

俄罗斯应用天文研究所月球历表研究现状

Mikhail Vasilyevich VASILYEV, Eleonora Ivanovna YAGUDINA

(俄罗斯科学院应用天文研究所, 圣彼得堡, 197110)

摘要:空间探测需要越来越高精度的观测和历表支持。俄罗斯科学院应用天文研究所研发了满足精度要求的月球历表 EPM-ERA, 它与同期的法国 INPOP 历表和美国 DE 历表比较, 精度方面有微小差距。分析了进一步提高历表精度的方法。然而 EPM-ERA 仅仅依赖于法国和美国台站提供的月球激光测距 LLR 数据, 为了克服这个限制, 应用天文研究所在推进俄罗斯西伯利亚阿尔塔伊 LLR 地面站的重建任务, 以改善 LLR 测站分布的几何构型。俄罗斯的月球-全球和月球-资源探月计划为改进月球历表提供了机会, 参与了多次国际深空探测的俄罗斯 VLBI 网“QUASAR”也将参与这些俄罗斯月球探测计划的精密测轨跟踪。

关键词: 月球激光测距; 历表; VLBI

中图分类号: P228; P691

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2014)03-0187-05

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2014.03.004

Current State and Prospects of Lunar Ephemeris in IAA RAS

Mikhail Vasilyevich VASILYEV, Eleonora Ivanovna YAGUDINA

(Institute of Applied Astronomy Russian Academy of Sciences, St. Petersburg 197110, Russia)

Abstract: More accurate observations and ephemerides to support the space programs are required. Currently, lunar ephemerides of adequate accuracy are being developed and maintained by IAA RAS (Institute of Applied Astronomy Russian Academy of Sciences) under the name EPM-ERA. The accuracy of EPM-ERA ephemeris is still worse a little bit than that of competitive French INPOP and American DE ephemerides. The ways to improve the quality of EPM-ERA ephemeris are presented and discussed. However, EPM-ERA ephemeris is based on only measurements kindly provided by American and French LLR observatories. To overcome this problem the project of Russian LLR station was initiated by several organizations including IAA RAS. The proposed location of this station is Siberia, Altai region that promised visible improvement of existing LLR network geometry. Perspectives of the project, current problems and progress are presented and discussed. The impact on improving ephemeris of the Moon is activity of IAA RAS connected with Russian Luna-Glob and Luna-Resource programs. VLBI network “Quasar” is prepared now to observe space vehicles and lunar landers.

Key words: lunar laser ranging; ephemerides; VLBI

0 引言

当前和未来的太阳系研究的发展需要越来越精密的行星历表来支持航天计划。基本行星历表也与卫星导航系统如 GPS 和 GLONASS 等的发展紧密关联^[1]。例如,当导航卫星星历是由星载导航处理器通过对卫星运动方程数值积分来直接实现时,

GNSS 卫星星历自动预报的可能性使得行星历成为了现代 GNSS 系统用户设备的基本要求。目前美国给出的 DE/LE 历表系列被用于大行星、太阳和月球的标准历表模型^[2]。这些行星历表的精度一直在改进提高着,以满足现代太空探测任务的需求。遗憾的是,生成这些历表的软件代码不是开源的,为此限制了科学研究者通过分析探测任务数据和历表

数据获得科学成果的途径,也不可能通过对这类数据的分析来提高天文常数的精度。为了克服这个障碍,欧洲空间局 ESA 支持了一个法国项目来构建与 DE/LE 历表精度相同的独立的行星历表 INPOP^[3]。而俄罗斯版本的月球和行星历表 EPM 也由俄罗斯科学院应用天文研究所独立完成^[4-5]。月球历表 EPM-ERA 是 EPM 历表的一部分^[6]。用于构建 EPM 历表的软件是 ERA^[7]。

1 数学模型

EPM-ERA 历表的数学模型是在 G A Krasinsky 的主持下构建的。文献[8-9]详细描述了行星天体的轨道运动方程、弹性体的自转运动特性,可以方便地用于数值积分和分析解研究,甚至用于对潮汐效应的分析研究。为了构建 EPM-ERA 2013 模型,轨道积分和天体自转运算时,同时对太阳、月球、大行星、小行星以及 TNO 天体和环进行了积分。构建 EPM-ERA 历表的 ERA 软件使用到的详细数学模型在文献[10]中给出。该文献在 J2000.0 历元太阳系质心直角坐标无旋转参考框架中给出了 n -体问题的轨道运动方程,并考虑了 PPN 参数的影响。为了构建高精度的月球运动理论,在数学模型中还需要考虑到以下影响:

- 1) 太阳引力势的二阶带谐项产生的加速度效应;
- 2) 地球和月球形状带来的扰动;
- 3) 在地月系统中地球潮汐形变的滞后效应;
- 4) 地球形状与点质量太阳、月亮之间的相互作用;
- 5) 月球形状与点质量太阳、地球、木星、金星之间的相互作用。

2 月球自转模型

以月球中心为参考的月固坐标系与惯性参考系的连接可以通过 3 个欧拉角实现:章动角 θ , 岁差角 φ , 以及进动旋转角 ψ 。自转角速度分量 $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 可以展开为欧拉角的导数组合。在旋转坐标系里,欧拉运动方程描述了角动量矢量的变化特征,同时需要考虑月球的特性特征。根据文献[11],月球自转的潮汐扰动是由以下因素引起的:

- 1) 地球和太阳的引潮力导致月球引力势和转动惯量的变化;
- 2) 月球自身向心力产生的挤压导致月球引力势

和转动惯量的变化;

- 3) 月球本体滞弹性导致的潮汐耗散。

3 个包括二阶项的关于欧拉角的微分方程可以与太阳系天体的轨道运动方程同步进行数值积分运算。文献[10]中给出了详细的模型介绍。

3 EPM-ERA: 实际演算

EPM-ERA 历表的全部数学模型都包含在 ERA 软件包中。软件包通过对太阳系大天体、小行星、月球等运动方程和月球自转的同步数值积分实现。其中月球自转的计算使用了文献[11]中的模型。月球的引力势考虑到 4 阶球谐函数模型。地球的引力势考虑到 5 阶球谐函数模型。这参考了 IERS 对高轨道地球卫星轨道积分推荐使用的要求。

带有滞后参数 τ 的微分方程组的数值积分通过等步长 23 阶 Everhart 方法实现。为了保证计算精度与 LLR 观测的匹配,计算时使用了 80 位浮点处理器。对月球轨道和自转动力学参数的偏导数通过积分可变方程组得到。特别地,这种导数算法可以用来计算月球的初始坐标和速度,用以支持计算欧拉角和时间导数、月球引力势系数以及地球潮汐延迟角的计算。比如月球潮汐因子 K_{2M} , 其导数计算就是通过对方程严格系统的变参数估计值积分得到。

通过上述演算,得到了 1970—2013 年之间月球和行星历表的切比雪夫内插多项式系数文件。基于动力学和运动学理论,这些文件用于计算 LLR 观测量对待估计参数的残差和偏导数;这里使用了 IERS 标准规范来获得这类残差。进一步,使用最小二乘法迭代解算条件方程,并且使用 $n\sigma$ 来评估残差水平。当所有的参数都被拟合后,进行最后的数值积分。切比雪夫内插多项式系数结果文件包含了 1800—2200 年之间的大行星、太阳、月球的位置和运动速度,以及月球的天平动,这个历表被称为 EPM-ERA 2013。外部用户可以使用文献[12]推荐的算法流程实现,代码包括 C、Fortran 和 Java 版本。

4 LLR 观测数据

EPM-ERA2013 历表构建过程中使用了 1970—2013 年之间 18 700 个 LLR 观测数据用以拟合月球的轨道和自转参数。目前,月面有 5 个激光反射器,分别是 Apollo-11, Apollo-14, Apollo-

15, 以及前苏联与法国合作的 Lunokhod1 和 Lunokhod2。截止到 2013 年为止, 这些反射器的观测数据分别是 1990、1961、14 092、503 和 105。在整个的 LLR 常规观测历史中, 主要有 4 个站参加了观测, 分别是美国德克萨斯州 McDonald、夏威夷 Haleakala、新墨西哥州 Apache 和法国 CERGA。截止到 1985 年 McDonald 天文台 LLR 使用了一个通用的 SLR 望远镜设备, 之后更新为 MLRS 专用 LLR 设备。1988 年 MLRS 被重置在天文台内的一个新位置。

从 2006 年开始, 新建设完成的 Apache 台站实现了毫米精度月球测距观测, 使得月球轨道和动力学自转的测量精度达到了前所未有的精度。现有的历表模型 DE、INPOP、和 EPM-ERA 都不满足 Apache 台站观测数据的测量和解析精度的要求。

1998 年之前, 观测台站应用户的要求提供观测数据。之后借助 SLR/IERS 服务平台开始通过 FTP 方式网络发布观测数据, 用户可以从 http://oca.eugemini.donnees.las_lunes 以及 <http://ccdisa.gsfc.nasa.gov/pub/slr> 获得 LLR 数据。

5 拟合参数与残差

构建 EPM-ERA2013 历表模型时总共拟合了 65 个参数, 列在表 1 中。由于 LLR 观测量融合了地-月系统的运动和自转, 参数之间相关性较强, 无法同时从 LLR 观测量中拟合这个系统的指向参数。考虑到 Apollo-5 有着最多的观测、位置定位精度最高, 在拟合中我们固定了它的坐标。然后使用给定的月球天平动, 初步拟合一组简单的精度较低参数解。

LLR 测站的动力学模型对地球引力场数的 J_2 项很敏感, 分析表明 J_2 不能与月球 x 坐标同时精确拟合估计, 为此表 1 中没有包括 J_2 项参数。在迭代过程中, 残差按照 4σ 剔除。图 1 是拟合残差分布及其历史沿革情况。

表 1 拟合估计参数列表

Table 1 List of estimated parameters

序号	待估参数
1~6	JD 2446000.5 历元月球轨道状态参数
7~12	相同历元欧拉角及其时间导数参数
13	A11, A14, L2 反射器位置坐标
18, 22~24	
20	A15 反射器 X 坐标
25~42	6 个观测站直角坐标

续表 1

序号	待估参数
45~47	L1 反射器坐标
44	地球固体潮滞后响应
55	月球固体潮滞后响应
48~51	地月恒星时角长期变化趋势
56~58	月球潮汐 LOVE 数 k_2, h_2, l_2
52~54	
59~63	月球引力势球谐函数系数 C_{20} 到 S_{33}
64~65	地球赤道指向参数长期变化 ϵ, Φ

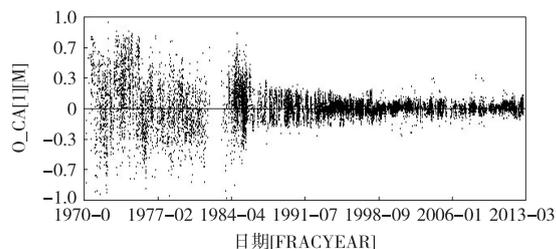


图 1 EPM-ERA2013 历表 LLR 拟合残差

Fig. 1 EPM-ERA2013 fitting residuals for LLR

我们注意到与历史模型如 EPM-ERA 2010 比较, EPM-ERA 2013 版本的模型由于使用了新的高精度 LLR 数据, 并且软件中优化了数学模型, 计算机也从 64 位浮点运算改为 80 位浮点运算, 使得模型有了很大的改进。

6 俄罗斯 LLR 台站重建

前苏联的克里米亚天体物理台 CRAO 在 1969—1983 年之间成功地开展了 LLR 观测实验。并于 1973 年开始了常规的 LLR 观测, 测量精度达到了 0.9 m。从 1978 年开始, CRAO 安装了新的激光设备, 使得测量精度达到 0.25 m。这个站总共得到了 Apollo-15 和 Lunachod2 反射器的 1 400 个 LLR 测距观测数据。1983 年观测计划中止后, 俄罗斯月球历表的观测量主要依赖美国和法国 LLR 台站提供。为改变这种状况, 包括俄罗斯科学院应用天文研究所在内的多家研究机构在考虑重新启动 LLR 观测。新的台站设置将改进当前 LLR 测量网的几何构型分布。台站目前景观见图 2, 该站主要参数如下。

- 1) 位置: 西伯利亚阿尔塔伊 ($50^{\circ}\text{N}, 82^{\circ}\text{E}$);
- 2) 望远镜口径: 3.12 m;
- 3) LLR 观测精度目标: 3 mm;
- 4) 新研制的激光器参数还在进一步调整中, 将满足标称的测量精度需求;
- 5) 气象条件: 每年 1 400 晴夜小时, 240 夜晚适

合 LLR 观测。



图 2 俄罗斯阿塔伊天文台
Fig. 2 Russian Altay station; panorama

该站址的优势是改进了 LLR 台站网的经度分布,劣势是纬度太高,与 Apache 台站比较可能会失去 15% 的观测机会。新台站的业务中,应用天文研究所将主要负责软件业务支持和以下工作:

- 1) LLR 观测计划制定;
- 2) LLR 观测的历表支持;
- 3) 原始观测数据的预处理以及 NP 计算;
- 4) LLR 观测量数据库的管理;
- 5) EPM-ERA 参数拟合改进;
- 6) EPM-ERA 月球历表的更新。

项目当前的状态是由 OJC 研究生产联合体精密系统与仪器公司赢得了政府支持,牵头负责该项目的推进。应用天文研究所是参加机构之一。

7 Svetloe 台站的深空探测器 VLBI 观测

俄罗斯“QUASAR”VLBI 网包括 3 个台站: Svetloe、Zelenchukskaya 和 Badary。它们组成的基线长度分别是 2 015、4 282 和 4 404 km。网络控制和数据处理中心在圣彼得堡^[13]。“QUASAR”网主要开展天体测量、天体物理和大地测量观测研究。空间探测器和着陆器也可以用该网进行高精度定位测量。由于该网观测任务负担很重,目前正在进行升级改造,在 Badary 和 Zelenchukskaya 增设了 13 m 天线,主要用于大地测量和天体测量观测。预计 2015 年开始可以进行空间探测器常规观测。而使用目前“QUASAR”网也可以开展空间探测器的 VLBI 观测,观测目的主要包括火星快车、金星快车、空间 VLBI 卫星 RadioAstron 的国际 VLBI 和 D-VLBI 联测,以及 GLONASS、北斗等导航卫星的观测。

试验观测的目的是为了研发 VLBI 和 D-VLBI 技术和积累相关经验,用于未来对俄罗斯月球-全球和月球-资源探测计划。已经完成的初步试验包括技术开发和观测流程验证:

- 1) 开发用于空间卫星 VLBI 观测的软件;
- 2) 开发历表服务于卫星 VLBI 观测和数据处理;
- 3) 宽带和点频信号的 VLBI 相关处理设计研发;
- 4) 宽带纳秒和点频皮秒精度的 VLBI 技术验证。

8 结 论

俄罗斯应用天文研究所历表研究进展表现为:

- 1) 长期维护 EPM-ERA 月球历表,与同期国际上发布的月球历表精度相当;
- 2) 当前 EPM-ERA 历表表明,为了与 LLR 的测量精度需求匹配,在构建历表的数学模型中应该改进月球自转模型,达到足够的精度,并应用于 LLR 数据分析全过程;
- 3) 最新的 EPM-ERA 历表主要使用了美国和法国 LLR 站提供的测量数据;
- 4) 积极参与俄罗斯国内 LLR 站的重建;
- 5) 以其主导的“QUASAR”VLBI 网为依托,积极推进俄罗斯空间探测器的 VLBI 和 D-VLBI 研发和验证观测,以改进月球历表为目标,为观测“嫦娥 3 号”/“嫦娥 4 号”、月球-全球和月球-资源做充分的准备。

参 考 文 献

- [1] Finkel'shtein A M, Gayazov I S, Gubanov V S, et al. Fundamental coordinate time supply[J]. Trudy Inst. Prikl. Astron. Russ. Akad. Nauk, 2005(13):1-42.
- [2] Standish E M. JPL planetary and lunar ephemerides [R]. DE405/LE405 Interoffice memorandum, 1998, no. 312. F98048.
- [3] Fienga A, Laskar J, Kuchynka P, et al. The INPOP10 a planetary ephemeris and its applications in fundamental physics[J]. Celest. Mech. Dyn. Astron., 2011, 111(3): 363-385.
- [4] Krasinsky G A, Pitjeva E V, Svishnikov M L, Chu-najeva L I. The motion of major planets from observations 17691988 and some astronomical constants [J]. Celest. Mech. Dyn. Astron., 1993(55):1-23.
- [5] Pitjeva E V. High precision ephemerides of planets-EPM and determination of some astronomical constants [J]. Solar

- Syst. Res. , 2005,39(3):176-186.
- [6] Krasinsky G A, Vasiliev M V. ERA: knowledge base for ephemeris and dynamical astronomy[C] // in Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies, IAU Coll. 165, Wytrzyszczak, I. M., Lieske, J. H., and Feldman, R. A., Eds., Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1997:239-244.
- [7] Krasinsky G A, Prokhorenko S O, Yagudina E I, New version of EPM ERA Lunar theory [R]. Journees2010, Capitaine, N., Ed., Paris, 2010: 61-64.
- [8] Krasinsky G A. Tidal effects in Earth and Moon rotations. 1. Mathematical model[J]. Trudy Inst. Prikl. Astron. Russ. Akad. Nauk, Astrometr. Geodinam., 1998(3):96-124.
- [9] Krasinsky G A. Tidal effects in Earth and Moon rotations. 2. Evolution of rotating motion of the Earth and Moon orbits [J]. Trudy Inst. Prikl. Astron. Russ. Akad. Nauk, Astrometr., Geo-dynam., Nebesn. Mekh., 1999a(4): 174-186.
- [10] Vasilyev M V, Yagudina E I. Russian Lunar ephemeris EPM-ERA 2012[J]. Solar System Research, 2014,48(2):158-165.
- [11] Krasinsky G A. Tidal effects in the Earth-Moon system and the Earth rotation[J]. Celest. Mech. Dyn. Astron., 1999b, 75(1):40-66.
- [12] Brattseva O A, Novikov F A, Pit'eva EV, et al. Access procedure to high-accuracy numerical ephemerides of the Moon and planets[J]. Trudy Inst. Prikl. Astron. Russ. Akad. Nauk, 2010(21):201-204.
- [13] Gayazov I, Mitryaev V, Smolentsev S, Rahimov I, Diyakov A, Shpilevski V, Pshenkin V, Rets Ya. SLR Observations at the "Quasar" network stations [C] // International Scientific-Technical Conference WPLTN-2012. Book of abstracts, 41-42, 2012.

作者简介:

Mikhail Vasilyevich VASILYEV(1958—),男,副教授,博士生导师,主要研究方向:卫星导航,天体力学,行星历表。
通信地址:俄罗斯科学院应用天文研究所,圣彼得堡(197110)
E-mail:mvv@ipa.nw

[责任编辑:宋宏]