сочетание космических и наземных методов наблюдений Луны. И наземная, и космическая астрометрии необходимы, поскольку они дополняют друг друга (Ковалевский, 2004).

При наличии базового селеноцентрического каталога координат опорных объектов на видимой стороне Луны (КСК-1162) и ряда каталогов объектов в либрационной зоне и на обратной стороне Луны в разнородных системах построение единой системы координат с центром и осями, совпадающими с центром масс Луны и главными осями ее инерции, включает следующие этапы:

– исследование систематических и случайных ошибок каталога КСК-1162;
– сгущение и расширение системы каталога КСК-1162 на видимую, обратную стороны Луны и либрационную зону.

2 Описание КСК-1162

Опорная селенодеическая сеть КСК-1162 на поверхности Луны была создана на основе крупномасштабных снимков Луны со звездами, полученных с помощью не имеющего аналогов в мировой практике уникального метода раздельных пластинок (Хабибуллин и др., 1974). В отличие от методов обработки снимков Луны без звезд, в случае привязки к звездам мы имеем абсолютное определение ориентации нуль-пункта системы координат и ее масштаба. При выборе лунных кратеров, входящих в опорную сеть КСК-1162, использовались следующие критерии. Во-первых, брались кратеры по возможности правильной округлой формы; во-вторых, эти кратеры должны были иметь небольшие размеры; в-третьих, выбранные объекты должны быть хорошо наблюдаемыми, и в-четвертых, кратеры сети в основном должны были входить в списки объектов других известных селенодезических каталогов и удовлетворять рекомендациям МАС.

Искомые параметры находились из $2m$ уравнений поправок вида:

$$\mathbf{A} \times \Theta + \mathcal{E} = \mathbf{Z},$$

где $\mathbf{A}(A_{ij})$ – структурированная матрица, $\Theta(\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta)$ – вектор-столбец искомых параметров, $\mathbf{Z}(\Delta X, \Delta Y)$ – вектор-столбец наблюдений, $\mathcal{E}$ – вектор-столбец случайных ошибок наблюдений. Решение относительно искомых параметров $\hat{\Theta}(\Delta\hat{\xi}, \Delta\,\hat{\eta}, \Delta\hat{\zeta})$ будет:

$$\hat{\Theta} = (\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{Z}),$$

а их ошибки определяются ковариационной матрицей

$$\mathbf{D}(\hat{\Theta}) = \frac{\mathbf{V}^T\mathbf{P}\mathbf{V}}{2m-3}(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1},$$

где $\mathbf{V}$ – вектор остаточных уклонений. Анализ каталога КСК-1162 показал, что он наиболее полно удовлетворяет следующим требованиям: включает достаточное количество опорных точек для обеспечения возможности исследования фигуры Луны и осуществления точной привязки к ним; содержит объекты с координатами, отнесенными к эфемеридному центру масс Луны, а также покрывающие достаточно большую область поверхности Луны; точность представленных координат точек достигает ± 30 метров в плановых координатах и до ± 80 метров по высоте.

3 К вопросу переопределения координат селеноцентрического каталога КСК-1162

При построении опорной сети КСК-1162 использованы алгоритмы (Быстров, Ризванов, 1973; Хабибуллин и др., 1974), разработанные для привязки лунной и звездной пластинок. По меньшей мере две из рассматриваемых при этом задач метода наименьших квадратов (МНК) могут быть на сегодняшний день решены точнее. Поскольку переобработка базового каталога потребует громоздких перевычислений, следует исследовать и численно оценить, насколько это будет целесообразно.

При решении стандартной задачи определения постоянных звездной пластинки использовался метод шести постоянных (метод Тернера). Рассмотрим три возможные модификации этого способа, основанные на регрессионном моделировании (Валеев, 1991).

3.1 Метод полного перебора структур

Вместо полиномиального разложения стандартных координат звезд X и Y первой степени по измеренным координатам звезд x и y можно использовать полиномы второй и третьей степеней. Полным перебором структур под условием минимума “внешней” среднеквадратической ошибки (СКО) σ_Δ определяется оптимальная структура модели трансформации по каждой координате. Такая модель “плавающей” структуры для каждой пластинки обеспечивает повышение точности определения координат меток и, соответственно, объектов каталога от нескольких десятков процентов и выше.

3.2 Метод ортогонализации для двумерного случая

Задача трансформации координат рассматривается как задача Тернера с дополнительным условием ортогональности перехода из системы измеренных координат в стандартную, что является адаптацией к нарушению условия МНК о независимости измеренных координат x и y.

3.3 Метод учета взаимозависимости стандартных координат X и Y (решение системы одновременных уравнений-СОУ)

В этом случае устраняется влияние взаимозависимости между стандартными координатами X и Y. При ее обнаружении одна из координат поступает в правую часть полинома по другой координате, с коэффициентом, подлежащим оцениванию.

Вторая задача МНК решается для системы в работе (Ризванов, 1985)

$$\mathbf{A}\Theta + \mathcal{E} = \mathbf{Z}, \tag{1}$$

где $A = (A_{ij})_m$ – ранее вычисленная матрица преобразования координат для каждой m-й пластинки, $\Theta = (\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta)_K^T$ – вектор оцениваемых поправок к принятым значениям координат кратеров (объектов каталога), $\mathbf{Z} = (\Delta X, \Delta Y)_K^T$ – вектор наблюдений.

В отличие от первой задачи, нацеленной на прогнозирование, выражение (1) используется только для получения оценок $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$, что приводит к необходимости проверки условий применения

МНК-диагностики условий регрессионного анализа (РА)-МНК (Валеев, 1991). При их выполнении можно констатировать, что найденные оценки являются наилучшими линейными оценками (состоятельными, несмещенными и эффективными) в пределах возможностей использованного объема наблюдений. Адаптацию к нарушению условий независимости $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$ и $\Delta X, \Delta Y$ между собой можно выполнить методом ортогонализации или решением СОУ, отмеченным выше. Способы адаптации к другим нарушениям рассматриваются в монографии (Валеев, 1991).

4 Приведение селенодезических каталогов в систему каталога КСК-1162

При сгущении и распространении селеноцентрического каталога на видимую и обратную стороны Луны, а также на ее либрационную зону необходимо с высокой точностью решить задачу определения элементов матриц перехода между базовой КСК-1162, промежуточными системами и редуцируемым каталогом.

Для ее прецизионного решения можно исследовать способы, эскизно представленные выше для двумерного случая. Достаточно подробно рассмотрим один из них; его аналитическая версия применена для распространения координатной сети видимого полушария Луны на обратную по результатам измерения снимков с АМС "Зонд-6,-8" (Валеев, 1991).

Обычно при преобразовании координат из одной прямоугольной системы (X) в другую (Y) используется модель аффинного преобразования:

$$\mathbf{X} = \mathbf{AY} + \mathbf{X}_0, \tag{2}$$

где $\mathbf{X} = (X_1 X_2 X_3)^T, \mathbf{Y} = (Y_1 Y_2 Y_3)^T$ – векторы координат в системах M_x и M_y, $\mathbf{A} = (A_{ij})$ – матрица ориентации, $\mathbf{X}_0 = (X_{01} X_{02} X_{03})^T$ – вектор смещения центра системы M_x относительно M_y. Для определения по общим объектам элементов a_{ij} и смещения используется МНК, применяемый к каждой из трех подсистем уравнений по отдельности или к совместной системе.

Преобразование (2) не всегда обеспечивает удовлетворительную точность. Из-за ошибок координат в системах M_x и M_y и возможной взаимозависимости оценок a_{ij} матрица $\mathbf{A}$ может не удовлетворять условиям ортогонального перехода из M_y в M_x:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A} = \mathbf{E}, det\mathbf{A} = 1, \tag{3}$$

где $\mathbf{E}$ – единичная матрица.

В связи с этим моделью, конкурирующей с моделью (2) и с возможными другими, является выражение (2), рассматриваемое совместно с условиями (3). Такая модель применялась в работе (Валеев, 1991). В рамках теории условной оптимизации параметры этой модели могут быть оценены путем аналитического или численного решения задачи поиска минимума (абсолютного или относительного) квадратичной формы $S = \mathcal{E}^T\mathcal{E}$ с нелинейными ограничениями в виде равенств:

$$\begin{gathered} min\, \mathcal{E}^T\mathcal{E}, \\ \mathbf{A}, \mathbf{X}_0 \in \mathbf{G} \\ \mathbf{A}^T\mathbf{A} = \mathbf{E}, det\mathbf{A} = 1, \end{gathered} \tag{4}$$

где $\mathcal{E}$ – вектор ошибок для модели (2), $\mathcal{E}^T\mathcal{E} = \Sigma_{1\le i\le n}\Sigma_{1\le j\le 3}\ \mathcal{E}_{ij}, n$ – количество объектов; $\mathbf{G}$ – допустимая область.

5 Заключение

Выбор метода трансформации координат должен быть осуществлен в результате тщательных исследований сравнительной эффективности следующих подходов:

– аффинного преобразования,
– оптимальной полиномиальной аппроксимации,

– ортогонального преобразования без и с учетом систематических ошибок,
– решения системы одновременных уравнений и др.

Работа поддержана грантом РФФИ 08-02-01214.

Литература

Быстров Н.Ф., Ризванов Н.Г. // Труды Казанской Гор. АО КГУ. 1973. №. 39. С. 156.

Валеев С.Г. // Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. М.: Наука. Гл. Редакция физ.-мат. лит. 1991.

Гаврилов И.В., Кислюк В.С., Дума А.С. // Сводная система селенодезических координат 4900 точек лунной поверхности. Киев. 1977.

Доул, Елассал, Лукас (Doyle F.J., Elassal A.A., Lucas J.R.) // NOAA Tech. Rep. NOS 70. NGS 5. U.S. Dep. of Commerce. Washington, D. C. 1977.

Ковалевский Ж. // Современная астрометрия. Фрязино. 2004.

Нефедьев и др. (Nefedjev Yu.A.) // 35th COSPAR Scientific Assembly. Paris. France. 2004. P. 3305.

Нефедьев Ю.А. // Труды международной конференции “Околоземная Астрономия-2005”. 2006. С. 366.

Нефедьев Ю.А. // Теория и практика покрытий звезд Луной. Казань. 2003.

Ризванов Н.Г. // Труды КГАО. 1985. №. 49. С. 80.

Хабибуллин, Ризванов, Быстров (Habibullin S.T., Rizvanov N.G., Bistrov N.P.) // Moon. 1974. Vol. 11. N. 1. P. 125.

Хабибуллин, Ризванов (Habibullin Sh.T., Rizvanov N.G.) // Earth, Moon and Planets. 1984. Vol. 30. №. 1. P. 1.