

## 偏振调能技术对 SLR 数据偏差的改善研究

邓华荣, 吴志波, 李 朴, 汤 凯, 张海峰

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 改善激光观测数据偏差对推动毫米级精度卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)技术在全球大地测量观测系统中应用具有重要作用。系统时延标定误差是激光观测数据偏差产生的主要原因, 其中地面靶目标测量与卫星测量时的系统差异, 以及单光子探测中激光回波强度所引起的光子探测时间游动误差是主要因素。以上海天文台 SLR 系统为平台, 对上述两种测量模式下系统时延及激光回波强度差异进行了分析和修正。利用激光偏振特性, 应用半波片-偏振片组合调能技术, 实现两种测量模式下光路的“零差异”切换以及回波强度的实时控制, 有效减少光路不同和探测器时间游动效应, 激光数据偏差改善了 10~20 mm, 达到了国际 SLR 数据质量标准要求。激光偏振技术也可用于高重复率激光测距的激光后向散射规避, 提高激光回波数, 具有很好的应用推广价值。

**关键词:** 卫星激光测距; 地靶校准; 偏振技术; 时间游动; 数据质量

**中图分类号:** P228.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0917005

## Improvement research on SLR data deviation by using polarization technology for energy regulation

Deng Huarong, Wu Zhibo, Li Pu, Tang Kai, Zhang Haifeng

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Improving SLR observation data deviation has an important role in promoting application of millimeter precision satellite laser ranging technology in global geodetic observation system. The error of system time-delay calibration is the main reason of producing SLR observation data deviation. In the affecting factors, the system difference between target measurement and satellite laser ranging and time walk effects of detector for echo intensity in single photon detection are the mainly ones. On the platform of SLR system in Shanghai Astronomical Observatory, the differences of system delay and laser echo intensity in two measurement modes were analyzed and corrected. Laser polarization property was made use of, polarization technology of half wave plate-polarizer combination for energy regulation was applied, and optical path "zero difference" switch and echo intensity of real-time control in two measurement modes were implemented. The technology effectively reduces the light path difference and time walk effects of detector, and data improvement was about 10-20 mm which has met SLR international quality standard. The technology can also be used for backscatter avoidance in high repetition rate laser ranging, improve the echo numbers and have the good value for popularization and application.

**Key words:** satellite laser ranging; target calibration; polarization technology; time walk; data quality

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(11303074, U1631240, 11503068)

作者简介: 邓华荣(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事卫星激光测距方面的研究。Email: dhr@shao.ac.cn

## 0 引言

卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 技术作为目前卫星测距精度最高的技术, 在航天器精密定轨、地球自转参数确定、全球地球参考框架建立和维护以及实现全球范围的高精度激光时间传递等方面得到广泛应用。经过半个多世纪的发展, SLR 数据质量内符精度已发展到亚厘米量级水平, 外符精度也已达数十毫米。然而, 随着近年全球大地测量观测系统 (Global Geodetic Observing System, GGOS) 网络的推动建立, 国际大地测量协会对于 SLR 数据质量提出更高要求: 内符精度需达毫米级、外符精度需达到亚毫米/年水平<sup>[1]</sup>。

SLR 数据质量内符精度取决于系统中各个设备的发展水平, 外符精度(数据偏差)是卫星距离测量值与真实值之间的偏差, 取决于系统延时标定的准确性。目前, SLR 系统普遍采用地靶校准方法, 即通过测量已知距离的地面靶目标进行系统延时标定<sup>[2]</sup>。在地靶校准中, 多数 SLR 站点采用中性吸收片对激光功率进行衰减, 而吸收片的引入增加了光路延时进而造成系统延时标定的不准确性。另一方面, 多数 SLR 系统采用的单光子探测器 (Single Photon Avalanche Diodes, SPAD) 存在时间游动效应, 而地靶校准与卫星测量时 SPAD 接收的回波光子数(回波强度)不同造成系统延时测定的不准确性。

针对上述两种问题, 上海天文台提出采用半波片-偏振片调能装置替代中性吸收片衰减装置, 通过控制半波片的旋转实现卫星测量与地靶校准的光路切换。利用该装置成功改善由于中性吸收片引入的约 20 ps 的光路延时, 对应的数据偏差提高 6 mm。利用该装置连续控制激光输出功率特点获得了不同回波率下的地靶校准值, 成功提取 SPAD 约 100 ps 时间游动效应, 对应的数据偏差改善 15 mm。

## 1 中性吸收片光路延时测量及改善

为最小化大气参数(主要包括温度、湿度以及气压)对数据归算修正的影响, 目前 SLR 站点多采用近地靶目标进行系统延时测定, 而地靶校准时需采用中性吸收片对激光功率进行衰减以防激光

功率过高致使单光子探测器性能下降甚至损坏。中性吸收片的增加引入额外的光路延时使得地靶校准与卫星测量发射光路不一致, 特别是中性吸收片的数目、摆放角度因人而异, 很大程度上造成了系统延时测量值的波动, 直接影响最终数据偏差的大小与波动。

与中性吸收片对激光功率衰减所依据的多光束干涉原理不同, 半波片-偏振片调能装置(偏振调能装置)的理论基础是光波偏振原理。目前, SLR 站点采用的 532 nm 激光(由 1 064 nm 倍频获得)具有良好的线偏振特性<sup>[3]</sup>。如果将一偏振片置于激光光路当中, 理论上经过偏振片后的出射光强, 其中分别为入射光强大小、偏振片与激光偏振方向的夹角<sup>[4]</sup>。考虑到不同激光器偏振方向不尽相同且方便实际的使用与实验, 引入半波片对激光偏振方向进行旋转以配合偏振片的使用, 图 1(a)和(b)分别为卫星测量与地靶校准的原理示意图, 图 1 中可以看出半波片旋转 45°可以实现卫星测量与地靶校准的切换。图 2 则为整个偏振调能装置的实物图, 一对“八字形”放置的偏振片是为了补偿由于偏振片厚度引入的光路偏移。

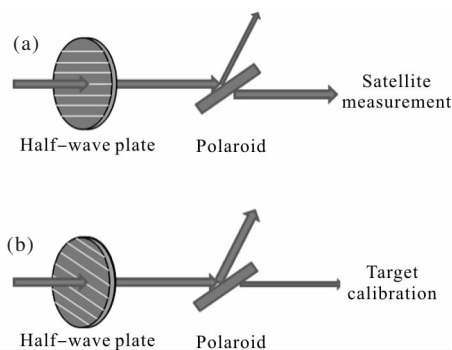


图 1 (a)卫星测量与(b)地靶校准示意图

Fig.1 Diagram of (a) satellite measurement and (b) target calibration

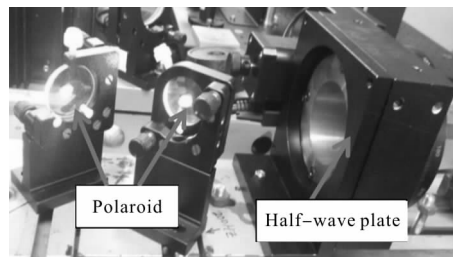


图 2 偏振调能装置实物图

Fig.2 Picture of energy regulation based on polarization technology

为评估中性吸收片对系统延时的影响,上海天文台采用中性吸收片与偏振调能装置相结合的方法,测量得到三片中性吸收片引入的光路延时为 20 ps。测量方法的具体步骤分两步:未加入中性吸收片,仅采用偏振调能装置实现地靶校准,记录地靶测量值  $C_1$ ;加入中性吸收片,通过调整半波片合适的角度使得地靶回波率与上一步地靶校准值时回波率接近(为最小化 SPAD 时间游动效应的影响),记录地靶测量值  $C_2$ ,  $C_2$  与  $C_1$  的差值即为中性吸收片引入的光路延时。表 1 列出了未加入中性吸收片与加入中性吸收片的地靶测量值数据。从表 1 中可以看出,两种状态下得平均回波率均为 13.5%左右,最终得到三片中性吸收片的光路延时为 20 ps。偏振调能装置通过旋转半波片实现地靶校准与卫星测量的“零差异”光路切换,成功改善数据偏差 6 mm。

表 1 中性吸收片光路延时测量数据

Tab.1 Measurement data of optical delay of neutral absorption sheet

Without neutral absorption sheet		With neutral absorption sheet	
Echo rate	Calibration/ps	Echo rate	Calibration/ps
13.58%	160 653	12.51%	160 672
13.05%	160 657	12.17%	160 673
13.89%	160 652	13.06%	160 673
13.59%	160 653	13.39%	160 672
13.41%	160 654	13.98%	160 674
13.29%	160 654	14.61%	160 673
12.42%	160 652	14.83%	160 674
12.36%	160 652	14.07%	160 672
12.89%	160 656	14.28%	160 671
12.57%	160 655	14.71%	160 673
13.58%	160 653	12.51%	160 672
Mean	13.11%	13.76%	160 673

## 2 SPAD 时间游动效应测量及改善

由于量子效率高、工作电压低,SPAD 在卫星激光测距中得到广泛应用。SPAD 对数据偏差的影响主要体现在探测器存在的时间游动效应,即由于入射到探测器的激光脉冲分布不同、渡越时间

不同以及电子学抖动时间不同,探测器响应时间随之不同。影响探测器时间游动效应最重要的是回波光光子数,由参考文献[5]可知,SPAD 在不同回波光光子数下有着不同的响应曲线。多光子情况下,对应的响应曲线较陡,响应时间较短。反之,单光子情况下,响应时间较长。

为评估上海天文台 SLR 系统所使用 SPAD 时间游动效应,采用偏振调能装置,根据半波片旋转角度  $\theta$  激光偏振方向变化  $2\theta$  的原理,实现连续微调激光发射功率,且不改变最终出射激光的偏振方向(始终保持水平偏振方向),有效避免了因为出射激光偏振不同而引入的其它影响。实验最终通过控制半波片的旋转角度得到不同回波强度下的地靶测量值,如图 3 所示。从图 3 可以看出,对于上海 SLR 站所使用的 SPAD,回波率每增加 1%,系统延时则减小约 1 ps,取极端情况,最大会引入 100 ps 的数据偏差。为使数据偏差较小,在实际观测中,地靶校准与卫星测量时的回波率均控制在 10%以内。偏振调能装置成功提取了 SPAD 的时间游动效应,且对此引入的约 15 mm 的数据偏差进行改善。

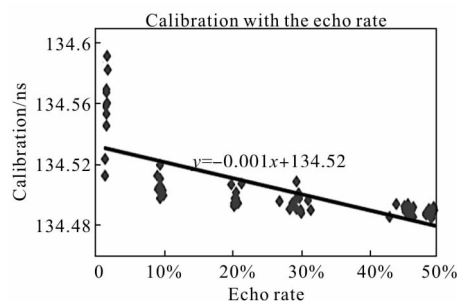


图3 地靶测量值与回波率的关系

Fig.3 Relation between target measurement and the echo rate

## 3 SLR 数据质量改善结果

通过利用偏振调能装置对上述两种问题的改善,上海天文台 SLR 站观测数据质量显著改善,图 4 列出了日本数据分析处理中心对近五年上海天文台 SLR 站数据质量的统计。从图 4 中可以看出,2015 年上海天文台长期稳定性、短期稳定性以及标准点精度分别为 4.1、9.3 和 1 mm;与近四年相比,测距数据质量得到明显改善。而国际 SLR 站的数据质量要求是长期稳定性优于 10 mm、短期稳

定性优于 20 mm 以及标准点精度优于 5 mm, 2015 年度上海天文台数据质量已达到此要求。图 5 对上海天文台 SLR 站数据质量与国际优秀台站进行统计比较, 由图 5 可以看出, 上海天文台数据质量较国际领先 SLR 台站间仍存在差距。数据质量不断提高以及高质量的数据保持是笔者后期的主要任务与目标<sup>[6]</sup>。

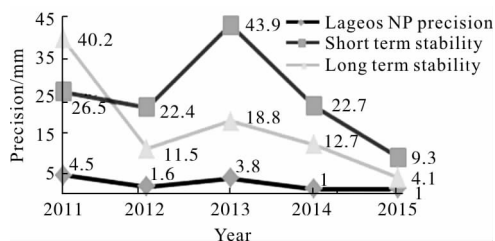


图 4 上海天文台 SLR 站系统数据统计

Fig.4 SLR data statistics of SHAO

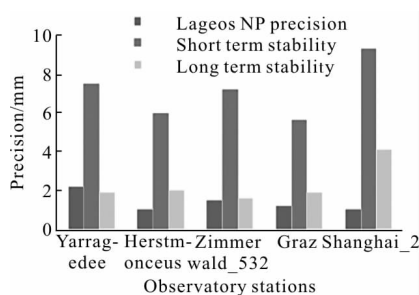


图 5 上海天文台 SLR 站与国际优秀台站的数据质量统计比较

Fig.5 Comparison among SLR data statistics of SHAO

and other good stations in the world

## 4 结论

以上海天文台 SLR 系统为平台, 基于光波偏振特性, 在 SLR 站点中首次提出偏振调能装置。该装置可有效解决多数 SLR 站点存在的中性吸收片光路延时问题以及 SPAD 探测器时间游动问题, 使得观测数据质量明显改善, 达到了国际 SLR 数

据质量标准要求。另外, 对于目前高功率激光器存在的不宜频繁开关的实际问题, 利用偏振调能装置状态的快速切换可有效避免激光后向散射。后续还将利用激光的偏振特性对于 SLR 回波强度的影响进行相关研究。

## 参考文献:

- [1] Chen Junyong, Dang Yamin. Brief introduction of IUGG and IAG 2003 general assembly, Sapporo, Japan [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2003(3): 10-12. (in Chinese)  
陈俊勇, 党亚民. 国际大地测量和地球物理联合会 2003 年日本大会札记[J]. 测绘科学, 2003(3): 10-12.
- [2] Schreiber U. Colloquium on SLR-system calibration issues [C]//Third General Assembly of the International Laser Ranging Service, 1999.
- [3] Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei, et al. Nonlinear Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2007: 453-489. (in Chinese)  
石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007: 453-489.
- [4] Cao Hong, Song Lianke, Peng Handong, et al. The study of the relationship between polarized light's incident azimuth and intermediary reflectance [J]. *Laser Technology*, 2005, 25(1): 104-105. (in Chinese)  
曹鸿, 宋连科, 彭捍东, 等. 线偏振光入射方位角与介质反射率关系研究[J]. 激光技术, 2005, 25(1): 104-105.
- [5] Georg Kirchner, Franz Koidl. Compensation of SPAD time-walk effects [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 1999, 1(2): 163-167.
- [6] International Laser Ranging Service. SLR Global Performance Report Card[OL/EB]. [2016-12-15]. [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/networksystem\\_performance/global\\_report\\_cards/monthly/perf\\_201512\\_wLLR.htm](https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/networksystem_performance/global_report_cards/monthly/perf_201512_wLLR.htm).