引用格式:张晶,郭文阁,王霄,等. 国家授时中心 SLR 站对地球自转参数解算精度贡献研究[J]. 时间频率学报,2026,49(2):305-314.

国家授时中心 SLR 站对地球自转参数解算精度贡献研究

张晶[1]，郭文阁[1,2,†]，王霄[2,3]，雷辉[2,3,4]，杨旭海[2,3,4]，张首刚[2,3]

1. 西安石油大学 理学院,西安 710065;
2. 中国科学院 国家授时中心,西安 710600;
3. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院),西安 710600;
4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院,北京 100049

摘要:精确解算地球自转参数对于地球动力学研究、卫星精密轨道确定、深空探测、以及地球参考框架的建立等方面具有重要意义。回顾了卫星激光测距 SLR 与月球激光测距 LLR 技术在提高地球自转参数解算精度中的研究进展,介绍了中国科学院国家授时中心骊山卫星激光测距站与航天城卫星激光测距站及其在地球自转参数解算方面的研究进展。初步研究结果表明,利用国际激光测距服务提供的观测数据,通过调整事后残差异常测站的解算策略,地球自转参数解算精度显著提升。将仅使用国际激光测距服务数据的解算结果与分别加入国家授时中心两个卫星激光测距站观测数据的解算结果做对比,地球自转参数的 3 个参数解算精度均有提升。

关键词:卫星激光测距;月球激光测距;地球自转参数;解算精度

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-02-0305-10

Study on the contribution of the satellite laser ranging station of the National Time Service Center to the accuracy of Earth rotation parameter estimation

ZHANG Jing[1], GUO Wen-ge[1,2,†], WANG Xiao[2,3], LEI Hui[2,3,4], YANG Xu-hai[2,3,4], ZHANG Shou-gang[2,3]

1. College of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Accurate computation of Earth rotation parameters (ERP) is crucial for research in Earth dynamics, precise satellite orbit determination, deep space exploration, and the establishment of Earth reference frames. This paper reviews the advancements in satellite laser ranging (SLR) and lunar laser ranging (LLR) technologies for enhancing the accuracy of ERP computation. It highlights the progress made in ERP computation at the Lishan SLR station and the Aerospace City SLR station, both operated by

收稿日期:2025-09-16;接受日期:2025-11-15;†:wguo@xsyu.edu.cn

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A 类)(XDA0350305);国家重点研发计划(2023YFB3906500);中国科学院战略性先导科技专项(B 类)(XDB1070203)

the National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences. Preliminary results demonstrate that the accuracy of ERP computation significantly improves by adjusting the calculation strategies for stations with abnormal post-fit residuals using observational data provided by the International Laser Ranging Service(ILRS). Furthermore, comparisons between ERP solutions derived solely from ILRS data and those that incorporate observations from the two aforementioned SLR stations indicate an enhancement in the accuracy of all three ERP components.

Keywords: satellite laser ranging (SLR); lunar laser ranging (LLR); Earth rotation parameters; calculation accuracy

地球自转参数(Earth rotation parameters, ERP)是描述地球自转轴在惯性坐标系中姿态变化的一组物理量。地球自转轴相对于天球坐标系(geocentric celestial reference system, GCRS)和地球固定参考系(terrestrial reference system, TRS)不断改变方向,且自转角速度随时间波动。持续监测地球自转变化,对科学研究、重大工程应用和社会安全方面保障具有重要意义,它是构建时间系统、确立精确参考框架、实现高精度导航的基础,为地球固定坐标系与空间固定坐标系提供转换纽带。以地球自转为参考的时间基准世界时(Universal Time, UT1)对航空航天、地球科学和天文学多个学科极具研究价值,因其变化反映了地球系统内部的引力作用与地球动力学演化过程。通过连续精确监测地球自转,不仅可深入理解地球系统动力学及各圈层相互作用机制,如大气-海洋-固体地球之间的角动量交换或地核-地幔耦合机制,还可以为类地行星时间尺度建立提供方法和技术积累。

当前,甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星/月球激光测距(satellite laser ranging/lunar laser ranging, SLR/LLR)、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)等精密大地测量技术,以及环形激光陀螺(ring laser gyroscope, RLG)这类高精度惯性测量器件,共同为这项高度跨学科的研究提供了计量学基础。

本文梳理了国际卫星激光测距观测网与数据处理体系;介绍了中国科学院国家授时中心(National Time Service Center, NTSC)卫星激光测距台站的建设情况;验证了国家授时中心两个台站激光测距资料的 ERP 解算效能。

1 激光测距观测网与 ERP 解算

1.1 SLR/LLR 测距解算 ERP 基本原理

以地球质心为原点的局部惯性系—地心天球坐标系(geocentric celestial reference system, GCRS)与人造卫星运行紧密相连,是研究地球人造卫星最合理选择的局部惯性参考系。但是,人造卫星观测在地面,其采用的参考系为国际地球参考系(international terrestrial reference system, ITRS),因此地面观测量需要从国际地球参考系 ITRS 转换到地心天球坐标系 GCRS,地球定向参数(Earth orientation parameter, EOP)是这 2 个坐标系之间转换的关键参量。其中,与地球自转相关的参量,即:地球自转角(或 UT1)和极移,被称为地球自转参数(Earth rotation parameter, ERP)。对于 EOP 或者 ERP 参数中的地球自转角(或 UT1),常有另一个参数与其对应出现,即日长变化,是反映地球自转角速度的参数,也就是地球自转角(或 UT1)的导数,二者之间可以互相求解。根据《IERS Convention 2010》规范[1]定义,[GCRS]表示历元 J2000.0 对应的地心天球坐标系,[ITRS]表示该点在地心地固坐标系,其转换关系如图 1 所示。

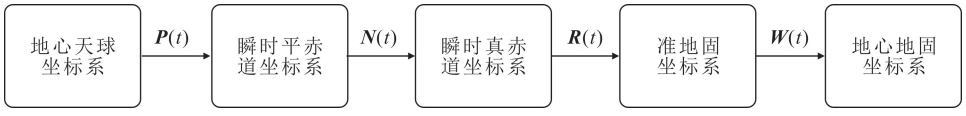


图 1 地心天球坐标系与地心地固坐标系转换流程框图

根据图 1,地心天球坐标系与地心地固坐标系转换的数学表达式[1]为

$$[\mathrm{GCRS}]=\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{N}(t)\boldsymbol{R}(t)\boldsymbol{W}(t)[\mathrm{ITRS}]。\quad(1)$$

式(1)中,$\boldsymbol{P}(t)$为岁差矩阵,$\boldsymbol{N}(t)$为章动矩阵,$\boldsymbol{R}(t)$为地球自转矩阵,$\boldsymbol{W}(t)$为极移矩阵。

卫星激光测距解算地球自转参数时,理想情况下,测站需均匀分布于不同大陆,数量为 6～8 个,纬度集中在 30°～60°范围内,经度间隔约 120°[2]。这种分布能有效约束地球自转轴的空间变化:高纬度测站对极移(polar motion,PM)分量更敏感,而赤道附近测站的加入可提升 UT1－UTC 解算精度[3]。若测站过度集中于单一区域(如欧洲的 Wettzell、Graz 站),会导致极移 Y 分量的误差显著增大[4]。此外,SLR 解算 ERP 对测距精度和观测时长有严格要求:单次测距精度需优于 1 cm,系统误差(如时间偏差、大气延迟)需严格校正[2]。单站月观测时长需超过 50%以保证 ERP 时间序列的稳定性[3]。

月球的质量、体积以及离地球的距离都远大于任何人造卫星,在激光测月中,地-月-日属于三体问题,坐标转换更为复杂。

将地面站从国际地球参考系转换到地心天球坐标系只是第一步。还需通过月球的 3 个欧拉角(θ,φ,ψ)将月球主轴坐标系(lunar principal axis coordinate system,PA)下的角反射器的三维坐标转换至月心天球坐标系(lunacentric celestial reference system,LCRS)[5]:

$$[\mathrm{SCRS}]=\boldsymbol{R}_z(-\varphi)\boldsymbol{R}_x(-\theta)\boldsymbol{R}_z(-\psi)[\mathrm{PA}]。\quad(2)$$

式(2)中,$\boldsymbol{R}_x$ 和 $\boldsymbol{R}_z$ 分别表示绕 x 轴和 z 轴的旋转矩阵,欧拉角可从历表中获得。

此外,还要考虑相对论效应,将地面站坐标由地球惯性参考系转换至太阳系质心参考系(barycentric celestial reference system,BCRS),以及反射器坐标由月球惯性参考系转换至太阳系质心参考系[5]:

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{BCRS}}=\boldsymbol{r}_{\mathrm{E}}+\boldsymbol{S}_{\mathrm{GCRS}}\left(1-\frac{U_{\mathrm{E}}}{c^2}-L_{\mathrm{c}}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{\boldsymbol{r}_{\mathrm{E}}-\boldsymbol{S}_{\mathrm{GCRS}}}{c^2}\right)\boldsymbol{r}_{\mathrm{E}},\quad(3)$$

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{BCRS}}=\boldsymbol{r}_{\mathrm{E}}+\boldsymbol{S}_{\mathrm{LCRS}}\left(1-\frac{U_{\mathrm{M}}}{c^2}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{\boldsymbol{r}_{\mathrm{M}}\cdot\boldsymbol{S}_{\mathrm{GCRS}}}{c^2}\right)\boldsymbol{r}_{\mathrm{M}}。\quad(4)$$

式(3)和(4)中,$\boldsymbol{S}_{\mathrm{BCRS}}$ 为地面站在太阳系质心坐标系下的坐标;$\boldsymbol{S}_{\mathrm{GCRS}}$ 为地面站在大地质心坐标系下的坐标;$\boldsymbol{X}_{\mathrm{BCRS}}$ 为反射器在太阳质心坐标系下的坐标;$\boldsymbol{S}_{\mathrm{LCRS}}$ 为反射器在月心天球坐标系下的坐标;U_{E} 和 U_{M} 表示其他天体对地球和月球的引力势;L_{c} 表示 Lorentz 常数,为 $1.480\,826\,867\,41\times10^{-8}$,$\boldsymbol{r}_{\mathrm{E}}$,$\boldsymbol{r}_{\mathrm{M}}$ 分别表示为地球和月球相对于太阳系质心的位置矢量。

LLR 解算 ERP 的约束条件与 SLR 存在显著差异,主要受限于月球的远距离、观测几何特性及反射器布局[6]。由于月球轨道倾角仅约 5°,其赤纬变化范围较小,测站纬度的影响较弱;而经度分布直接决定对日长变化(length of day,LOD)的敏感性,因此全球经度方向的观测覆盖更为重要[7]。理论上,理想分布需至少 3 个测站(经度间隔 120°)以避免单一时区数据盲区,4 个以上测站可抑制局部误差(如大气湍流),并需配合南北半球分布站以抵消月球轨道交点进动引起的系统性误差[4,6]。观测时要求单站连续观测时长≥2 h,单次测距精度＜2 cm[5]。当前 LLR 存在局限性:5 个月面反射器集中于月球正面北纬区域,导致地面测站需偏向北半球(25°N～45°N 为最优纬度),因此无法解算月球物理天平动对 ERP 的耦合影响[6]。目前全球具备 LLR 能力的测站稀少,需进一步整合资源以提升观测覆盖能力[5]。

1.2　国际观测网概况

国际激光测距服务(International Laser Ranging Service,ILRS)在 ILRS 2019 年年报中将 ILRS 观测网按区域分为 NASA、Eurolas 和 WPLTN 三大子网,如图 2[8]。自 1997 年起,ILRS 每季度会对每个测站性能进行评估,并在网站上发布评估报告,自 2012 年起改为每月发布。报告中包含各测站基于数据量、现场处理统计数据及操作合规问题的性能参数,和过去一年月球激光测距的相关信息,以及基于各分析中心快速轨道分析结果的性能参数。根据公布的最新报告显示,Eurolas 的 Graz 站(奥地利)、Matera 站(意大利)和 WPLTN 的 Yarragadee 站(澳大利亚)、上海站(中国)对 LAGEOS 卫星的单次测距精度达 5 mm[9]。



图 2 ILRS 全球台站分布图[8]

中国 SLR 起步较晚，目前，中国常规工作 SLR 站有中国科学院上海天文台、中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站、中国科学院云南天文台、北京房山人卫激光国家野外科学观测研究站、武汉测地所以及国家授时中心等单位建设运行，其中，国家授时中心骊山站于 2025 年正式运行[9]。现在全国范围内已初步覆盖南北方向，如图 3，并积极参与 ILRS 全球联合观测。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1818 号的标准地图制作，底图为无修改

图 3 中国境内 SLR 测站分布图

参与 ILRS 全球联测的 LLR 常态化测站仅 5 个(图 4),均在北半球,其中美国 Apache Point 站单次测距精度最优(4.32 mm)[9]。

测站信息	测站名称	Apache Point	Grasse MEO	Grasse MEO	Matera MLRO	Wettzell
	测站编号	7045	7845	7845	7941	8834
	波长/nm	532	1 064	532	532	1 064
Apollo-11	精度/mm	4.32	25.18	21.83	/	/
Apollo-14	精度/mm	5.05	23.36	21.33	/	/
Apollo-15	精度/mm	6.8	32.37	29.19	43.67	/
Luna-17	精度/mm	4.48	23.28	28.14	/	23.8
Luna-21	精度/mm	8.35	28.71	37.13	/	/

图 4　全球 LLR 站性能对比(2024 年)

除此之外,国际上开展 LLR 观测的地面站还有美国 McDonald 天文台、美国 Haleakala 天文台和澳大利亚的 Orrorral 观测站。中国科学院云南天文台于 2018 年利用 1.2 m 望远镜成功接收到来自 Apollo15 角反射器的回波信号,率先在国内实现了 LLR[10]。中山大学天琴计划激光测月台站于 2019 年成功接收到了来自月面全部角反射器的回波信号,测距精度达到厘米级[11]。

1.3　ERP 解算现状

ILRS 下设 8 个分析中心:意大利航天局(Agenzia Spaziale Italiana,ASI)、德国联邦大地测量局(Bundesamt fuer Kartographie and Geodaesie,BKG)、法国国家空间研究中心(Centre National D'Etudes Spatiales,CNES)、德国大地测量研究所(Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut,DGFI)、欧洲航天局(European Space Agency,ESA)、德国地球科学研究中心(Geo Forschungs Zentrum Potsdam,GFZ)、美国地球系统技术研究中心(Joint Center for Earth Systems Technology,JCET)、英国自然环境研究理事会空间大地测量所(NERC Space Geodesy Facility,NSGF)。ILRS 各中心每天发布过去一周基于纯 SLR 观测数据的 ERP 日解(极移分量 X、Y 及日长变化 LOD),所用卫星为 LAGEOS-1/2 与 Etalon-1/2。表 1 给出了 2025 年 7 月 1 至 30 日期间各分析中心 ERP 产品与 IERS EOP C04 序列的对比结果。

多项研究表明,引入 SLR 观测可显著改善 ERP 解算的精度与可靠性。刘城伯[12]在以 L 波段微波观测为主的解算方案中补充 SLR 数据后,极移的 X 分量、Y 分量和 LOD 的均方根误差分别下降 11.55 μas、11.88 μas 和 3.26 μs/d。王子嘉[13]的对比实验亦显示,在单 GNSS 解算基础上联合 SLR,极移的 X 分量的均方根误差由 66.4 μas 降至 45.4 μas。

表 1　ILRS 八个分析中心 PMX、PMY、LOD 解算精度

分析中心	均方根误差		
	PMX/mas	PMY/mas	LOD/ms
ASI	17.54	18.93	0.26
BKG	0.22	0.30	0.27
CNES	0.24	0.18	0.26
DGFI	23.64	13.00	0.26
ESA	0.14	0.25	0.24
GFZ	68.00	36.52	0.27
JCET	21.46	26.63	0.28
NSGF	0.21	0.35	0.25

为了进一步提高 ERP 解算精度,研究者持续优化数据处理方法与模型。Mateusz 等[14]提出基于数值天气预报模型(NWM)的 Potsdam Mapping Function(PMF),并首次在 SLR 中引入一阶和二阶水平梯度,以修正大气非对称性,水平梯度的引入显著改善了 SLR 解算的极坐标精度,提高了与 IERS-C04 的一致性,X-pole、Y-pole 平均偏差分别减少了 20 μas 和 24 μas。方差分量估计方法被广泛应用于 GNSS/SLR 联合解算,以合理估计不同观测值的权比,进而提升 ERP 解算结果,基于 SLR 内部加权+方差分量估计重新定权策略解算的大地测量参数,对比等权策略,X-pole,Y-pole 和日长变

化精度分别可以提升 4%,5%和 2%[12]。

引入 GNSS 卫星的 SLR 观测数据也可提升 ERP 解算精度。Sośnica 等[15]将 GNSS 卫星与 LAGEOS 联合处理,相较仅使用 LAGEOS 的解,LOD 的 RMSE(root mean squared error)从 122.5 μs 降至 43 μs,极坐标精度虽变化不大,但解算稳定性显著增强。李星星等[16]基于 2019—2021 年 SLR 对 GNSS 卫星的观测数据,提出的单独估计每个卫星-测站对的距离偏差策略,可以有效修正对激光入射角与 LRA(laser reflector array)反射面的非垂直性导致的测距偏差,以 7 d 为一个弧段解算出的 *X*-pole、*Y*-pole、LOD,相对 EOP C04 的均方根误差分别为 473 μas、495 μas、52 μs。魏二虎等[17]利用 GLONASS 的全部卫星激光测距数据进行 ERP 参数解算,并将 SLR 结果和 GNSS 解算结果联合解算 ERP,结果表明,联合 SLR 可改善 GNSS 数据解算 ERP 参数及高频 ERP 参数的系统性误差影响和稳定性。李星星[18]首次证实了模糊固定轨道对 ERP 估计的贡献,利用 GPS 确定卫星轨道,把轨道代入 SLR 解算,*X* 极和 *Y* 极的 RMS(root mean square)分别降低了 12 μas 和 22 μas。

激光测月是天体测量新技术中最早获得成功并投入正规观测的一项技术[19]。王强国[20]利用 1983—1985 年 McDonald、Grasse 与 Haleakala 三台站的 LLR 数据,首次解算出 ERP 的 3 个参数,为后续研究奠定了基础;金文敬[21]进一步给出 *X*-pole、*Y*-pole、UT1－UTC 的解算精度分别达 0.006 as、0.01 as 与 0.5 ms,并系统讨论了地月参数采用值的不同对 ERP 结果的影响。金文敬和王强国[22]还讨论了利用 LLR 解算 ERP 瞬时解的可能性以及求平均解的最佳台站分布,并估算了一天平均解的精度,指出参与 MERIT 联测的 5 个 LLR 台站的联合观测,可以获得精度优于 10 cm 的 ERP 结果,明确了台站分布对解算精度的重要性。随着观测数据与技术手段的积累,LLR 数据处理水平持续提升。方振[23]建立了月球激光测距数据处理模型,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,通过最小二乘法对月面角反射器坐标进行估计后,LLR 数据检核精度可提高约 0.5 cm。这一成果为基于 LLR 数据解算 ERP 提供了更可靠的基础。

2 中国科学院国家授时中心 SLR 台站介绍与 ERP 解算研究

2.1 NTSC 台站建设

我国现有 SLR 站点难以满足“全球均匀、纬度 30°～60°、经度 120°间隔”的理想构网要求。为弥补几何缺陷,国内一方面升级硬件以提升单站测距精度;另一方面推进 SLR 与 GNSS、VLBI 等多技术并址建设,同时布设可快速部署的 SLR 移动站,以临时增强特定区域的观测冗余度。

中国科学院国家授时中心位于西安市临潼区,该区构造稳定、地震烈度低,可为高精度大地测量设施提供长期、安全的物理环境。建设有 SLR、配备 iGMAS(international GNSS Monitoring and Assessment System)、VLBI、天顶筒以及在建的大型环形光学干涉仪等多套 UT1 测定设施,为 SLR 的多技术并址研究提供了完备平台。

目前,国家授时中心已建成两套卫星激光测距系统:骊山站(固定式 1.05 m 望远镜)与航天城站(移动式 400 mm 系统),如图 6 和图 7 所示。骊山站和航天站的关键参数详见图 5。骊山站对 LAGEOS 的测距精度达 0.8 cm(RMS),参与 ILRS 全球联测(编号 7329);航天城站已实现对中国空间站的毫米精度测距[24],且肖伟[25]利用该站的 LAGEOS-1 观测数据结合 ILRS 发布的标准点数据成功解算 ERP。

设备	参数名称	参数值	
		航天城站	骊山站
激光器	波长	532 nm	532 nm
	重复频率	10 kHz	1 kHz
	输出功率	6～7 W	≥1 W
	脉冲宽度	≤30 ps	25 ps
望远镜	地平式结构	/	/
	接收望远镜口径	400 mm	1 050 mm
	方位轴最大转动速度	6 °/s	10 °/s
	俯仰轴最大转动速度	2 °/s	5 °/s
	跟踪精度(RMS)	≤1″	≤1″
	指向精度(RMS)	≤5″	≤3″
	转台置平精度	≤20″	≤5″
回波信号探测器	工作频率	10 kHz	1 kHz
	探测精度(RMS)	～0.45 cm	≤ 0.9cm
事件计时器	计时频率	10 kHz	1 kHz
	计时精度(RMS)	≤10 ps	≤10 ps
地靶标校装置	标定精度(RMS)	～0.45 cm	≤0.6 cm

图 5 NTSC 台站性能对比



图 6　国家授时中心航天城 SLR 站



图 7　国家授时中心骊山 SLR 站

2.2　ERP 解算效能验证

理论上,参与解算的测站数量和观测数据量越多,解算精度越高。然而,若纳入数据质量不佳的测站,反而可能降低整体解算精度。本文使用 2025 年 6 月 1 日至 7 月 31 日 ILRS 官网发布的 LAGEOS-1 全速率数据,对各测站进行事后残差分析发现部分测站残差异常,如乌克兰的 Golosiiv 站(1824)、俄罗斯的 Mendeleevo 2 站(1874)和 Irkutsk 站(1891)、澳大利亚的 Yarragadee 站(7090)、马里兰的 Greenbelt 站(7105)、加利福尼亚的 Monument Peak 站(7110)、夏威夷的 Haleakala 站(7119)、法属波利尼西亚的 Tahiti 站(7124)、日本的 Tsukuba 站(7306)和西班牙的 Yebes 站(7817),具体异常情况见表 2 所示。

表 2　异常事后残差测站分析情况

测站编号	随机差/m	残差异常情况
1824	2.170 2	残差整体偏移+18.5 m 左右
1874	0.324 5	残差整体偏移+21.7 m 左右
1891	0.149 4	残差整体偏移+22.3 m 左右
7090	2.679 9	残差图像呈 U 形
7105	3.580 9	残差图像呈 U 形
7110	3.735 9	残差图像呈 U 形
7119	3.504 5	残差图像呈 U 形
7124	0.871 6	残差图像呈 U 形
7306	0.170 4	残差图像呈 U 形
7817	0.371 9	残差图像呈 U 形

本文使用 2025 年 6 月 1 日至 7 月 31 日 ILRS 官网发布的 LAGEOS-1 标准点数据解算地球自转参数，以 15 d 为一个弧段，每 3 d 解算一组结果。与 IERS 发布的 EOP C04 数据中的 LOD、PM 进行比较，结果如表 3 所示。LOD 的 RMS 为 1.306 ms，PMX 的 RMS 为 9.876 2 mas，PMY 的 RMS 为 17.479 1 mas。调整事后残差异常测站的解算策略，再次解算 ERP，LOD 的 RMS 为 1.305 ms，提升了 0.001 ms，PMX 的 RMS 为 0.57 mas，提升了 9.306 3 mas，PMY 的 RMS 为 0.58 mas，提升了 16.899 1 mas。

表 3 ILRS 官网发布的所有标准点数据与调整测站后解算精度统计信息

参数名称	数据	残差结果			均方根误差
		最大值	最小值	平均值	
PMX	ILRS	1.79 mas	−0.59 mas	0.42 mas	0.57 mas
	ILRS.all	23.56 mas	−22.89 mas	−4.78 mas	9.88 mas
PMY	ILRS	1.56 mas	−0.96 mas	0.04 mas	0.58 mas
	ILRS.all	47.52 mas	−19.60 mas	7.02 mas	17.48 mas
LOD	ILRS	2.193 ms	0.139 ms	1.179 ms	1.305 ms
	ILRS.all	2.232 ms	−0.316 ms	1.139 ms	1.306 ms

在前文使用 2025 年 6 月 1 日至 7 月 31 日的 ILRS 官网发布的 LAGEOS-1 标准点数据中，加入骊山站卫星激光测距系统数据解算地球自转参数，比较有无骊山激光站数据解算地球自转参数的精度，结果如表 4 所示。与 IERS EOP C04 相比，只使用 ILRS 数据解算的 LOD 的残差均值为 1.179 ms，PMX 的残差均值为 0.42 mas、PMY 的残差均值为 0.04 mas。LOD 的 RMSE 为 1.305 ms，PMX 的 RMSE 为 0.57 mas，PMY 的 RMSE 为 0.58 mas。加入骊山站观测数据后，LOD 的残差均值为 1.178 ms，PMX 的残差均值为 0.41 mas、PMY 的残差均值为 0.05 mas。LOD 的残差 RMSE 为 1.304 ms，PMX 的 RMSE 为 0.55 mas，PMY 的 RMSE 为 0.57 mas。加入骊山站数据后，解算地球自转参数的精度均有所提高，LOD 精度提升了 0.001 ms，PMX 精度提升了 0.02 mas，PMY 精度提升了 0.01 mas。

表 4 骊山站卫星激光测距系统数据和 ILRS 官网发布的标准点数据解算精度统计信息

参数名称	数据	残差结果			均方根误差
		最大值	最小值	平均值	
PMX	ILRS	1.79 mas	−0.59 mas	0.42 mas	0.57 mas
	ILRS+	1.56 mas	−0.62 mas	0.41 mas	0.55 mas
PMY	ILRS	1.56 mas	−0.96 mas	0.04 mas	0.58 mas
	ILRS+	1.52 mas	−0.87 mas	0.05 mas	0.57 mas
LOD	ILRS	2.193 ms	0.139 ms	1.179 ms	1.305 ms
	ILRS+	2.192 ms	0.136 ms	1.178 ms	1.304 ms

航天城站数据量少，故本文使用 2023 年 12 月 27 日至 2024 年 1 月 16 日航天城站卫星激光测距系统数据和 ILRS 官网发布的 LAGEOS-1 标准点数据解算地球自转参数，并对比有无航天城激光站数据解算地球自转参数的精度，结果如表 5 所示。与 IERS EOP C04 相比，只使用 ILRS 数据解算的 LOD 的残差均值为 −0.155 ms，PMX 的残差均值为 0.24 mas、PMY 的残差均值为 1.13 mas。LOD 的 RMSE 为 0.364 ms，PMX 的 RMSE 为 0.41 mas，PMY 的 RMSE 为 1.27 mas。加入航天城站观测数据后，LOD 的残差均值为 −0.155ms，PMX 的残差均值为 0.25 mas、PMY 的残差均值为 1.12 mas。

LOD 的残差 RMS 为 0.363 ms,PMX 的 RMSE 为 0.41 mas,PMY 的 RMSE 为 1.26 mas。加入航天城站数据后,解算地球自转参数的精度均有所提高,LOD 精度提升了 0.001 ms,PMY 精度提升了 0.01 mas。

表 5　航天城站卫星激光测距系统数据和 ILRS 官网发布的标准点数据解算精度统计信息

参数名称	数据	残差结果			均方根误差
		最大值	最小值	平均值	
PMX	ILRS	0.99 mas	−0.17 mas	0.24 mas	0.41 mas
	ILRS+	1.00 mas	−0.16 mas	0.25 mas	0.41 mas
PMY	ILRS	1.96 mas	−0.31 mas	1.13 mas	1.27 mas
	ILRS+	1.93 mas	−0.32 mas	1.12 mas	1.26 mas
LOD	ILRS	0.392 ms	−0.584 ms	−0.155 ms	0.364 ms
	ILRS+	0.393 ms	−0.583 ms	−0.155 ms	0.363 ms

3　结语

本文深入探讨了基于 SLR/LLR 技术的地球自转参数(ERP)解算的最新进展,重点分析了中国科学院国家授时中心在这一领域的重要贡献与未来发展方向。利用 ILRS 发布的观测数据解算地球自转参数,通过调整事后残差异常测站的解算策略,地球自转参数解算精度显著提升。仅使用国际激光测距服务数据解算结果与分别加入国家授时中心两个卫星激光测距站观测数据的解算结果做对比,在国际激光测距服务数据加入骊山站数据后 LOD 精度提升了 0.001 ms,PMX 精度提升了 0.02 mas,PMY 精度提升了 0.01 mas;加入航天城站数据后,LOD 精度提升了 0.001 ms,PMY 精度提升了 0.01 mas。

参考文献:

[1] PETIT G, LUZUM B. IERS conventions(2010)[M]. Frantfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie and Geodäsie, 2010.

[2] THALLER D, KRUEGEL M, ROTHACHER M, et al. Combined Earth orientation parameters based on homogeneous and continuous VLBI and GPS data[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(6-8): 529-541.

[3] WILLIAMS J G, DICKEY J. Lunar geophysics, geodesy, and dynamics[C]//International Workshop on Laser Ranging, Washington D C, 2003.

[4] MURPHY T W, ADELBERGER E G, BATTAT J B R, et al. APOLLO: millimeter lunar laser ranging[J]. Classical and Quantum Gravity, 2012, 29(18): 184005.

[5] 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):1912003.

[6] WILLIAMS J G, TURYSHEV S G, BOGGS D H. Lunar laser ranging tests of the equivalence principle[J]. Classical and Quantum Gravity, 2012, 29(18): 184004.

[7] COURDE C, TORRE J M, SAMAIN E, et al. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse Laser Station [J]. Astronomy and Astrophysics, 2017: 602.

[8] PEARLMAN M R, NOLL C E , PAVLIS E C, et al. The ILRS: approaching 20 years and planning for the future[J]. Journal of Geodesy, 2019.

[9] International Laser Ranging Service. Monthly global report cards [EB/OL]. [2025-10-14]. https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/network/system_performance/global_report_cards/monthly/index.html.

[10] 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):104004.

[11] 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),2023,60(1):247-252.

[12] 刘城伯.基于方差分量估计的 GNSS 与 SLR 大地测量参数解算方法研究[D].武汉:武汉大学,2023.

[13] 王子嘉.基于 GNSS/SLR 观测数据的北斗卫星精密定轨与 ERP 参数解算[D].阜新:辽宁工程技术大学,2023.

[14] MATEUSZ D, KRZYSZTOF S. Troposphere delay modeling in SLR based on PMF, VMF3o, and meteorological data[J]. Progress in Earth and Planetary Science, 2024, 11(1): 12.

[15] SOŚNICA K, BURY G, ZAJDEL R. Contribution of Multi-GNSS constellation to SLR-derived terrestrial

reference frame[J]. Geophysical Research Letters, 2018,45(5):2339-2348.

[16] LI X X, LI J Q, YANG Y Q, et al. Determination of global geodetic parameters using satellite laser ranging to Galileo, GLONASS, and BeiDou satellites[J]. Satellite Navigation, 2024, 5(1):10.

[17] 魏二虎,万丽华,金双根,等. 联合 GNSS 和 SLR 观测对地球自转参数的解算与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):581-585.

[18] LI X, ZHANG H, ZHANG K, et al. Earth rotation parameters estimation using GPS and SLR measurements to multiple LEO satellites[J]. Remote Sensing, 2021,13(15):3046.

[19] HUANG K, YANG Y, TANG R, et al. Review of the development of lunar laser ranging[J]. Astronomical Techniques and Instruments, 2024, 1(6):295-306.

[20] 王强国,金文敬. 利用 1983 年 7 月—1985 年 8 月期间的激光测月资料测定地球自转参数[J]. 科学通报,1987,(13):1003-1008.

[21] 金文敬,王强国. 用激光测月资料归算 ERP 和台站基线[J]. 天文学报,1986(2):85-95.

[22] 金文敬,王强国. 用激光测月法测定地球自转参数的精度估计[J]. 中国科学院上海天文台年刊,1984:35-41.

[23] 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.

[24] 王霄,肖伟,李伟超,等. 国家授时中心西安卫星激光测距系统进展[J]. 时间频率学报,2024,47(4):268-276.

[25] 肖伟. 基于激光测卫的地球自转参数解算与分析[D]. 淄博:山东理工大学,2024.