

пользование стереофотограмметрии с достаточным базисом и 2) комбинирование данных, полученных по наземным наблюдениям Луны с данными, полученными космическими аппаратами (КА).

На примере нескольких десятков точек лунной поверхности, координаты которых содержатся в Киевском сводном каталоге и дополнительно измерены на фотографиях, полученных с помощью КА, показана эффективность второго метода.

Г.А.Красинский, Е.В.Питьева, М.Л.Свешников, Е.С.Свешникова

УТОЧНЕНИЕ ЭФЕМЕРИД ВНУТРЕННИХ ПЛАНЕТ И ЛУНЫ

I. В основе построенной теории движения лежит явное интегрирование методом Эверхарта движения больших планет и Луны, выполненное на интервале 1945–1985 гг. Помимо обычных гравитационных эффектов учитывались релятивистские возмущения в стандартной системе координат, а для Луны – возмущения от несферичности фигур Земли и Луны.

В качестве модели вращательного движения Луны была принята теория Экхардта [1]. Сравнение с наблюдениями также велось в рамках ОТО. В отличие от стандартного подхода к уточнению планетных эфемерид, основанного на совместном уравнивании оптических и радиолокационных измерений, мы предпочли вначале провести обработку только радиолокационных измерений, что позволило с большой точностью определить взаимное положение орбит всех планет, а затем с помощью оптических наблюдений привязаться к системе фундаментального каталога FK4. При таком подходе систематические ошибки гораздо менее точных оптических наблюдений не влияют на качество представления радиолокационных измерений, так что практически в математической модели полностью реализуется высокая точность последних.

2. Нами были использованы все доступные измерения дальности для внутренних планет с 1961 по 1980 гг. Особое значение приобрели измерения, проведенные в ИРЭ в 1961–1980 гг., для которых типичная средняя ошибка после 1972 г. составляла около 0,5 км. При вычислении теоретического значения величины запаздывания отраженного сигнала поверхность Меркурия аппроксимировалась сферой, радиус которой определялся наряду с другими параметрами. Обработка измерений для Марса и Венеры проводилась с учетом рельефа поверхности в соответствии с недавно опубликованными гипсометрическими картами [2–4]. Радиусы соответствующих сферических поверхностей относимости также входили в число определяемых параметров. Для Марса учет рельефа значительно уменьшает (в 2–3 раза) случай-

ную ошибку остаточных уклонений и позволяет свести в одно нормальное место все измерения, проведенные в течение суток. Для Венеры случайная ошибка практически не меняется, но систематическая составляющая в значительной степени устраняется. Была также сделана попытка исследовать крупномасштабные особенности рельефа Венеры из анализа остаточных уклонений. Результаты оказались в хорошем согласии как с данными [4], так и с результатами [5], полученными тем же методом, но на другом наблюдательном материале. Наряду с радиолокационными измерениями дальности обрабатывались также спутниковые измерения КА Венера-9, охватывающие интервал в 50 дней. Достигнутая степень согласования с радиолокационными измерениями (ср. кв. ошибка взвешенных невязок) составила для Меркурия 3 км, для Венеры - 1,3 км и для Марса - 0,6 км.

3. После уточнения элементов, определяющих взаимную ориентацию планетных орбит, их размер и форму, была проведена привязка к фундаментальному каталогу FK4 фиксации оставшихся произвольными после первого этапа трех параметров (угла между экватором и эклиптической, поправки к равноденствию и средней долготы Солнца на некоторую эпоху). Для решения этой задачи было проведено сравнение теории с меридианными наблюдениями Солнца, выполненными в Вашингтонской обсерватории (1961-1971 гг.). Согласование теории с обработанными наблюдениями характеризуется ср. кв. ошибками для α и δ соответственно 0,044^s и 0,72". Далее было проведено контрольное представление оптических наблюдений Солнца и внутренних планет, начиная с 1945 г. Эти наблюдения, не использованные в уточнении параметров, представились теорией вполне удовлетворительно, подтвердив, в частности, правильность средних движений планет, определенных из радарных измерений на сравнительно коротком интервале. Орбита Меркурия контролировалась также сравнением с наблюдениями прохождений этой планеты по диску Солнца в 1960, 1970 и 1973 гг., орбита Марса - фотоэлектрическими наблюдениями покрытия ϵ *Geminorum* в 1976 г. и орбита Венеры - покрытием Регула в 1959 г.

4. Для уточнения эфемериды Луны были использованы 603 лазерных измерения дальности уголкового отражателя "Аполлон-15", выполненные в обсерватории Мак Дональд в 1971-1973 гг., а также меридианные наблюдения Луны 1959-1975 гг. (Вашингтонская и Гринвичская обсерватории). К сожалению, крымские лазерные измерения 1971-1980 гг. не могли быть использованы при уточнении параметров вследствие их немногочисленности. Из обработки лазерных измерений находились поправки к пяти элементам лунной орбиты (исключалась 19^{XX}-1476

поправка к большой полуоси, которая определялась по среднему движению, полученному из меридианных наблюдений), поправки к координатам станции, координатам отражателя и углу \mathcal{E} между экватором Луны и эклипстикой. Для этого угла, в частности, была получена довольно надежная оценка: $\mathcal{E} = 5550,5 \pm 0,8''$.

В силу значительных корреляций между определяемыми параметрами процесс приближений сходится крайне медленно, и в настоящее время разброс невязок имеет ср. кв. ошибку 9 м. При этом линеаризованные невязки, получающиеся после подстановки неизвестных в условные уравнения, имеют ср. кв. ошибку 5 м.

5. Достигнутый уровень точности позволил предпринять попытку проверить гипотезу о вековом уменьшении значения гравитационной постоянной. Такая проверка, в принципе, может быть осуществлена двумя способами.

Во-первых, обработка радиолокационных измерений позволяет выразить значение астрономической единицы а.е. в километрах или, что эквивалентно, найти значение гравитационной постоянной в единицах $\text{км}^3/\text{с}^2$. Из совместной обработки всех измерений мы получили следующее значение:

$$\text{а.е.} = (149597873,3 \pm 0,2) \text{ км.}$$

Непосредственное определение вариации этой величины, ожидаемое значение которой порядка километра в столетие, из имеющихся измерений практически невозможно.

Во-вторых, более реальна оценка величины по вызываемым ею квадратичным по времени членам в долготях планет. Квадратичные члены такого же вида могут быть вызваны, однако, также и другими причинами, например, вековым расхождением между атомной и динамической шкалами времени. Нами было проведено несколько экспериментов по совместному определению параметров теории и величины \dot{K} , причем устойчиво получалась следующая оценка:

$$\dot{K}/k = (6,0 \pm 1,3) \cdot 10^{-11}/\text{год},$$

которая отличается знаком от ожидавшегося значения и почти целиком зависит от радиолокационных наблюдений Венеры. Фактически, этот результат свидетельствует лишь о наличии в долготе Венеры квадратичного члена

$$\delta\lambda = (0,48 \pm 0,10'') \cdot T^2$$

(T - интервал времени в столетиях), что, возможно, отражает влияние неучтенных систематических ошибок в использованных радиолокационных наблюдениях Венеры. Несомненно, что проведение дальнейших сеансов радиолокации планет позволит сделать более определенный вывод.

Литература

1. Eckhardt D.H. - Moon, 1970, v.1, No 2, p.270.
2. Sherman S.C. - Icarus, 1978, v.33, No 3, p.417.
3. Bills B.G., Ferrari A.J. - J. Geophys. Res., 1978, v.83, No B7, p.3497.
4. Kelly Beatty J. - Sky and Telesc., 1980, v.60, No 3, p.185.
5. Campbell B.B. et al. - Science, 1972, v.175, No 4021, p.514.

В.А.Никонов

НОВЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ ЕДИНОЙ СЕЛЕНОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

За 100 лет исследований Луны наземными средствами было создано более двух десятков селенодезических каталогов для видимого полушария Луны и хорошо изучена в топографическом отношении либрационная зона. За последние 20 лет с помощью космической техники из обработки фотографий были получены высокоточные сети базисных точек обратного полушария Луны. В настоящее время 80% площади поверхности Луны обеспечено высотами, а около 70% - базисными точками селенодезических каталогов, отличающихся между собой системой координат и точностью координат опорных точек. Следовательно, представляется возможным на базе отдельных каталогов создать единую систему селенодезических координат и высот, покрывающую 80% поверхности Луны.

Связь систем каталогов представлена линейным ортогональным преобразованием для семи параметров в виде

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\sin \eta}{\cos \beta} \Delta x + \frac{\cos \eta}{\cos \beta} \Delta y - \cos \eta \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \omega_x - \sin \eta \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \omega_y + \omega_z + \Delta \eta &= 0, \\ -\cos \eta \sin \beta \Delta x - \sin \eta \cos \beta \Delta y + \cos \beta \Delta z + \sin \eta \omega_x - \cos \eta \omega_y + \Delta \beta &= 0, \\ \cos \eta \cos \beta \Delta x + \sin \eta \cos \beta \Delta y + \sin \beta \Delta z + \Delta R + \Delta h &= 0, \end{aligned} \right\} (I)$$

где Δx , Δy и Δz - определяемые параметры расхождения систем каталогов в положении центров, причем ось x направлена к Земле, ось y на восток в сторону моря Смита, ось z на север по оси вращения Луны; ω_x , ω_y , ω_z - определяемые параметры расхождения в ориентации осей сравниваемых систем координат, причем положительным считается вращение против хода часовой стрелки, если смотреть с положительного направления соответствующих осей координат; ΔR - определяемый параметр разно-