

激光测月数据处理及月面角反射器坐标估计

方振^{1,2}, 谷德峰^{1,3}, 邵凯^{1,4}, 安子聪^{1,4}, 李明^{1,4}

(1. 中山大学天琴中心, 珠海 519082; 2. 深空探测实验室总体技术研究院, 合肥 230031; 3. 中山大学人工智能学院, 珠海 519082;
4. 中山大学物理与天文学院, 珠海 519082)

摘要: 针对目前国内外机构激光测月数据处理算法不公开的现状, 建立了月球激光测距 (Lunar Laser Ranging, LLR) 数据处理模型, 利用自研软件实现了广义相对论效应、大气延迟效应、地球潮汐和月球潮汐等模型算法, 完成了高精度的LLR数据处理。研究表明: 使用数据处理程序对ILRS (International Lunar Ranging Service) 发布的2006—2021年LLR标准点数据进行检核, 得到的均方根残差约为3.7 cm。针对月面角反射器坐标与月球历表不匹配导致LLR数据检核精度降低的问题, 使用最小二乘法对月面角反射器的坐标进行估计。结果表明: 以估计后的角反射器坐标作为程序输入, LLR数据检核精度提高约0.5 cm。

关键词: 月球激光测距; 观测模型; 精度分析; 角反射器坐标平差

中图分类号: P129

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)05-0478-07

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230173

引用格式: 方振, 谷德峰, 邵凯, 等. 激光测月数据处理及月面角反射器坐标估计[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(5): 478-484.

Reference format: FANG Z, GU D F, SHAO K, et al. LLR data processing and lunar retro-reflector coordinate estimation[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(5): 478-484.

引言

月球激光测距 (Lunar Laser Ranging, LLR) 技术发展至今已有超过50年的历史, 是目前最精确的地月距离测量手段。LLR通过测量激光在地面测站和月面上5个角反射器阵列 (“阿波罗11号” (Apollo 11)、 “阿波罗14号” (Apollo 14)、 “阿波罗15号” (Apollo 15)、 “月球车1号” (Lunakhod 1)、 “月球车2号” (Lunakhod 2)) 之间的飞行时间间隔来计算地月距离。LLR除了可以确定与地月动力学相关的参数, 在检验广义相对论、等效原理、万有引力定律等方面也有重要作用^[1-2], 对中国太空安全、空间碎片和深空目标探测、太空科学实验等多领域具有重大应用价值。

目前, 能够开展常规LLR工作的激光测站只有美国的Apache Point天文台^[3]、法国的Grasse测站^[4]、意大利的Matera测站和德国的Wettzell测站^[5]。除此之外, 美国的MLRS (McDonald Laser Ranging Station)、Haleakala天文台和澳大利亚的Orrorral测站^[6]也开展了LLR观测。中国的LLR技术起步较晚。1990年, 云南天文台建立了当时国内口径最大的1.2 m激光测距望远镜^[7]。经过多年研究, 克服了多个技术挑战后, 云南天文台建立了1.2 m望远镜10 Hz共光路LLR系统, 在国内

率先实现了LLR, 于2018年1月22日成功获得A15角反射器阵列的回波信号, 由于受到激光器脉冲宽度的影响, 测量精度优于米级^[8]。中山大学“天琴”测距台站于2019年6月8日首次测得A15的回波信号, 同年11月7日, “天琴”台站成功探测到月面上全部5个角反射器阵列的有效回波信号, 表明该系统具备了常规LLR能力, 目前测量精度为厘米级^[9]。LLR提供持续高精度的地月距离测量, 50多年来, 测量精度从分米级提升到了毫米级, 提供了丰富的激光测量数据, 在引力物理、地月系统动力学、地球和月球的非球形和粘弹性等性质的科学研究应用发挥了重要作用^[10]。尤其是近年来国内LLR技术发展, 对中国激光测月的应用以及地月空间的研究起到关键作用。

为充分发挥LLR数据的科学作用, 需要对测月台站发布的LLR数据进行处理, 通过模型修正得到科学分析所需的观测量。目前, 全球范围内开展LLR数据处理和建立月球历表的机构有美国的喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL)^[11]、法国的巴黎天文台月球分析中心 (Paris Observatory Lunar Analysis Center, POLAC)^[12]、俄罗斯应用天文研究所 (Institute of Applied Astronomy Russian Academy of Sciences,

Fairhead和Bretagnon^[18]发布的解析公式通过计算获得,将解析式展开到787项,得到的结果精度优于1 ns。公式为

$$T_{\text{TDB}} - T_{\text{TT}} = \sum_{j=0}^4 t^j \left[\sum_{i=1}^{N_i} A_i^j \sin(\omega_i^j t + \phi_i^j) \right] \quad (5)$$

其中: t 为从J2000.0起算的儒略千年数; A_i^j 、 ω_i^j 、 ϕ_i^j 分别为各展开项的振幅、频率和初相。

从UTC到TDB的时间转换过程中,需要考虑由时间流速不同引起的时间改正项^[19]

$$(t_3 - t_1)^{(\text{UTC})} = (t_3 - t_1)^{(\text{TDB})} + T_{\text{TT}} \text{minus} T_{\text{TDB}}(t_3) - T_{\text{TT}} \text{minus} T_{\text{TDB}}(t_1) \quad (6)$$

1.3 LLR修正模型

在LLR过程中,天体的引力和地球大气环境等都会引起激光飞行距离的变化。本文对影响量级在1 cm以上的激光飞行距离误差修正项进行建模和分析:分别为相对论效应、大气延迟效应、地球潮汐和月球潮汐。各修正模型的量级和参考框架在表1中给出。

表1 LLR中的修正模型
Table 1 Corrective model in LLR

修正内容	修正值/m	参考系
相对论修正	7~8	BCRS
大气延迟修正	2~12	ITRS
地球潮汐修正	0~0.3	ITRS
月球潮汐修正	0.2~0.6	PA

1.3.1 广义相对论修正

太阳系中天体的引力作用会导致光的弯曲,这个效应由Shapiro^[20]提出。根据Kopeikin提出的理论模型,在计算LLR中的激光飞行时间时,需要考虑以下天体的引力作用导致的激光传播延时:太阳、地球、月球、木星、土星^[21]。引力弯曲的改正值为

$$c(t_2 - t_1) = \sum_A \frac{2GM_A}{c^2} \ln \frac{R_{2A} + R_{1A} + R_{21}}{R_{2A} + R_{1A} - R_{21}} + \frac{8G^2 M_S^2}{c^4} \frac{R_{21}}{R_{21}^2 - (R_{2S} + R_{1S})^2} \quad (7)$$

其中: G 为万有引力常数; R_{2A} 、 R_{2S} 分别为天体A和太阳到角反射器的距离; R_{1A} 、 R_{1S} 分别为天体A和太阳到地面站的距离; R_{21} 为地面站到角反射器的距离。

在LLR中,太阳引力场引起的广义相对论修正量级为米级,地球引力场引起的广义相对论修正量级为厘米级,而月球、木星和土星引力场引起的广义相对论修正量级为亚毫米级。考虑到以上天体引力场的共同作用,广义相对论修正的大小为7~8 m。

1.3.2 大气延迟修正

由于大气延迟效应,激光在传播过程中会发生弯曲,从而增加光行时。本文使用IERS2010规范推荐的Mendes-Pavlis模型,标定出的模型精度在亚毫米级^[22-23]。模型通过大气折射的天顶延迟模型和投影函数计算大气延迟:根据大气折射率和真空折射率之间的差异,可以计算出天顶方向的大气延迟量,再根据投影函数模型得到相应高度角上的延迟量

$$d_{\text{atm}}^c = 10^{-6} \int_{r_s}^{r_a} N dz = \int_{r_s}^{r_a} (n - 1) dz \quad (8)$$

$$d_{\text{atm}} = d_{\text{atm}}^c m(e)$$

其中: dz 为积分路径; n 为大气折射率; $m(e)$ 为投影函数。

在台站观测气象条件下,大气延迟修正的大小为2~12 m。LLR台站的观测角度大多在30°~60°之间,因为该角度范围更适合开展LLR实验。大气延迟修正值随着观测高度角的增大而减小,并且高仰角观测时模型误差更小。因此,在实际观测中,大气延迟修正值通常为2~4 m。

1.3.3 地球潮汐修正

地球由于受到外部引力作用产生的潮汐引起的表面形变可以达到分米量级,因此,需要对观测台站坐标形变量进行计算。地球潮汐有固体潮、海洋潮、固体极潮、海洋极潮和大气负荷压:由于地球的固体部分受到太阳系内天体的引力作用而引起的表面形变、由于引力作用使海洋质量分布发生变化而引起的固体地球形变、由于地球自转产生的离心效应使地球表面发生的形变、由于极移对于海洋的离心效应使海洋质量变化从而引发的地球表面形变,太阳对大气的昼夜加热也会引起地球表面的周期性运动^[14]。

对固体潮、极潮和大气负荷压依据IERS2010进行建模,对海洋潮依据FES2004模型进行改正,海洋极潮依据极移参数进行计算。由于测月台站的地理位置差异,不同台站坐标受到潮汐影响产生的形变量有较大差异。地球潮汐引起的台站坐标形变量主要来源于固体潮,其余潮汐引起的台站形变量仅为毫米量级。以Grasse测站为例,由固体潮引起的形变在 X 、 Z 方向上的幅值约为20 cm,在 Y 方向上的幅值约为30 cm。由于太阳和月球引力场的合成作用,地球潮汐的周期变化十分复杂,在激光飞行方向上,地球潮汐修正的幅值约为30 cm,但是大多数时候的修正值仅为厘米级。

1.3.4 月球潮汐修正

太阳系中天体的引力会使月球发生形变,导致月面上角反射器的坐标发生变化。月球潮汐只考虑固体潮的影响,修正方法由二阶地球固体潮推广得到^[19]

$$\Delta \mathbf{r} = \sum_{j=1,2} \frac{GM_j R_c^4}{GM_\oplus R_j^3} \left\{ h_2 \hat{\mathbf{r}} \left(\frac{3(\hat{R}_j \cdot \hat{\mathbf{r}})^2 - 1}{2} \right) + 3I_2 (\hat{R}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}) [\hat{R}_j - (\hat{R}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}) \hat{\mathbf{r}}] \right\} \quad (9)$$

其中: GM_j 为地球($j=1$)和太阳($j=2$)的引力常数; GM_\oplus 为月球的引力常数; \hat{R}_j 、 R_j 分别为地球和太阳相对于月心的单位向量以及该向量的大小; R_c 为反射器相对于月心的距离; $\hat{\mathbf{r}}$ 、 r 分别为反射器相对于月心的单位向量以及该向量的大小。

5 个角反射器受到月球固体潮影响产生的偏移量在 20~60 cm 之间, 不同角反射器由于在月面上的位置不同导致坐标形变量有较大差异。

1.4 LLR 数据处理结果

根据 LLR 处理程序和 DE430 星历, 结合 ILRS 发布的 LLR 数据, 对光飞行距离的测量值和计算值作差得到单程 O-C 残差。其中, DE430 星历对应的月面角反射器坐标在表 2 中给出。

表 2 角反射器在 PA 坐标系下的坐标

角反射器阵列编号	X/m	Y/m	Z/m
Apollo 11	1 591 966.550	690 699.375	21 003.866
Apollo 14	1 652 689.504	-520 997.525	-109 730.417
Apollo 15	1 554 678.231	98 095.485	765 005.355
Lunokhod 1	1 114 292.213	-781 298.510	1 076 058.872
Lunokhod 2	1 339 363.318	801 871.862	756 358.849

图 3 为 2006 年 4 月到 2021 年 12 月的 LLR 数据检核结果, RMSE 约为 3.74 cm。2006 年 4 月到 2014 年 12 月 LLR 数据的检核残差幅值约为 10 cm, RMSE 约为 3.10 cm; 2015 年 1 月到 2021 年 12 月 LLR 数据的检核残差幅值约为 12 cm, RMSE 约为 3.95 cm。本文处理结果相较于 DE430 星历发布的约 2 cm 的 RMSE 还存在一定的差距, 主要误差可能由各项输入参数(台站坐标、角反射器坐标、EOP 参数等)引入, 程序计算过程中的截断误差也会对最后的检核残差产生影响。

DE430 历表于 2014 年发布, 通过拟合 LLR 数据获得月球轨道和天平动参数, DE430 提供的角反射器坐标也根据历表和观测数据拟合得到。因此, 使用 DE430 历表检核 LLR 数据时, 在 2014 年之后, 由于角反射器坐标与历表不匹配, 导致检核残差增大。由图 3 可知, 2017 年 9 月(MJD 时间)之后检核残差幅值会呈现出明显随时间扩大的趋势, 这是由于拟合得到的角反射器坐标与历表不匹配程度随时间增加。因此, 需要对月面角反射器坐标偏差进行估计以获得更小的 O-C 检核残差。

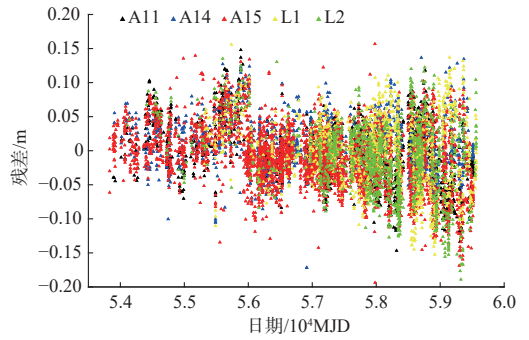


图 3 2006—2021 年 LLR 数据检核残差
Fig. 3 LLR data check residuals of 2006—2021

2 月面角反射器坐标偏差估计

月面角反射器的坐标由各 LLR 数据分析中心进行内部解算得到, 存在不同分析中心之间以及同一分析中心不同年份之间的计算结果差异。针对 LLR 数据处理中角反射器坐标与月球历表不匹配的问题, 本节对 5 个角反射器的坐标精度进行分析和估计。

2.1 坐标偏差估计方法

构成 LLR 中 O-C 残差 r 的因素为

$$r = \frac{(x_{\text{ref}} - x_{\text{sta}})}{\rho} \Delta x + \frac{(y_{\text{ref}} - y_{\text{sta}})}{\rho} \Delta y + \frac{(z_{\text{ref}} - z_{\text{sta}})}{\rho} \Delta z \quad (10)$$

其中: ρ 为角反射器与台站之间的距离; $(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}}, z_{\text{ref}})$ 为角反射器坐标; $(x_{\text{sta}}, y_{\text{sta}}, z_{\text{sta}})$ 为台站坐标; $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为角反射器坐标偏差。

将 LLR 残差数据代入式 (10), 得到的角反射器坐标误差的参数为

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{设 } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix},$$

式 (11) 就可以写成 $\mathbf{R} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}$ 。利用最小二乘法, \mathbf{X} 可以公用式 (12) 进行计算

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{R} \quad (12)$$

在几何定位方法中, 多个基站和移动台之间的相对距离将很大程度决定定位的准确度, 这个影响因子叫做精度因子 (Dilution of Precision, DOP), 精度因子越小, 则定位的精度越高。式 (12) 换一种写法: $\delta x = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \delta r$, 则其协方差矩阵为

$$\text{cov}(\delta x) = \mathbf{E}(\delta x \delta x^T) = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{E}(\delta r \delta r^T) \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-T} \quad (13)$$

其中： $\mathbf{E}(\delta r \delta r^T)$ 是 δr 的协方差，而LLR数据的残差 r_1, r_2, \dots, r_n 之间可以看作是相互独立同分布的，设对称矩阵 $\mathbf{G} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ ，于是有

$$\mathbf{cov}(\delta x) = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{xy} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{xz} & g_{yz} & g_{zz} \end{bmatrix} \quad (14)$$

三维位置精度因子（Position Dilution of Precision, PDOP）为

$$\delta_{\text{PDOP}} = \sqrt{g_{xx} + g_{yy} + g_{zz}} \quad (15)$$

2.2 角反射器坐标偏差估计结果

以DE430提供的角反射器坐标作为初始值，选用2015—2021年的LLR数据，根据O-C检核残差，使用最小二乘法对角反射器坐标进行平差计算，偏差估计结果如表3所示。X轴的偏差估计值为毫米到厘米量级，Y轴和Z轴的偏差估计值为厘米到分米量级，PDOP值均小于1，说明该偏差估计方法具有可行性。Apollo15的观测数据最多，占总数据量的41%，因此偏差估计的PDOP值最小，估计精度最高。

表3 月面角反射器坐标偏差估计结果

角反射器阵列编号	$\Delta X/\text{m}$	Y/m	Z/m	PDOP
Apollo 11	0.0152	-0.2471	-0.0757	0.95
Apollo 14	-0.0014	-0.1702	-0.1693	0.99
Apollo 15	0.0154	-0.2995	-0.1146	0.80
Lunokhod 1	0.0057	-0.2869	-0.2144	0.90
Lunokhod 2	0.0238	-0.3096	-0.1088	0.91

图4和图5分别给出了2015—2021年使用估计前和估计后的角反射器坐标作为程序的输入，检核得到的O-C残差结果。使用估计后的角反射器坐标，残差RMSE为3.49 cm，相较于平差前3.95 cm的RMSE，平差后残差随时间扩大的趋势明显减缓，RMSE减小了约0.5 cm。

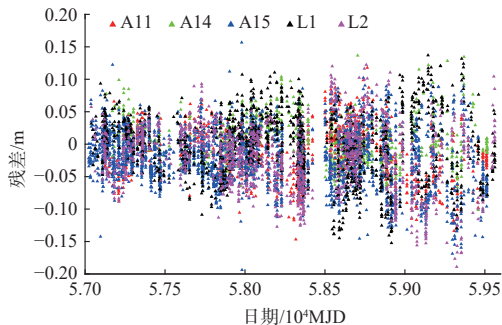


图4 角反射器坐标平差前2015—2021年LLR数据检核残差
Fig. 4 LLR data check residuals of 2015—2021 before retro-reflector coordinate adjustment

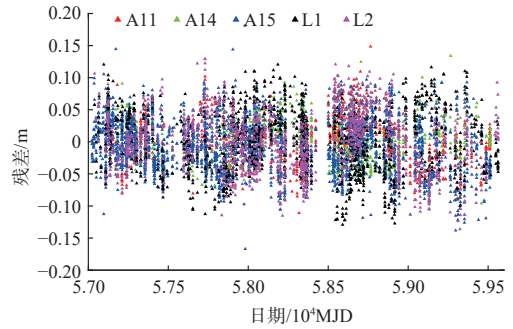


图5 角反射器坐标平差后2015—2021年LLR数据检核残差
Fig. 5 LLR data check residuals of 2015—2021 after retro-reflector coordinate adjustment

相较于JPL近期观测数据约2 cm的RMSE，除了1.4节所述的输入误差和截断误差外，拟合数据的数据量也会对检核精度产生影响。

2.3 不同历表角反射器坐标估计

不同星历间地月距离有很大差异，本文选取DE405、DE421和DE430历表计算月球相对于地心的位置，图6是以DE430的结果为参考值分析其余历表的位置误差：DE405的位置误差约为1.5 m；DE421的位置误差约为0.16 m。与DE405相比，DE421的误差显著减小，这是由于DE421使用的拟合数据跨度更长、精度也更高。DE430则使用了更高精度的重力场数据和更长跨度的LLR数据。

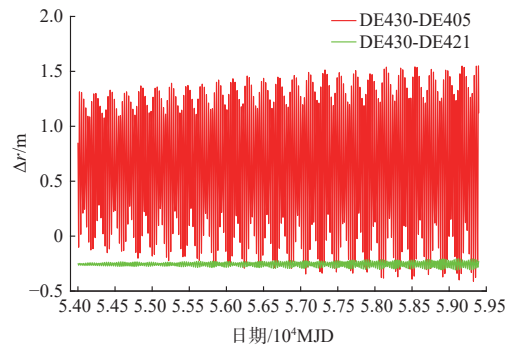


图6 不同历表间的地月位置差异
Fig. 6 Differences in position of the Earth and the Moon between different ephemerides

在使用不同历表作为程序的输入对LLR数据进行检核时，由于历表间的位置差异，要选用相对应的角反射器坐标。使用DE430^[11]提供的角反射器坐标作为初始参数，解算与DE405和DE421相匹配的角反射器坐标参数，坐标平差的结果如表4所示。从表4的数据，结合不同JPL历表的地月位置误差，可知DE421与DE430的角反射器坐标较为接近，DE405拟合出的角反射器坐标与DE430的结果相差了几十米。

表4 不同历表下角反射器坐标平差最大值

Table 4 Maximum retro-reflector coordinate adjustment at different ephemerides

历表	max(ΔX)/m	max(ΔY)/m	max(ΔZ)/m	PDOP
DE405	-22.023	34.390	4.558	0.81
DE421	1.290	-1.496	-0.910	0.81

以估计得到的角反射器坐标作为输入,分别使用DE405、DE421、DE430历表对A15角反射器的LLR数据进行检核, RMSE分别为18.12 cm、3.60 cm、3.08 cm。结果表明, DE405对于LLR数据的检核精度最差,结果为分米级; DE421和DE430对于LLR数据的检核精度都为厘米级,但是DE430历表更具优越性。

3 结论

本文建立了LLR处理模型,研制出独立自主的LLR数据处理软件。使用软件对ILRS发布的2006—2021年的LLR数据进行检核,该LLR处理模型的检核均方根残差约为3.7 cm,其中,2014年及之前的LLR数据均方根残差约为3 cm,2014年之后的LLR数据均方根残差约为4 cm。

根据LLR数据与观测模型之间存在的偏差,利用最小二乘法拟合出新的角反射器坐标,拟合结果的精度因子小于1,证明了角反射器坐标估计的可行性。结果显示经过校准后近年LLR数据的检核误差减小约0.5 cm,检核精度明显提升。

参 考 文 献

- [1] MÜLLER J. Lunar laser ranging: a tool for general relativity, lunar geophysics and Earth science[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2195-2210.
- [2] MURPHY T, ADELBERGER E, STRASBURG J, et al. Testing gravity via next-generation lunar laser-ranging[J]. *Nuclear Physics B(Proceedings Supplements)*, 2004, 134: 155-162.
- [3] MURPHY T W. Apollo: a new push in lunar laser ranging[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2007, 16(12a): 2127-2135.
- [4] COURDE C. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 602: a90.
- [5] ULRICH S, MUELLER J, REINER D, et al. LLR: activities in Wettzell[C]//Proceedings of 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Annapolis, MD USA: International Laser Ranging Service, 1993.
- [6] BENDER P L. The lunar laser ranging experiment[J]. *Science*, 1973, 182(4109): 229-238.
- [7] 叶叔华, 黄城. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科技出版社, 2000: 154-157.
- [8] 李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 188-195.
- LI Y Q, FU H L, LI R W, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan Observatories[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 188-195.
- [9] 高添泉, 张才士, 李明, 等. 中山大学月球激光测距研究与实验[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(Z1): 247-252.
- GAO T Q, ZHANG C S, LI M, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Sun Yat-sen University[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(Z1): 247-252.
- [10] 何芸, 刘祺, 田伟, 等. 地月第二拉格朗日点卫星激光测距技术研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(2): 130-137.
- HE Y, LIU Q, TIAN W, et al. Study on laser ranging for satellite on the second Lagrange point of Earth-Moon system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 130-137.
- [11] FOLKNER W M, WILLIAMS J G, BOGGS D H, et al. The planetary and lunar ephemerides DE430 and DE431[J]. *Interplanetary Network Progress Report*, 2014, 196(1): 42-196.
- [12] FIENGA A, DERAM P, VISWANATHAN V, et al. INPOP19a planetary ephemerides[D]. [S. l.]: IMCCE, 2019.
- [13] PITJEVA E V, PITJEV N P. Development of planetary ephemerides EPM and their applications[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2014, 119(3-4): 237-256.
- [14] 黄凯, 孙尚彪, 杨永章, 等. 月球激光测距观测模型的研究与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(19): 197-203.
- HUANG K, SUN S B, YANG Y Z, et al. Research and application of lunar laser ranging observation model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(19): 197-203.
- [15] PETIT G, LUZUM B. IERS conventions (2010)[J]. *IERS Technical Note*, 2010, 36: 1-95.
- [16] 全国空间科学及其应用技术标准化技术委员会. 月球空间坐标系, GB/T 30112—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [17] MOYER T D. Formulation for observed and computed values of Deep Space Network data types for navigation[M]. Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, 2005.
- [18] FAIRHEAD L, BRETAGNON P, LESTRADE J F. The time transformation TDB-TDT: an analytical formula and related problem of convention[J]. *Symposium - International Astronomical Union*, 1988, 128: 419-426.
- [19] PAVLOV D A, WILLIAMS J G, SUVORKIN V V. Determining parameters of Moon's orbital and rotational motion from LLR observations using GRAIL and IERS-recommended models[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2016, 126(1-3): 61-88.
- [20] SHAPIRO I I. Fourth test of general relativity[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(26): 789.
- [21] KONOPLIV A S. The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission[J]. *Journal of Geophysical Research. Planets*, 2013, 118(7): 1415-1434.
- [22] MENDES V B, PAVLIS E C. High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(14): 189-207.
- [23] MENDES V B, PRATES G, PAVLIS E C, et al. Improved mapping functions for atmospheric refraction correction in SLR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 53-1-53-4.

作者简介:

方振(1997-),男,硕士,助理工程师,主要研究方向:月球激光测距。

通信地址:深空探测实验室总体技术研究院(230031)

电话:13759881609

E-mail:2294764519@qq.com

谷德峰(1980-),男,教授,主要研究方向:卫星精密跟踪测量数据处理、轨道确定和试验评估。本文通信作者。

通信地址:中山大学人工智能学院(519082)

E-mail:gudefeng@mail.sysu.edu.cn

LLR Data Processing and Lunar Retro-Reflector Coordinate Estimation

FANG Zhen^{1,2}, GU Defeng^{1,3}, SHAO Kai^{1,4}, AN Zicong^{1,4}, LI Ming^{1,4}

(1. TianQin Center, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

2. Institute of Technology, Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230031, China;

3. School of Artificial Intelligence, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

4. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Given the current situation where laser ranging data processing algorithms from domestic and international organizations are not publicly available, in this paper an LLR data processing model was established first. Using self-developed software, which implements error algorithms for general relativity effects, atmospheric delay effects, Earth tides, and lunar tides, high-precision LLR data processing was achieved. The results indicate that when using the data processing program to validate the LLR standard point data published by the International Lunar Ranging Service (ILRS) for the years 2006 to 2021, the root mean square residual is approximately 3.7 cm. Thereinto, the root mean square residual of LLR data in 2014 and before is approximately 3cm, and the root mean square residual of LLR data after 2014 is approximately 4cm. Furthermore, to address the issue of reduced accuracy in LLR data validation due to discrepancies between lunar retroreflector coordinates and lunar ephemerides, the least squares method was employed to estimate the coordinates of the lunar retroreflectors. The results show that, when used as input for the program, the adjusted retroreflector coordinates improve the validation accuracy by approximately 0.5 cm.

Keywords: lunar laser ranging; observational model; accuracy analysis; estimation of retroreflector coordinates

Highlights:

- An LLR data processing model was established.
- The least-squares method is used to solve the problem of mismatch between the coordinates of the lunar retroreflector and the lunar ephemeris.
- This paper provides a basis and ideas for further improving the accuracy of LLR data processing.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]