

ПРЕЦЕССИОННЫЙ МЕТОД РЕДУКЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ СЕЛЕНОДЕЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В НЕБЕСНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

© Н.Ю.Вараксина

В работе описан новый подход к точной редукции широкомасштабных снимков Луны со звездами с целью вывода координат селенодезических объектов.

Ключевые слова: редукция наблюдений, селенодезическая сеть, координаты селенодезических объектов, крупномасштабные снимки.

В Казани и в Астрономической обсерватории им.В.П.Энгельгардта уже в течение 200 лет проводятся астрометрические исследования положений небесных объектов [1], астрофизические спектральные исследования [2], анализ каталогов звездных положений [3], позиционные наблюдения [4], определение геофизических параметров [5]. Одно из лидирующих положений занимает изучение кинематики и динамики Луны [6]. Как подчеркивается в работах Ю.А.Нефедьева, С.Г.Валева, Н.Г.Ризванова и др. [7; 8], современные опорные сети на поверхности Луны страдают теми или иными недостатками: или опорная сеть построена не в небесной системе координат, или охватывает слишком ограниченный регион на поверхности Луны, или содержит недостаточное количество представленных объектов. Поэтому нами была проделана работа по созданию метода построения селенодезического каталога, имеющего и достаточное количество кратеров для возможности исследования фигуры Луны и осуществления точной привязки к ним, и содержащего объекты с координатами, отнесенными к эфемеридному центру масс Луны, и покрывающем достаточно большую поверхность Луны.

Астрометрические наблюдения Луны фотографическим методом можно разделить на два вида: получение крупномасштабных снимков только одной Луны без окружающих ее звезд и фотографирование Луны с окружающим ее фоном слабых звезд. Наблюдения первого рода сравнительно просты. Обычно они проводятся на длиннофокусных телескопах (36" рефрактор Ликской обсерватории, 24" Парижской экваториам, 40" Йеркской рефрактор и т.п.). Снимки Луны получаются с короткой выдержкой. Масштаб и ориентировка таких снимков определяются по точкам самой Луны с известными селенодезическими координатами. Поэтому информативность таких наблюдений сравнительно не высока. В

частности, по этим данным нельзя изучать орбитальное движение Луны.

Один из самых точных и современных методов в настоящее время является фотографирование Луны со звездами на две отдельные фотопластинки [9]. В АОЭ были проведены пробные испытания данного метода и получены хорошие результаты. Точность определения координат Луны по измерениям точек края составила $\pm 0''30$ по прямому восхождению и $\pm 0''15$ по склонению.

Метод двух отдельных пластинок заключается в том, что звезды фотографируются на высокочувствительные фотопластинки размером 300×300 мм одновременно фотографированием Луны на мелкозернистые и малочувствительные пластинки размером 90×90 мм. Таким образом, фактически получаются две разные фотопластинки – звездная и лунная.

Был решен и вопрос взаимной геометрической привязки объектов на лунной пластинке к опорным звездам на звездной пластинке. Для этого использовались восемь лампочек неподвижных относительно звездной пластинки. С помощью данной световой схемы строили систему световых меток на пластинках: четыре на звездной и четыре на лунной. Так как лунная пластинка перемещалась в процессе наблюдений относительно звездной, то на звездной отпечатывались только четыре точки, а на лунной пластинке отпечатался ряд световых меток, соответствующий числу вспышек лампочек. Привязка меток на лунной и звездной пластинках к единой координатной системе и составляет основной этап редукции наблюдений.

Привязку лунной и звездной пластинок можно осуществить с помощью нескольких алгоритмов. Один из методов, когда одновременно на обе пластинки фотографируется область неба с большим количеством звезд, например Плеяд. Рассмотрим метки как исследуемые звезды. Так

как координаты оптического центра для обеих пластинок одинаковы (α_0, δ_0) , идеальные координаты звезд на них относятся к одной системе, следовательно, идеальные координаты световых меток также будут относиться к одной системе. Идеальные координаты меток служат для преобразования измеренных координат изображений деталей на лунной пластинке в систему измеренных координат звездной пластинки. Дальнейшая обработка производилась одним из общепринятых методов редукиции астрофотографий.

Обозначим (x_i^*, y_i^*) и (x_j^*, y_j^*) измеренные координаты меток и координаты звезд на звездной пластинке, а (x_i^D, y_i^D) и (x_k^D, y_k^D) ($k=6 \div m$) соответственно на лунной. Зная (α_j^*, δ_j^*) звезд на звездной пластинке, (α_k^D, δ_k^D) звезд на лунной и (α_0, δ_0) вычисляются стандартные координаты звезд (X_j^*, Y_j^*) и (X_k^D, Y_k^D) . Далее по методу Тернера определяются постоянные пластинки a, b, c, d, e, f :

$$\begin{pmatrix} a^* & b^* & c^* \\ d^* & e^* & f^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j^* \\ y_j^* \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_j^* \\ Y_j^* \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} a^D & b^D & c^D \\ d^D & e^D & f^D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j^D \\ y_j^D \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_j^D \\ Y_j^D \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Для определения стандартных координат меток на звездной (X_i^*, Y_i^*) и лунной (X_i^D, Y_i^D) пластинках можно записать:

$$\begin{pmatrix} X_i^* \\ Y_i^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^* & b^* & c^* \\ d^* & e^* & f^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i^* \\ y_i^* \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} X_i^D \\ Y_i^D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^D & b^D & c^D \\ d^D & e^D & f^D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i^D \\ y_i^D \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Переведя системы меток на звездной и лунной пластинках в единую систему координат, становится возможным переход от системы измеренных координат на лунной пластинке к системе измеренных координат на звездной пластинке, что является основной целью данной редукиции.

Связь стандартных координат меток и измеренных на звездной пластинке будет иметь вид:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i^* \\ Y_i^* \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i^* \\ y_i^D \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Решая (5) методом наименьших квадратов определяются коэффициенты a_{ij} , которые в дальнейшем используются для определения координат лунных меток в системе измерений звездной пластинки. Если

$$\begin{pmatrix} x_i^{mD} \\ y_i^{mD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i^D \\ Y_i^D \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

тогда

$$\begin{pmatrix} x_i^{mD} \\ y_i^{mD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i^D \\ y_i^D \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Определив из (7) коэффициенты b_{ij} , можно преобразовывать измеренные координаты объектов на лунной пластинке (x_j^{KMD}, y_j^{KMD}) в систему координат опорных звезд на звездной пластинке (x_j^{KD}, y_j^{KD}) :

$$\begin{pmatrix} x_j^{KD} \\ y_j^{KD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j^{KMD} \\ y_j^{KMD} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

При производстве наблюдений на восьмиметровом телескопе решающую роль сыграло то, что для получения высококачественных широкомасштабных снимков Луны в системе звезд необходима возможность наблюдений на малых зенитных расстояниях. Поэтому выполнение таких наблюдений в окрестностях г.Казани оказалось нежелательным. Важным стал также тот факт, что набрать хороший разброс наблюдений по оптическим либрациям также очень затруднительно в средней полосе.

Учитывая все вышеизложенные факты, наблюдения были произведены в южном высокогорном районе с хорошим астроклиматом и с возможностью наблюдать Луну круглый год. Критерии качества оценивались согласно полученным на снимках деталям лунной поверхности четкости звездных изображений и их количеству, фотографиям меток.

Как известно, особое внимание для достоверного вывода поправок к селенодезическим координатам необходимо уделять распределению наблюдений по оптическим либрациям. Поэтому распределение по либрациям было достигнуто достаточно хорошее.

На основе метода привязки лунных снимков к звездам можно решать широкий спектр селенодезических задач. В отличие от методов обработки снимков Луны без звезд в случае привязки к звездам мы имеем абсолютное определение ориентации и нуля-пункта системы координат и ее масштаба. Однако при использовании метода двух отдельных пластинок необходимо особое внимание уделять вопросам точности координат опорных звезд и эфемеридных координат центра масс Луны, так как они полностью входят в результаты решений как постоянные составляющие.

Исходя из самого метода фотографирования Луны и звезд на две отдельные фотопластинки и редукцию таких наблюдений логично производить в два приема, один из которых это редукция звездной пластинки, а другой – редукция лунной. Здесь важен тот факт, что при решении какой-то новой задачи требуется выполнить соответствующие измерения объектов и меток только на лунных пластинках, а данные других звездных пластинок можно использовать из предыдущих исследований.

Чтобы система идеальных координат соответствовала бы системе измеренных, необходимо идеальные координаты опорных звезд вычислять по их видимым сферическим координатам, приведенным к эпохе и равноденствию момента наблюдения. Однако звездные пластинки в приборе "Аскорекорд" нельзя ориентировать соответствующим образом. Поэтому ориентировка осей системы измеренных координат произвольная, а нуль-пункт (x_0, y_0) с высокой точностью соответствует положению оптического центра на снимке. С другой стороны, положение нуля -пункта системы идеальных координат (α_0, δ_0) известно приближенно, а ориентировка осей соответствует проекции основных кругов небесной сферической системы координат на плоскость фотопластинки. Таким образом, в системе измеренных координат ошибочна ориентировка осей, а в системе идеальных координат – положение нуля-пункта.

Для повышения точности определения постоянных фотопластинки, нуль-пункт системы идеальных координат необходимо совместить с положением точки x_0, y_0 , а оси x, y с направлением осей X, Y . Для этого необходимо выполнить следующие действия. Вначале находятся постоянные пластинки методом наименьших квадратов. Делается несколько итераций и перед каждой последующей итерацией система измеренных координат объектов звездной пластинки поворачивается на угол $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, где

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Y_{i=1}}{X_{i=1}}, \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{y_{i=1} - y_0}{x_{i=1} - x_0}. \quad (9)$$

После каждой итерации значения координат главной точки снимка изменяется следующим образом:

$$\alpha_0^{(k)} = \alpha_0^{(k-1)} + c^{(k-1)} \operatorname{sec} \delta_0^{(k-1)}, \quad (10)$$

$$\delta_0^{(k)} = \delta_0^{(k-1)} + f^{(k-1)},$$

где $k=1, 2, 3, \dots, n$ – число приближений. Обычно достаточно трех-четырёх приближений, чтобы значения $\varphi^{(k)}, b^{(k)}, d^{(k)}, c^{(k)}, f^{(k)}$ практически обратились в нуль. После определенного приближения постоянные пластинки $a^{(k)}, e^{(k)}$ характеризуют масштаб звездного снимка по осям X, Y , а видимые сферические экваториальные координаты главной точки фотопластинки, соответствующие проекции оптического центра пластинки на небесную сферу, будут $A = \alpha_0^{(k-1)}, D = \delta_0^{(k-1)}$.

Рассмотрим основные поправки, которые необходимо вводить для согласования шкал времени:

1. Поправка за конечную скорость распространения радиоволн:

$$\Delta T_1 = 0,9 + 3,25 \frac{L}{1000}, \quad (11)$$

которая вызывает задержку сигнала и, таким образом, неточную синхронизацию наблюдаемых моментов с эталонными. Здесь L – расстояние между передатчиком и приемником, вычисленное по дуге большого круга Земли, $L = Z \times 1,852$, где Z – центральный угол, соответствующий дуге большого круга между пунктами, который определяется из следующего выражения:

$$\cos Z = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta \lambda, \quad (12)$$

где φ_1 и φ_2 – широты пунктов передачи и приема, $\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ разность долгот этих пунктов.

2. Используя сообщения ВНИИФТРИ "Эталонное время", можно получить значения моментов подачи сигналов точного времени в системе $UT1$. Далее учитывая в значениях $UT1$ поправку δT_1 и исключая получаемую в Международном Бюро Времени поправку за влияние сезонной неравномерности вращения Земли δT_2 , можно привести моменты времени в систему $UT2$:

$$UT2 = UT1 + \delta T_1 - \delta T_2. \quad (13)$$

После 1974 года передача сигналов точного времени стала осуществляться в системе координированного времени UTC , поэтому выражение (13) изменило свою форму:

$$UT2=UTC+\Delta UT1+\delta T_1-\delta T_2, \quad (14)$$

где $\Delta UT1=UT1-UTC$.

Далее необходимо определять значения моментов времени наблюдений в двух системах: в системе всемирного времени мгновенного первичного меридиана $UT0$ и в системе эфемеридного времени ET . Для определения $UT0$ запишем:

$$UT0=UT1-\Delta\lambda, \quad (15)$$

где $\Delta\lambda$ – поправка за колебания географических полюсов, вычисляемая по формуле:

$$\Delta\lambda=-\left(x\sin|\lambda|+y\cos|\lambda|\right)tg\varphi_i, \quad (16)$$

где x и y – координаты полюса Земли, λ – долгота места наблюдения.

ET вычисляется по следующей формуле:

$$ET=UT1+\Delta T(A), \quad (17)$$

где $\Delta T(A)$ – поправка за переход от всемирного времени к эфемеридному, публикуемая в *Астрономическом Ежегоднике*.

Следующий этап редукции наблюдений заключается в приведении системы равноденствия и экватора звездного каталога к системе динамического равноденствия и экватора теории DE403/LE403. На практике динамическое равноденствие, определяемое восходящим узлом эклиптики на среднем экваторе для эпохи $J2000,0$ отличается от начала отсчета прямых восхождений каталога FK5, но это отличие достигает в настоящее время значения не превышающее $0^{\circ}04$. Для наших исследований можно считать, что системы равноденствий теории DE403/LE403 и каталога FK5 практически совпадают. Склонение и горизонтальный параллакс, получаемые с использованием DE403/LE403, остаются без изменения, а в прямое восхождение необходимо внести соответствующую поправку:

$$\Delta\alpha=\alpha_{FK5}-\alpha_{FK4}=\quad (18)$$

$$=0^s0775+0^s0851\times T+0^s0002\times T^2.$$

Так как основная цель данного метода – построение опорной абсолютной селенодизической сети на поверхности Луны, которая не зависит от систем других селенодизических каталогов и позволяет решать широкий ряд задач лунной астрономии, то объекты, входящие в эту опорную сеть, должны удовлетворять ряду специфических требований и входить в списки объектов других известных селенодизических каталогов и учитывать рекомендации IAC.

Искомые поправки $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$ к приближенным значениям селенодизических координат ξ_0, η_0, ζ_0 находятся из $2m$ условных уравнений следующего вида:

$$\mathbf{A}\times\mathbf{\theta}+\mathbf{\varepsilon}=\mathbf{Z}, \quad (19)$$

где $\mathbf{A}(A_{mn})$ – структурная матрица, $\mathbf{\theta}(\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta)$ – вектор-столбец искомых параметров, $\mathbf{Z}(\Delta X, \Delta Y)$ – вектор-столбец наблюдений, $\mathbf{\varepsilon}$ – вектор-столбец случайных ошибок наблюдений. Так как величины X_{Obs}, Y_{Obs} определены в результате косвенных измерений, то между ними существует алгебраическая зависимость. Поэтому при решении МНК условных уравнений вида (19) вместо диагональной весовой матрицы \mathbf{P} бралась генерализованная весовая матрица \mathbf{G} . При этом решение относительно искомых параметров $\hat{\theta}(\Delta\hat{\xi}, \Delta\hat{\eta}, \Delta\hat{\zeta})$ будет:

$$\hat{\theta}_n=(\mathbf{A}^T\mathbf{G}\mathbf{A})_n^{-1}(\mathbf{A}^T\mathbf{G}\mathbf{Z}), \quad (20)$$

а их ошибки определяются ковариационной матрицей

$$\mathbf{D}(\hat{\theta})=\frac{\mathbf{V}^T\mathbf{G}\mathbf{V}}{2m-3}(\mathbf{A}^T\mathbf{G}\mathbf{A})^{-1}, \quad (21)$$

где \mathbf{V} – вектор остаточных уклонений.

Окончательное значение селеноцентрических координат лунных объектов будет иметь вид:

$$\begin{pmatrix} \xi_k \\ \eta_k \\ \zeta_k \end{pmatrix}_n = \begin{pmatrix} \xi_0 \\ \eta_0 \\ \zeta_0 \end{pmatrix}_n + \begin{pmatrix} \Delta\xi_k \\ \Delta\eta_k \\ \Delta\zeta_k \end{pmatrix}_n. \quad (22)$$

Данный метод позволяет определять координаты селенодизических объектов с высокой точностью и достоверностью.

1. Сахибуллин Н.А., Нефедьев Ю.А. 200 лет астрономии и геодезии в Казани // Георесурсы. – 2010. – №2(34). – С.2.
2. Нефедьев Ю.А., Дубяго И.А., Вараксина Н.Ю. История солнечных и спектральных исследований в астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта (АОЭ) // Кинематика и физика небесных тел (KINEMATICS AND PHYSICS OF CELESTIAL BODIES). – 2009. – №6. – С.48-59.
3. Нефедьев Ю.А., Ризванов Н.Г., Шаймухаметов Р.Р. Исследование точности современных звездных каталогов // Кинематика и физика тел солнечной системы. – 2003. – №4. – Т.19. – С.1-6.
4. Nefedjev Yu.A., Rizvanov N.G. Photographic observations of Solar System bodies at the Engelhardt astronomical observatory // Astronomy and Astrophysics. – 2005. – №444. – DOI 10.1051/0004 – 6361:20042458. – P.625-627.
5. Lapaeva V.V., Meregin V.P., Nefedjev Yu.A. The Study of the Local Fluctuations of the Earth's Crust Using Data of Latitude Observations // Geophysical Research Letters. – 2005. – №32. – L24304. – Doi:10.1029/2005GL024316.

6. *Ризванов Н.Г., Нефедьев Ю.А., Кибардина М.И.* Исследования по селенодезии и динамике Луны в Казани // *Астрономический вестник*. – 2007. – №2. – Т.41. – С.1-10.
7. *Нефедьев Ю.А., Валеев С.Г., Ризванов Н.Г.* Рельеф видимой стороны Луны по данным независимой селеноцентрической системы координат // *Известия вузов: Геодезия и Аэрофотосъемка*. – 2003. – №4. – С.83-90.
8. *Nefedjev Yu.A., Rizvanov N.G.* Selenodetic research in Kazan // *Georesurses*. – 2008. – №2(11). – С.36-40.
9. *Нефедьев Ю.А., Вараксина Н.Ю., Кутленков М.В.* Исследование макрофигуры Луны // *Вестник ТГГПУ*. – 2008. – №4(15). – С.4-6.

PRECESSIONNYY METHOD TO REDUCTIONS OF THE OBSERVATIONS SELENOGEODESICAL OBJECT IN CELESTIAL COORDINATE SYSTEM

N.Yu.Varaksina

The article is devoted to the new approach in exact reduction of wideranging picture of the Moon with stars to have a conclusion of the coordinates of selenium objects.

Key words: reduction of the observations, selenium network, coordinates selenium object, large-scale picture of the Moon with stars.

* * * * *

Вараксина Наталья Юрьевна – ассистент кафедры вычислительной физики и моделирования физических процессов Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: ffimo@tggpu.ru

Поступила в редакцию 23.08.2010