

激光与光电子学进展

基于精密星历的长春站激光测距数据评价及改善

龙翔宇^{1,2}, 董雪^{1,2,3*}, 梁智鹏^{1,2}, 韩兴伟^{1,3}, 关博文^{1,2}, 董贺⁴¹中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008;⁴吉林师范大学信息技术学院, 吉林 四平 136000

摘要 为提升长春站卫星激光测距数据稳定性,从卫星激光测距物理机制及评价指标出发,建立了基于精密星历的数据评价系统,分析了长春站数据的稳定性及外符合精度。根据分析结果,采用前沿半峰 (LEHM) 剪切算法改进数据预处理方法,降低了卫星形状效应对数据精度和稳定性的影响。分析表明,基于精密星历的数据评价系统与国际卫星激光测距组织 (ILRS) 数据中心评价结果一致。采用 LEHM 剪切算法进行数据处理后,长春站 Lageos-1 卫星数据的标准点精度由 4.9 mm 提高至 3.9 mm,短期稳定性由 19.8 mm 提高至 18.1 mm,长期稳定性由 6.2 mm 提高至 5.4 mm,外符合精度由 79.6 mm 提高至 68.2 mm。改进的数据预处理算法可有效提升数据稳定性及外符合精度,为长春站数据稳定性与精度的进一步提升指出了方向。

关键词 卫星激光测距; 精密星历; 轨道检核; 数据评价; 卫星形状效应

中图分类号 P228.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230538

Laser Ranging Data Assessment and Improvement of Changchun Station Using Precise Ephemerides

Long Hongyu^{1,2}, Dong Xue^{1,2,3*}, Liang Zhipeng^{1,2}, Han Xingwei^{1,3}, Guan Bowen^{1,2}, Dong He⁴¹Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China;⁴College of Information Technology, Jilin Normal University, Siping 136000, Jilin, China

Abstract In order to improve the satellite laser ranging data accuracy and stability of Changchun Station, analysis was performed with a data assessment system using precise satellite ephemerides. The assessment system was established from physical mechanism and widely recognized evaluation standard of satellite laser ranging, using precise orbit ephemerides as input. With the help of above assessment system, a new method known as the leading edge half maximum (LEHM) algorithm is used to improve the data pre-processing method and reduce the impact of satellite signature effect on data accuracy and stability. Analysis showed that the output of the data assessment system is consistent with those of International Laser Ranging Service (ILRS) analysis centers. After data pre-processing with the LEHM algorithm, normal point accuracy was improved from 4.9 mm to 3.9 mm, short-term stability was improved from 19.8 mm to 18.1 mm, long-term stability was improved from 6.2 mm to 5.4 mm and range accuracy was improved from 79.6 mm to 68.2 mm. The LEHM algorithm can effectively improve the data accuracy and stability, which points out the way to further improve the accuracy and stability of Changchun laser ranging data.

Key words satellite laser ranging; precise ephemerides; orbital validation; data assessment; satellite signature effects

1 引言

卫星激光测距 (SLR) 在精确测定地球自转参数

(EOP)、国际地球参考系 (ITRF) 的建立与维护、广义相对论验证、时间传递、月球探测、低轨重力测量等领域的科学研究中有重要意义并被广泛应用,也是检核

收稿日期: 2023-01-03; 修回日期: 2023-02-02; 录用日期: 2023-02-19; 网络首发日期: 2023-02-26

通信作者: *dongx@cho.ac.cn

导航卫星、重力卫星和测高卫星等大地测量卫星精密轨道外符合精度的最可靠手段。SLR在数据量与数据精度上都有较好的性能,但仍不能很好地满足全球大地测量观测系统(GGOS)与卫星定轨等的应用需求。根据GGOS的需求,SLR测站数据的年稳定度应该小于0.1 mm,而目前大多数SLR测站的稳定性在厘米级别,有着较大的提升空间^[1-7]。

在卫星激光测距过程中,激光地球动力学卫星(如Lageos-1)的观测数据是国际卫星激光测距组织(ILRS)对SLR测站数据稳定性与精度评价的重要依据^[8],因此基于Lageos卫星对测站数据进行分析研究是国内外的研究热点。1995年,冯初刚等^[9]利用1992年Lageos卫星的全球标准点资料对其进行了精密定轨求得残差均方值,在残差分析中发现标准点资料含有野值,且一些测站有较大的系统误差;1999年,Schillak等^[10]通过Lageos-1/2卫星对SLR测站坐标的稳定性进行了分析,得出测站地心坐标的稳定性在0.5~5 cm;2000年,范建兴等^[11]基于Lageos卫星通过概率密度函数建立卫星质心(COM)模型;2008年,奥地利Graz站基于Lageos卫星形状效应提出了前沿滤波法,该方法选取有效回波数据的前10%进行拟合,可有效地减小形状效应带来的影响,大幅度提升回波数据质量^[12-13];2019年,中国科学院上海天文台吴志波等^[14]对影响SLR数据精度与稳定性的因素如环境、回波强度、回波探测器等进行了分析并改正,将观测数据的长期稳定性、短期稳定性和标准点精度从之前的12.7 mm、22.7 mm和2.0 mm分别提升至4.1 mm、9.3 mm和1.0 mm,改善了上海天文台SLR数据的精度与稳定性;2021年,Schillak等^[15]利用Lares、Lagoes-1/2卫星对测站的坐标进行组合标定,将测站坐标的不确定性由3~11 mm提升为2~6 mm。

目前观测站日常数据评价由ILRS数据中心定期给出,无法及时反馈数据变化,不利于各观测站对数据的监视和状态评估。本文从SLR物理机制及评价指标出发,利用激光测距数据物理模型,建立基于精密星历的快速、有效、灵活的评价系统,应用该评价系统分析长春站Lageos-1卫星数据的稳定性因素和外符合精度,并针对Lageos-1卫星形状效应导致的数据稳定性与精度问题进行数据预处理算法改进,提升观测数据的稳定性。

2 数据评价系统与改善方法

2.1 数据评价系统

2.1.1 检核模型

SLR属于光学测距,脉冲激光在往返卫地时受天气、环境及测距系统本身各种器件的影响会存在各种误差,而Lageos事后精密星历(SP3)可被视为真值^[16],因此为实现利用SP3对测站数据的评估,首先需要基于观测误差项构建SLR数据检核模型剔除数据中的

误差项,模型公式^[1]及各项含义如下

$$\Delta r = \frac{\Delta t}{2} c - r_c - d_{td} - d_{rf} - d_{com} - d_{rel} - \epsilon, \quad (1)$$

式中: Δr 为观测值与通过卫星精密星历、测站位置计算的理论值之间的残差; Δt 为光子往返时间; c 为光速; r_c 为星站几何距离; d_{td} 为潮汐效应引起的测站位置偏差; d_{rf} 为对流层对激光的折射偏差; d_{com} 为卫星质心位置偏差; d_{rel} 为广义相对论效应引起的偏差; ϵ 为随机误差。此外,式中所有参数除光速外皆为变量。

1) 潮汐偏差

为修正潮汐效应所带来的偏差,根据潮汐源作用效果不同选取固体潮、海洋负荷潮及极潮作为总潮汐误差主要修正项。其中:固体潮模型采用Wahr模型^[17],分为日、月天体对测站产生的固体潮偏差 Δr^{st} ,频率项在径向上对固体潮的偏差 δh_1^{st} 及二阶Love数与Shida数取值引起的在径向与北向上的固体潮偏差 δh_2^{st} 、 δN^{st} ;海洋负荷潮会引起测站位移,考虑主要海波潮对台站负荷形变的振幅和相位,测站位移包括径向 δh_{OT}^{st} 、东向 δE_{OT}^{st} 、北向 δN_{OT}^{st} 三个方向上的偏移;极潮,即地球自转产生的地球离心力使地球发生形变,由极移变化导致测站坐标变化,在径向 δh_p^{st} 、东向 δE_p^{st} 、北向 δN_p^{st} 三个方向上偏移。海洋负荷潮与极潮采用IERS 2010规范中的相关修正模型及计算方法^[18],则总潮汐误差求解公式^[1]为

$$\Delta d_{td} = \left\{ \Delta r^{st} + (MLT)^T \begin{pmatrix} \delta E_p^{st} + \delta E_{OT}^{st} \\ \delta N^{st} + \delta N_p^{st} + \delta N_{OT}^{st} \\ \delta h_1^{st} + \delta h_2^{st} + \delta h_p^{st} + \delta h_{OT}^{st} \end{pmatrix} \right\} \cdot \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}^{st}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}^{st}|}, \quad (2)$$

式中: MLT 为地固系到测站系的旋转矩阵; \mathbf{r} 与 \mathbf{r}^{st} 分别为卫星、测站在地固系中的位置矢量。

2) 对流层延迟

对流层能够引起对激光的折射偏差,激光束在非均匀介质中的传播速率也小于真空中的光速,激光测距过程中激光脉冲在往返通过大气层时的大气误差主要体现在距离延迟的变化。采用下式Mendes & Pavlis(MP)模型对其进行修正,该模型将天顶对流层延迟(ZTD)与映射函数相结合计算指定波段激光束的对流层延迟^[19]。

$$d_{rf} = m(e) \times (D_{hz} + D_{wz}), \quad (3)$$

式中: $m(e)$ 为映射函数; D_{hz} 为天顶干延迟; D_{wz} 为天顶湿延迟^[19]。 $m(e)$ 表示为

$$m(e) = \frac{1 + \frac{a_1}{1 + a_2 \sqrt{1 + a_3}}}{1 + \frac{a_1}{\sin(e) + a_2 \sqrt{[\sin(e) a_3]}}}, \quad (4)$$

$$a_i = a_{i0} + a_{i1} T_s + a_{i2} \cos \phi + a_{i3} H, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (5)$$

$$D_{\text{hz}} = 0.002416579 \frac{f_h(\lambda)}{f_s(\phi, H)} P, \quad (6)$$

$$D_{\text{wz}} = 10^{-6} [5.31f_{\text{nh}}(\lambda) - 3.759f_h(\lambda)] \frac{W_1}{f_s(\phi, H)}, \quad (7)$$

其中,

$$f_s(\phi, H) = 1 - 0.0026\cos 2\phi - 2.8 \times 10^{-7} H, \quad (8)$$

式中: e 为望远镜俯仰角(单位: $^\circ$); a_1, a_2, a_3 由式(5)得到; T_s 为测站温度(单位: $^\circ\text{C}$); ϕ 为测站的纬度(单位: $^\circ$); H 为测站海拔高度(单位: m); 式(5)~(7)中 a_{i0}, a_{i1}, a_{i2} 在文献[19]中有详细介绍; P 为测站大气压(单位: mbar); λ 为激光波长(单位: μm); $f_h(\lambda), f_{\text{nh}}(\lambda)$ 分别为流体力学与非流体静力学的色散方程, 详细计算公式见文献[19]; W_1 为测站水汽分压(单位: mbar)。

3) 卫星质心改正

在 SLR 过程中, 激光脉冲到达卫星的表面后, 即被卫星上的角反射器反射, 而在计算卫星与测站之间的距离、卫星运动轨迹时皆以其质心作为中心, 因此存在偏差, 称为卫星的质心偏差。激光测距站的质心改正值, 因各站的设备性能差异略有区别, ILRS 官方根据数据中心提供全球各站的 Lageos-1 卫星的推荐改正值, 如长春站的推荐改正值为 248 mm 。

4) 广义相对论效应

广义相对论效应将导致光线在引力场中传播时间长于平直空间(即引力时延), 因此也需要加以改正, 引力时延简单近似公式^[1]为

$$d_{\text{rel}} = \frac{2GM}{c^3} \ln \frac{r_{\text{sa}} + R_{\text{st}} + \rho}{r_{\text{sa}} + R_{\text{st}} - \rho}, \quad (9)$$

式中: G 为万有引力常数; M 为引力场源的质量; $r_{\text{sa}}, R_{\text{st}}$ 为引力源到卫星和观测者的距离; ρ 为卫星到观测者的距离。

在经过上述各项改正后, 数据中仍包含不可避免的偏差, 即时间偏差 T_b 与距离偏差 R_b , 通过对每次卫星通过的测站观测残差进行最小二乘拟合可计算出 T_b 与 R_b 。

$$\rho'_i(t) = \dot{V}_i(t) \cdot T_{bi} + R_{bi}, \quad (10)$$

式中: $\rho'_i(t)$ 为 t 时刻通过测站消除掉其他误差项的观测残差; $\dot{V}_i(t)$ 为 t 时刻卫星速度在径向上的投影; T_{bi} 与 R_{bi} 分别为测站卫星通过每圈的时间偏差与距离偏差。

利用式(1)模型对观测站的观测数据进行误差修正后, 可结合 SP3 对 SLR 测站的观测数据进行检核, 得出评价指标。

2.1.2 数据评价

在检核模型的基础上, 根据 ILRS 官方定义的评价指标建立长春站数据评价系统。其中评价指标为: 长期稳定性(12个月观测数据中每月数据估计残差的标准差)、短期稳定性(最近3个月每圈数据均值残差

的标准差)、标准点精度(最近3个月有效标准点均值的均方根)及外符合精度(观测残差的均方根值、距离偏差、时间偏差)^[20-21]。

为评价测距数据, 须得到测站所发布的标准点(NPT)数据, 各观测站在观测后生成 NPT 数据上传至 ILRS, 并由 ILRS 统一发布^[22]。此外作为检核的 Lageos-1 卫星轨道选取 SP3 事后精密星历, 该星历是 ILRS 数据中心通过全球 SLR 数据进行事后综合轨道定轨得到的, 其定轨精度在 mm 级至 亚 cm 级^[16, 23]。

数据评价系统具体流程如图 1 所示: 首先读取测站的 NPT 数据, 提取出气象(温度、湿度、大气压)与激光发射时刻 t_0 、往返时间 t 的序列数据; 其次通过气象数据计算出对流层延迟 d_{rf} ; 然后通过时间数据, 利用 DE-421 行星星历与卫星星历分别计算 $t_0 + t/2$ 时刻的日月位置及卫星位置, 从而得到潮汐偏移 d_{td} 与相对论延迟值 d_{rel} 及观测距残差 r_0 ; 再减去各误差项后得到残差 r_1 , 当计算得出一圈数据的 r_1 后, 拟合出这圈数据中的 T_b 与 R_b 并减去得到残差 r_2 ; 最后统计每圈的均值(mean)、标准差(std)、均方根(RMS)用于计算评价指标, 其计算公式分别为

$$M_{\text{mean } d} = \frac{\sum_{i=1}^m \rho_i}{m}, \quad (11)$$

$$S_{\text{std } d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\rho_i - M_{\text{mean } d})^2}{m - 1}}, \quad (12)$$

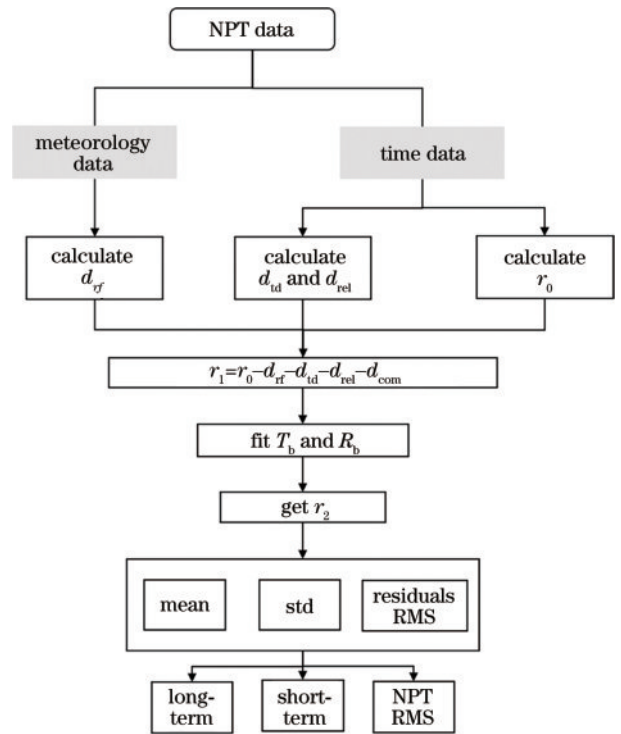


图 1 数据评价流程

Fig. 1 Data evaluation process

$$R_{\text{rms } d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \rho_i^2}{m}}, \quad (13)$$

式中: m 为测站第 d 圈的观测标准点数; ρ_i 为 d 圈中第 i 个数据点的检核残差。

2.2 数据预处理算法改进

在当前单光子高重复频率激光测距中,受球形卫星角反射器分布影响,光子到达不同反射器存在时差会导致回波波形被展宽即卫星形状效应(SSE)。而目前多数测站在数据预处理中采用人工屏幕法,各个数据中心剔除明显噪声并通过多项式拟合提取有效的回波数据生成标准点。考虑 SSE 所带来的影响,本文针对 SSE 对 Lageos-1 卫星测距数据的影响进行分析。

SLR 系统激光器发射的脉冲波形在不考虑外界因素对激光脉冲的影响时,可表示为高斯分布 $S_1(x_1)$ 。但由于 SSE 的影响,回波脉冲会被展宽,回波波形 $S_2(x_2)$ 表现为 $S_1(x_1)$ 与卫星形状效应的分布函数 $P(x)$ 的卷积,其中 $x_2 = x_1 + x, S_2(x_2)$ ^[10,24-25] 表示为

$$S_2(x_2) = S_1(x_1) \cdot P(x) = \int S_1(x_2 - x) P(x) dx, \quad (14)$$

其中 $S_1(x_1)$ 与 $P(x)$ 分别为

$$S_1(x_1) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{2\sigma^2}\right), \quad (15)$$

$$P(x) = \frac{P_\phi(\phi)}{\sin \phi \left(R - L \cos \phi / \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} \right)} \Big|_{\phi = X^{-1}(x)}, \quad (16)$$

$$P_\phi(\phi) = \frac{\eta_1^2(\phi) \sin \phi}{\int_0^{\phi_{\max}} \eta_1^2(\phi) \sin \phi d\phi}, \quad (17)$$

式中: σ 为 0.425 倍的激光脉宽(长春站脉宽为 50 ps); $R = 298$ mm, 为半径; $L = 27.84$ mm, 为角反射器正高; $n = 1.46$, 为角反射器折射率; $\phi_{\max} = 0.75$ rad, 为入射截止角; η_1 为入射角 ϕ 时的相对有效几何面积, 在文献[10]中有详细介绍; $X^{-1}(x)$ 为 $X(\phi)$ 的反函数。由图 2 可得 $X(\phi)$ 公式为

$$X(\phi) = R \cos \phi - L \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}. \quad (18)$$

通过式(14)数值模拟,以入射角 ϕ 为自变量,范围是 $0 \sim \phi_{\max}$, 得出 Lageos-1 卫星脉冲激光的回波分布,如图 3 所示。其中,横坐标为反射平面距卫星中心的投影距离,纵坐标为回波概率,可以看出回波波形左沿即上升沿被展宽,呈现出偏态分布。

为分析此现象对数据的影响,通过预报星历及检核模型(只剔除大气延迟误差)初步处理长春站一圈回波数据,得到其拟合残差,如图 4 所示。其中横坐标为残差范围,可以看出回波数据左侧呈现偏态分布,而右侧符合高斯分布,这与回波波形相似。

针对该现象,采用前沿半峰(LEHM)剪切算法^[26],

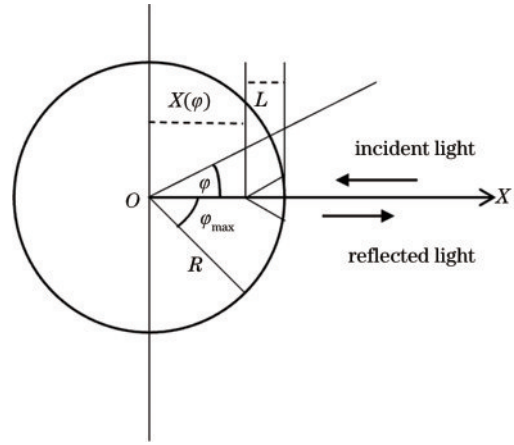


图 2 Lageos-1 的 SLR 过程

Fig. 2 SLR process of Lageos-1

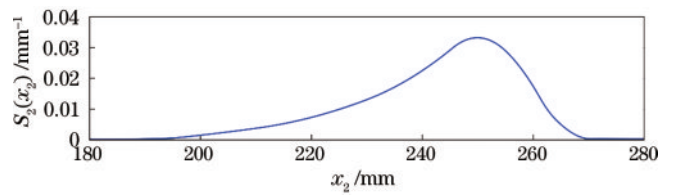


图 3 Lageos-1 卫星激光测距回波脉冲的理论分布

Fig. 3 Theoretical distribution of Lageos-1 satellite laser ranging echo pulse

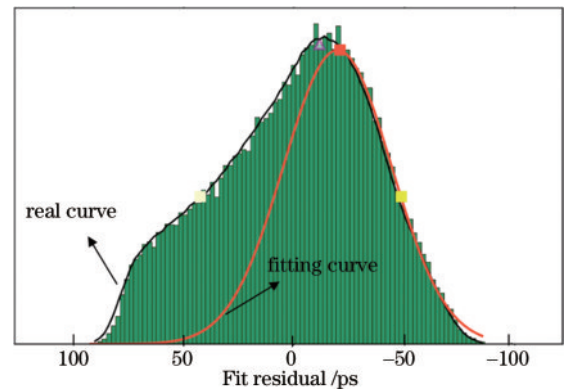


图 4 Lageos-1 卫星激光测距回波数据分布

Fig. 4 Data distribution of Lageos-1 satellite laser ranging echo

对数据高斯拟合(见图 4 fitting curve)并对得到的前后沿半峰进行剪切。基于 LEHM 算法建立了新的数据预处理算法,其流程如图 5 所示:通过预报星历生成每个数据点的预报残差(PR);利用多项式拟合得到拟合残差(FR)并通过 2.5 倍均方根进行数据的筛选,再将经过噪声剔除后的数据细分成合适的多个 bins,对每个 bin 进行高斯逼近拟合得到其 LEHM 与后沿半峰(FEHM);在数据区域选择中左端点的取 LEHM 处向近端延伸 50 ps,即以区间(LEHM-50, FEHM)为提取范围对数据进行剪切并生成新的标准点数据。

图 5 流程中,所需的 Lageos-1 预报星历(CPF)由 ILRS 定期发布^[27]。

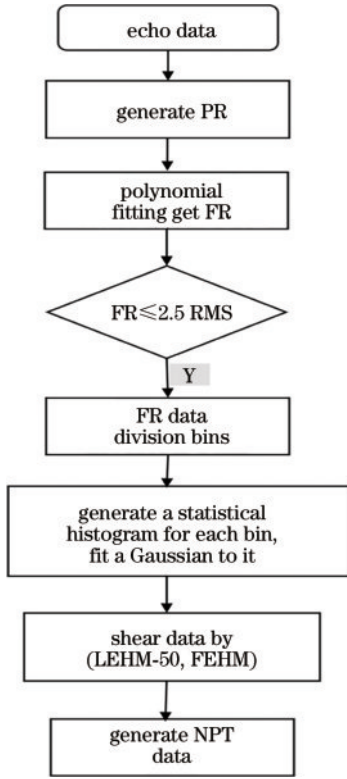


图 5 数据处理流程

Fig. 5 Data processing process

3 结果分析与讨论

为验证上述新建立的评价系统与改进的数据预处理算法,利用 Lageos-1 卫星的 SP3 事后精密星历对长春站 SLR 测站观测数据进行检核,获得数据评价指标。

3.1 数据评价体系验证

利用建立的数据评价系统获得 2022 年长春站的长期稳定性、短期稳定性及标准点精度,与 ILRS 发布的 Hitotsubashi Univ Orbital Analysis (HU OA)、JCET Orbital Analysis (JCET OA)、MCC Orbital Analysis (MCC OA)、SHAO Orbital Analysis (SHA OA) 四个数据中心月报告结果进行对比,分析结果如图 6 所示。

图 6 为本数据评价体系与各个数据中心所公布的结果及各个数据中心结果均值的对比,横轴为时间,纵轴为评价指标数值。其中,长期稳定性数据时间跨度为 12 个月,短期稳定性与标准点精度的时间跨度为 3 个月。在 NPT 精度指标的分析中得出:本数据评价系统与各数据中心发布结果均值误差范围在 0.8~2.9 mm 之间,如图 6(a) 所示;短期稳定性指标中误差范围在 0.3~3.7 mm 之间,如图 6(b) 所示;长期稳定性指标中误差范围在 0.1~2.4 mm 之间,如图 6(c) 所示。各指标之间的误差较小,在可接受范围内且趋势一致,因此本数据评价系统有效,可用于对观测数据稳定性评价及改进方法验证。

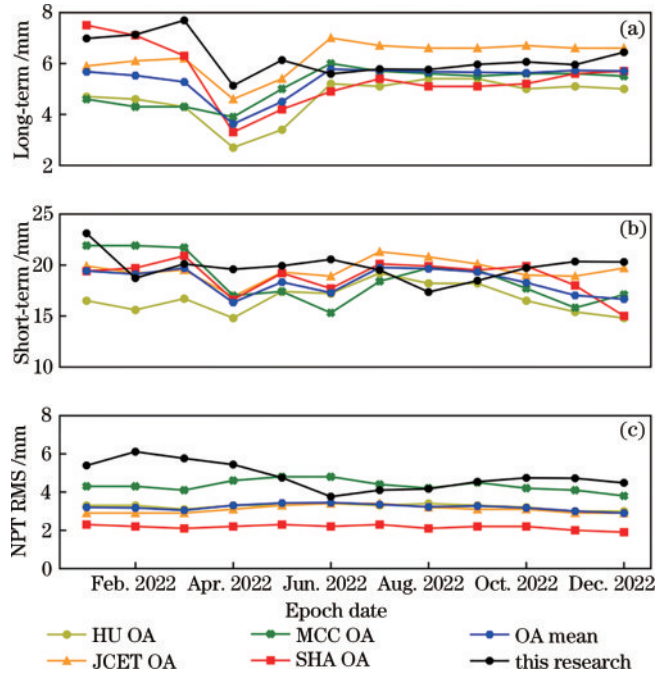


图 6 长春站数据评价结果对比。(a) 长期稳定性; (b) 短期稳定性; (c) 标准点精度

Fig. 6 Comparison of Changchun station data evaluation results. (a) Long-term stability; (b) short-term stability; (c) NPT RMS

3.2 改进方法验证

为验证 LEHM 剪切法对数据滤波的有效性,基于 LEHM 剪切法进行数据预处理,重新生成了 2022 年全年标准点数据,与原 NPT 数据进行对比分析。通过式 (9) 拟合出改进前后每圈数据中的 T_b 和 R_b , 结果如图 7 所示。

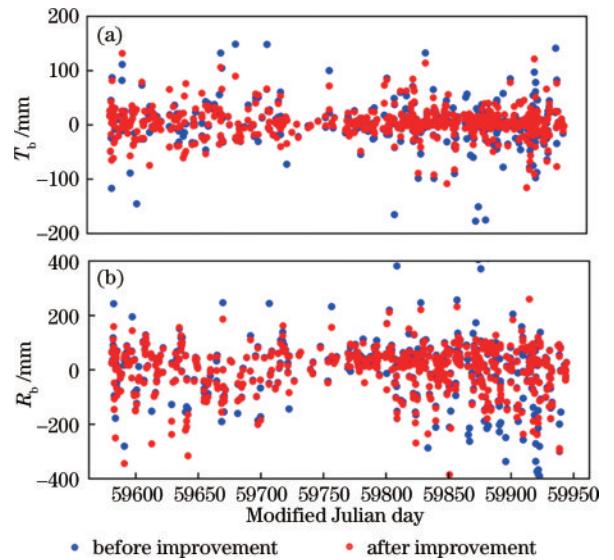


图 7 长春站改进前后数据。(a) T_b ; (b) R_b

Fig. 7 Data of Changchun station before and after improvement. (a) T_b ; (b) R_b

以 T_b 不超过 $50 \mu s$ 、 R_b 不超过 60 mm 作为标准去识别改进前后的有效数据率^[28], 计算结果显示:改进前

长春站 NPT 总数为 4353, 剔除 273 点, 其有效数据率为 93.73%; 改进后重新生成 NPT 总数为 4332, 剔除 232 个点, 其有效数据率为 94.64%, 提升了 0.91%。进一步分析得出改进前后, T_b 的 RMS 从 28.07 μs 提高至 26.42 μs , 提升了 1.65 μs , R_b 的 RMS 从 90.05 mm 降低至 79.12 mm, 提升了 10.93 mm, 观测数据更趋于稳定平滑。同步计算出的外符合精度(不剔除 T_b 与 R_b)

改进前后 NPT 数据由 79.6 mm 提高至 68.2 mm, 测距精度提升了 11.4 mm。通过上述分析, 可得出结论, LEHM 剪切法可降低 Lageos-1 卫星形状的影响, 有效改进数据精度。

在对改进前后长春站数据稳定性的分析过程中, 统计了 2022 年全年的 NPT 数据的精度、短期稳定性及长期稳定性(取 12 个月平均), 结果如表 1 所示。

表 1 长春站 Lageos-1 卫星 NPT 数据改进前后评价结果对比

Table 1 Comparison of assessments for Changchun station Lageos-1 NPT before and after improvement

Item	Number of NPT	NPT RMS /mm	Short term /mm	Long term /mm	Good NPT /%
Mean of ILRS ACs	4353	3.4	19.9	5.4	98
This research before improvement	4353	4.9	19.8	6.2	97
This research after improvement	4332	3.9	18.1	5.4	98

从表 1 中可以看出, 基于 LEHM 剪切法生成的标准点数据中 NPT 精度、短期稳定性及长期稳定性皆有提升, 其中: NPT 精度从 4.9 mm 提高至 3.9 mm, 提升了 1.0 mm; 短期稳定性从 19.8 mm 提高至 18.1 mm, 提升了 1.7 mm; 长期稳定性从 6.2 mm 提高至 5.4 mm, 提升了 0.8 mm。结果表明, 该方法可有效改善 Lageos-1 观测数据的稳定性, 相比国际优秀测站 Graz 站(NPT 精度 1.2 mm、短期稳定性优于 9.1 mm、长期稳定性 1.8 mm)^[20], 仍有提升空间。

4 结 论

本文首先分析了卫星激光测距物理过程, 建立了基于精密星历的数据评价体系。利用 Lageos-1 卫星精密星历对长春站 2022 年的观测 NPT 数据进行分析, 验证了数据评价体系的有效性。通过 Lageos-1 卫星对长春站数据预处理方法进行分析, 研究了形状效应对测站数据的影响并通过 LEHM 剪切法对长春站数据预处理方法进行改进。结果显示, 应用 LEHM 剪切法后, 长春站数据精度与稳定性各项数据均有不同程度上的提升。其中: 在数据观测外符合精度方面, 该方法可将数据的均方根由 79.6 mm 提高至 68.2 mm, 精度提升 11.4 mm; 在数据的稳定性中, NPT 精度提升了 1.0 mm, 短期稳定性提升了 1.7 mm, 长期稳定性提升了 0.8 mm, 改进的数据处理算法可有效提升数据外符合精度及稳定性。在后续的工作中, 将进一步对长春站 SLR 系统硬件及数据处理算法进行改进, 继续提升长春站数据的权重。

参 考 文 献

- [1] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
Ye S H, Huang C. Astronomical geodynamics[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 2000.
- [2] 张忠萍, 杨福民. 卫星激光测距的新进展[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 283-288.
Zhang Z P, Yang F M. The progress in satellite laser ranging[J]. Progress in Astronomy, 2001, 19(2): 283-288.
- [3] Tapley B D, Schutz B E, Eanes R J. Satellite laser ranging and its applications[J]. Celestial Mechanics, 1985, 37(3): 247-261.
- [4] 耿仁方, 吴志波, 黄勇, 等. 基于卫星反射器的转发式激光时间传递试验研究[J]. 中国激光, 2023, 50(18): 1804004.
Geng R F, Wu Z B, Huang Y, et al. Experimental study of forward laser time transfer based on satellite retroreflector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(18): 1804004.
- [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.
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): 1912003.
- [6] 焦仲科, 王登峰, 姚鑫, 等. 面向下一代低低跟踪重力测量的星间激光干涉测距系统误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2112001.
Jiao Z K, Wang D F, Yao X, et al. Error analysis of intersatellite laser interferometric ranging system for next generation low-low tracking gravimetry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2112001.
- [7] Gross R S. The contribution of laser ranging to the global geodetic observing system[EB/OL]. [2022-11-09]. https://cddis.nasa.gov/lw16/docs/papers/ggo_1_Gross_p.pdf.
- [8] ILRS. ILRS quality control board (QCB) [EB/OL]. [2022-11-09]. <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/science/qcb/index.html>.
- [9] 冯初刚, 朱元兰. 1992 年 LAGEOS 卫星全球 SLR 标准点资料的分析[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1995(16): 107-112.
Feng C G, Zhu Y. An analysis for LAGEOS SLR global normal point data of 1992[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1995(16): 107-112.
- [10] Schillak S, Kuzmicz-Cieslak M, Wnuk E. Stability of coordinates of the SLR stations on a basis of LAGEOS-1 and LAGEOS-2 laser ranging in 1999[J]. Artificial Satellites, 2001, 36: 85-96.
- [11] 范建兴, 杨福民, 陈启秀. 激光测距卫星的质心改正模

- 型[J]. 光子学报, 2000, 29(11): 1012-1016.
- Fan J X, Yang F M, Chen Q X. Center-of-mass model of satellites used for laser ranging[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(11): 1012-1016.
- [12] Kirchner G, Kucharski D, Koidl F. Millimeter ranging to centimeter targets[EB/OL]. [2022-11-09]. https://cddis.nasa.gov/lw16/docs/papers/rep_4_Kirchner_p.pdf.
- [13] 安宁, 关博文, 张旖伦, 等. 卫星激光测距数据处理方法研究进展[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(8): 206-214.
- An N, Guan B W, Zhang Y L, et al. Development review of satellite laser ranging data processing technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(8): 206-214.
- [14] 吴志波, 邓华荣, 张海峰, 等. 卫星激光测距系统稳定性分析及提高[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(4): 479-484, 492.
- Wu Z B, Deng H R, Zhang H F, et al. Analysis and improvement on the stability of satellite laser ranging system[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(4): 479-484, 492.
- [15] Schillak S, Lejba P, Michałek P. Analysis of the quality of SLR station coordinates determined from laser ranging to the LARES satellite[J]. Sensors, 2021, 21(3): 737.
- [16] Hilla S. The extended standard product 3 orbit format (SP3-c) [EB/OL]. [2022-11-09]. <https://files.igs.org/pub/data/format/sp3c.txt>.
- [17] Wahr J M. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth[J]. Geophysical Journal International, 1981, 64(3): 677-703.
- [18] Luzum B, Petit G. The IERS Conventions (2010): reference systems and new models[J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2012, 10(H16): 227-228.
- [19] Mendes V B, Pavlis E C. High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(14): L14602.
- [20] ILRS. Monthly global report cards | quarterly global report cards[EB/OL]. [2022-11-09]. https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/system_performance/global_report_cards/monthly/index.html.
- [21] 李荣旺, 李语强. 云南天文台的精密定轨系统[J]. 天文研究与技术, 2010, 7(4): 311-317.
- Li R W, Li Y Q. Precision orbit determination at the Yunnan observatory[J]. Astronomical Research & Technology, 2010, 7(4): 311-317.
- [22] EARTHDATA. EARTHDATA login[EB/OL]. [2022-11-09]. https://cddis.gsfc.nasa.gov/archive/slr/data/npt_crd_v2/.
- [23] ILRS. Product description[EB/OL]. [2022-11-09]. https://ilrs.gsfc.nasa.gov/data_and_products/products/index.html.
- [24] 刘源. 球形卫星高重复频率激光测距数据处理方法研究[D]. 长春: 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 2019: 23-27.
- Liu Y. Research on data processing method of high frequency laser ranging of spherical satellite[D]. Changchun: Changchun Observatory National Astronomical Observatories, 2019: 23-27.
- [25] 范建兴, 杨福民, 陈启秀. 卫星激光测距中激光脉冲波形变化的理论分析及数值计算[J]. 中国科学(A辑), 2001, 31(1): 63-69.
- Fan J X, Yang F M, Chen Q X. Theoretical analysis and numerical calculation of laser pulse waveform change in satellite laser ranging[J]. Science in China (Series A), 2001, 31(1): 63-69.
- [26] Wilkinson M, Rodríguez J, Otsubo T, et al. Implementing consistent clipping in the reduction of SLR data from SGF, Herstmonceux[EB/OL]. [2022-11-09]. https://cddis.nasa.gov/lw21/docs/2018/abstracts/05_abstract_Wilkinson.pdf.
- [27] EARTHDATA. EARTHDATA login[EB/OL]. [2022-11-09]. https://cddis.nasa.gov/archive/slr/cpf_predicts_v2/index.html.
- [28] 李亚博, 王小亚. 中国区域 SLR 测站观测精度分析[J]. 测绘科学, 2022, 47(10): 59-65.
- Li Y B, Wang X Y. Observation accuracy analysis of SLR station in China[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(10): 59-65.