

## 卫星激光测距系统稳定性分析及提高

吴志波<sup>1,2\*</sup>, 邓华荣<sup>1</sup>, 张海峰<sup>1,2</sup>, 汤凯<sup>1</sup>, 龙明亮<sup>1</sup>, 王楠<sup>1,3</sup>, 秦思<sup>1</sup>, 张忠萍<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008;

3. 中国科学院大学, 北京 100009)

**摘要:**以典型 SLR 系统为研究平台, 根据测量数据的产生流程, 详细分析了卫星测量与系统校准时的状态差异, 并评估了状态差异对测量数据距离偏差的影响, 引出 SLR 测量数据稳定性提升的途径. 研究成果用于上海天文台 SLR 系统后, 2015 年度对地球动力学卫星(Lageos)观测数据的长期稳定性、短期稳定性和标准点精度分别由改造前的 12.7 mm、22.7 mm 和 2.0 mm 提升到 4.1 mm、9.3 mm 和 1.0 mm, 国内率先达到国际卫星激光测距组织(ILRS)的数据质量标准(10 mm, 20 mm 和 5 mm)并持续保持, 提升了我国在 SLR 领域的国际地位和观测数据权重, 具有良好的推广应用前景.

**关键词:**卫星激光测距; 距离偏差; 长期稳定性; 短期稳定性; 标准点精度

**中图分类号:**P2 **文献标识码:**A

## Analysis and improvement on the stability of satellite laser ranging system

WU Zhi-Bo<sup>1,2\*</sup>, DENG Hua-Rong<sup>1</sup>, ZHANG Hai-Feng<sup>1,2</sup>, TANG Kai<sup>1</sup>, LONG Ming-Liang<sup>1</sup>,  
WANG Nan<sup>1,3</sup>, QIN Si<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-Ping<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100009, China)

**Abstract:** Based on the platform of typical SLR system, according to generation flow of SLR measurement data, extracting the difference between satellite measurement and calibration, measuring and analyzing the influence of various factors due to range bias of SLR measurement data, and technical approaches to improve the stability of SLR measurement data is provided in the paper. After applying the above research results, the long-term stability, short-term stability, and normal points accuracy of Lageos satellite at Shanghai SLR station have been decreased from 12.7 mm, 22.7 mm and 2.0 mm in 2014 to 4.1 mm, 9.3 mm and 1.0 mm in 2015 respectively, which firstly reached the data quality standards of ILRS (10 mm, 20 mm, and 5 mm) in China. These results can also enhance China's international status in the field of SLR and the weight of observational data, with good prospects for promotion and application.

**Key words:** satellite laser ranging, range bias, long-term stability, short-term stability, normal point precision

**PACS:** 95.45.+i; 95.55.Cs; 06.20.Dk

### 引言

SLR 技术通过精确测定激光脉冲从地面观测点

到卫星反射器的往返时间间隔, 从而算出卫星与站点之间的精确距离<sup>[1]</sup>, 目前测距精度达亚厘米或毫米级, 是卫星测量技术中精度最高的一种技术, 在目

收稿日期: 2018-12-07, 修回日期: 2019-05-24

Received date: 2018-12-07, revised date: 2019-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(11503068, U1631240), 博士后创新人才计划 BX201700270; 博士后第 62 批面上基金(2017M621562)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11503068, U1631240), CAS Key Technology Talent Program, China Postdoctoral Science Foundation (BX201700270, 2017M621562)

作者简介 (Biography): 吴志波(1981-), 男, 江西临川人, 高级工程师, 硕士, 主要研究领域为卫星激光测距及应用、空间碎片激光测距等, E-mail: wzb@shao.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wzb@shao.ac.cn

标精密定轨、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,并为载人航天、卫星导航系统及深空探测等国家重大专项的突破提供了不可或缺的高精度测量数据支持. 随着 SLR 技术在作用范围(行星际)和测量精度(毫米)等方面的不断突破,其应用领域得到迅速拓展,数据稳定性的要求与日俱增. 如,整合多种大地测量观测手段及技术方法(SLR, VLBI, GNSS, DORIS)的全球大地测量观测系统(GGOS),其要求 SLR 站点的数据稳定度为  $0.1 \text{ mm/year}^{[2]}$ . 当前大多数 SLR 站点的数据稳定性为厘米水平,尚不能满足 GGOS 的需求,制约了毫米级测量精度 SLR 技术的应用. 国际卫星激光测距组织(ILRS),已经将提升数据稳定性列为 SLR 技术未来重点发展和研究方向之一,也是近年 ILRS 大会的固定主题之一,与此同时,ILRS 也计划将现有的数据稳定性国际标准进一步提高,以适应发展需求.

评价 SLR 数据稳定性,主要依据 Lageos 卫星测量数据的三个指标:距离偏差的长期稳定度(12 个月)、短期稳定度(3 个月)和标准点精度(12 个月),目前的国际标准是要求站点的长期稳定性  $< 10 \text{ mm}$ 、短期稳定性  $< 20 \text{ mm}$  和标准点精度  $< 5 \text{ mm}^{[1]}$ ,纵观全球 50 余家 SLR 台站,可达到此标准的只有十余家,且大多为欧美发达国家台站. 所谓距离偏差是指 SLR 台站对卫星的距离测量值与真实值之间的偏差,真实值是由 ILRS 根据全球各台站提供的测量数据综合而成. SLR 系统较为复杂,涉及光、机、电等学科,因此,可影响数据距离偏差的因素很多. 不仅与各子设备的设置参数有关,还与系统光路、环境温度的变化相联,此外系统延时校准是否准确极大影响了系统的稳定性.

国外 SLR 站点从核心设备探测器和计数器等方面入手,在 SLR 系统的数据稳定性方面取得一定进展. 英国 Herstmonceux 天文台在 90 年代提出单光子测距的概念,通过控制回波率,使得探测器接收到的信号始终保持单光子水平,减小了探测器的时间游动,使系统延时波动较小<sup>[3]</sup>. 时间间隔计时器 SR620 作为记录来回时间的设备在测量频率较低的台站被广泛使用,但是存在一定的非线性度,2001 年,英国站首先调研了其非线性度,结果表明其引起的测距误差最大可达  $10 \text{ mm}$ . 而今,为适应高重复率(kHz)SLR,大多数台站已采用更高精度的事件计时器来代替,其记录信号到达的时刻而非时间间隔,从原理上改善了非线性误差等不利因素,大大提高了

时间间隔测量的准确性<sup>[4]</sup>. 90 年代后期,奥地利 Graz 站通过在探测器中加入时间游动补偿电路,成功压缩了时间游动( $200 \sim 300 \text{ ps}$ )至  $20 \text{ ps}$  以内,带补偿电路的探测器(C-SPAD)目前被广泛使用. 此外,卫星上不同平面角反射器反射回波有先后之分,最前面的角反射器回波最早,两边的反射器回波较晚,不同的反射回波混叠在一起,导致回波波形的展宽和畸变,影响了测距精度和稳定性. Graz 站在 2010 年对此现象开展了研究,并在数据处理时选择第一块反射器(最前面)的回波数据,有效的减小了混叠效应<sup>[5]</sup>,提高了 Lageos、Ajisai 等球形卫星的测量数据精度和稳定性. 我国 SLR 技术也得到迅速发展,近几年,通过高重频激光器、高精度时间计时器和带游动补偿单光子探测器等核心设备更新,国内多数台站已完成低重频( $< 10 \text{ Hz}$ )到高重频(kHz)激光测距系统改造,测距精度由厘米提高到毫米级,作用距离达同步轨道卫星,系统数据的稳定性也相应提高到厘米量级,并有进一步提升的潜力. 国外台站虽然在 SLR 数据稳定性取得一定进展,但仍缺乏较为全面的分析和研究,而国内在此方面研究相对滞后,可借鉴和参考资料较为有限. 为充分发挥 SLR 技术优势,满足日益增长的毫米级稳定性科学应用需求,开展 SLR 测量数据稳定性提高研究十分必要.

本文以上海天文台 SLR 系统为平台,根据测量数据获取流程,从系统延时标校与卫星测量上的差异(包括电学、光学、环境等)出发,较为全面地分析测量了 SLR 台站数据稳定性的影响因素,并据此提出数据稳定性提高的技术途径. 研究成果成功应用于上海天文台 SLR 系统,使其长期稳定性、短期稳定性以及 Lageos 卫星标准点精度分别由 2014 年的  $12.7 \text{ mm}$ 、 $22.7 \text{ mm}$ 、 $2.0 \text{ mm}$  提升到 2015 年度的  $4.1 \text{ mm}$ 、 $9.3 \text{ mm}$  和  $1 \text{ mm}$ ,在国内率先达到 ILRS 数据稳定性的国际标准( $10 \text{ mm}$ 、 $20 \text{ mm}$  和  $5 \text{ mm}$ )并持续保持,提升了我国 SLR 技术在国际激光测距领域的地位,也更有助于为国家重大专项任务提供高精度测量数据.

## 1 稳定性影响因素分析

典型的 SLR 系统由激光器与发射系统、望远镜与跟踪机架、光子接收与精密计时、测距控制、卫星预报与数据预处理等系统组成. 各组成部分需在激光测距控制统一协调下有序协同开展工作,密不可分,以完成对卫星台站预报、精密跟踪、激光发射瞄

准、回波信号探测接收、数据采集显示存储及预处理等工作. 上海台 SLR 系统的组成框图如图 1 所示, 性能指标见表 1.

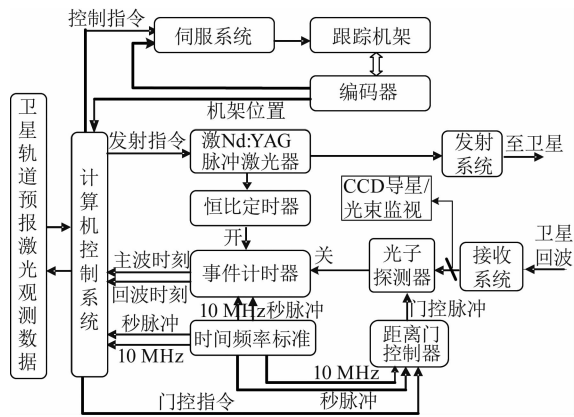


图 1 上海天文台卫星激光测距系统框图

Fig. 1 System block diagram of the SLR system in Shanghai station

表 1 卫星激光测距系统性能指标

Table 1 Parameters of the SLR system in Shanghai station

项目	参数	
激光器	能量 & 频率	0.7 ~ 1 mJ@1kHz;
	脉宽	15 ~ 25 ps;
	波长	532 nm;
	光束质量	M2 < 1.2;
	指向抖动	< 10 "
望远镜	跟踪机架:	El-Az;
	接收口径:	60 cm, R-C mode;
	发射口径:	21 cm, refractor;
	指向精度:	5" (after star calibration);
	跟踪精度:	< 1"
接收终端	探测器:	C-SPAD, 单光子, 20% @ 532nm, 25ps;
	滤光片:	带宽 1.5A, 中心透过率 40%;
	视场:	40" ~ 400"
计时系统	事件计时器	A033
	计时分辨率:	1 ps
	计时精度:	3 ~ 5 ps

SLR 技术主要在于获得激光往返时间, 乘上光速的一半即可获得卫星与地面站之间的精确距离, 因此可从 SLR 数据的产生流程出发, 分析 SLR 系统数据稳定性的各影响因素. 激光测距的原始测量值包含了系统延时, 提取实际距离信息前需扣除系统延时. 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静态靶目标进行系统延时标定<sup>[6]</sup>. 由于和测星分时进行, 存在光学、环境温度等不同, 因此标定的系统延时不能完全准确反映卫星测量时的系统延时, 这会产生距离偏差, 进而影响系统稳定性. 如图 2 所示, 激光器发出的光束中小部分进入

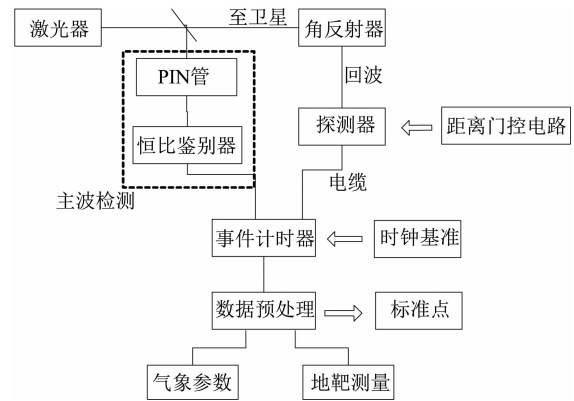


图 2 SLR 数据产生流程图

Fig. 2 Flow chart of the SLR data generation

PIN 管, 转化为电信号, 由恒比鉴别器比例触发后, 进入事件计时器 A 通道; 而大部分出射激光在到达卫星后, 由安装在卫星表面的角发射器反射回地面站, 被单光子探测器接收, 转化为电信号, 经由同轴电缆进入事件计时器 B 通道. 控制软件采集事件计时器 A、B 通道数据, 获取激光的往返飞行时间, 再转化成卫星与地面站之间的距离. 经数据预处理操作, 剔除野值, 完成大气延时和系统延时修正, 生成标准点数据, 上传给国际激光测距网或用户. 此外, 距离门控电路可以使探测器在回波到达之前的瞬间开启, 从而大幅减小背景噪声干扰.

从 SLR 数据产生流程图可看出, 影响系统数据稳定性的因素主要可以分为两类. 一类是卫星激光测距时的测量误差, 这包括主波探测误差、回波探测误差、计时误差等, 这些误差与对应探测设备的精度有关, 目前上述设备均使用国际上性能较为领先的器件, 在 SLR 台站广泛使用, 综合测量误差不超过 25 ~ 30 ps, 对数据稳定性的影响低于 4 mm. 此外, 不同位置分布的反射器也会引起距离偏差至 10 mm 以上, 文献[5]给出解决方法. 另一类误差就是 SLR 数据预处理时延时修正的不准确, 这包括大气延时误差、系统延时误差等. 大气延时模型采用经典的 Marini-Murray 模型, 其误差在仰角为 20° 以上时为毫米, 对数据稳定性影响较小, 为 1 ~ 2 mm. 对于系统延时测量, 大多数站点均为非实时, 普遍采用定时 (半小时) 测量已知距离的静态地面靶目标进行标定, 这使得与动态的卫星激光测距之间存在温度、回波强度、门控提前量、量程、光程、电缆扭曲等差异, 造成地靶测量值不能真实反映卫星激光测距时的系统延时, 从而使得预处理后的 SLR 测量数据会有距离偏差, 这是目前影响 SLR 系统数据稳定性最复杂

的因素。

本文将基于卫星测量和地靶测量时的状态差异分析,测量不同环境温度、回波强度、距离门控等条件下的系统延时变化情况,研究其对距离偏差的影响,进而给出 SLR 系统数据稳定性提高的方法。

## 2 稳定性影响因素测量

### 2.1 环境温度影响

在卫星激光测距中,地靶测量和卫星测量一般交替进行,使得地靶测量和卫星测量时存在一定的温差,引起测量数据距离偏差。影响主要表现两方面,一是设备预热时间长短影响设备延时的稳定,二是环境温度变化造成设备延时改变。

作为一种光学手段,SLR 只能在晴天工作,使用观测不具有连续性。为提高系统设备的使用效率,一般情况下,主要设备仅在观测前才开启预热,如预热不充分,系统稳定性将受到很大影响。为此,对上海台 SLR 站的激光器、恒比鉴别器、计时器、光子探测器等核心设备进行了预热时间测试。测试方法:在所有设备充分预热的情况下,关闭待测设备一段时间,然后再次启动,进行地靶测量,记录地靶值随预热时间的变化情况。经测试,上海 SLR 站激光器、事件计时器以及探测器等设备的预热时间均在 10 min 以内,而恒比鉴别器的预热时间则达 1 h 以上,如图 3 所示。可以看出,预热不充分可能导致多达 30 mm (200 ps) 的系统偏差。因此,开展卫星测量前,恒比鉴别器应提前 1.5 h 开启,其他设备也需 20 min 以上的预热时间。

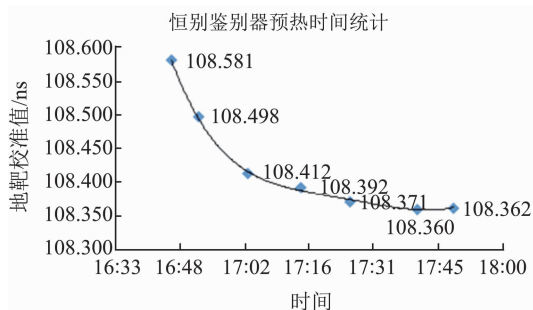


图3 地靶测量值随预热时间的变化  
Fig. 3 Value of calibration varied with warm-up time

根据温度实测,对于开放式圆顶下开展激光测距,特别是白天,地靶测量和卫星测量时环境温度变化可超过一度,环境温度引起的设备延时变化必须考虑,主要包括探测器、计时器和同轴电缆等。

对于优质电缆,其温度漂移大概为 5 ps@100 m

@1 k,而普通同轴电缆为 500 ps@100 m@1 k<sup>[7-8]</sup>,相差了近一百倍,考虑回波信号经过的电缆有近二十米,这有可能会引入几十皮秒的系统偏差。对上海台的 SYV 同轴电缆进行了温度漂移测试,图 4 为一根长度为 11 m 同轴电缆从 -28 °C 到 22 °C 的延时变化,可以看出,温度漂移率约为 -50 ps@100 m@1 k,对于 20 m 的回波电缆,温差为 1 °C 会引起 3 mm (10 ps) 的距离偏差。对于探测器 C-SPAD,温度特性为 -0.6 mm/°C,综合下来,1 °C 温差引起的距离偏差约为 3.6 mm。为此,可采用更稳定的回波电缆,探测器和计时器等关键设备放置于恒温环境,这些手段将有助于减小温度对系统稳定性的影响;此外,减少地靶测量间隔,也可一定程度上使测地靶和测卫星时温度接近,进而维持系统延时稳定。

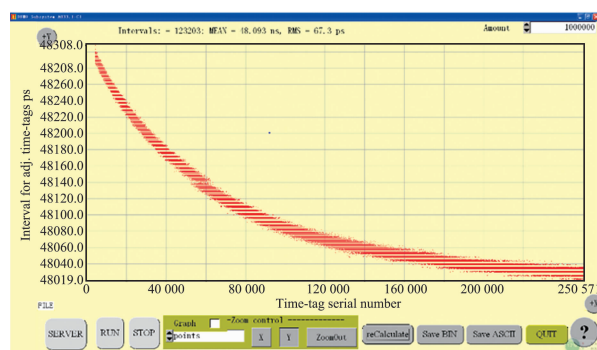


图4 同轴电缆延时随环境温度变化  
Fig. 4 Delay time of the coaxial cable varied with temperature

### 2.2 回波强度因素

SLR 中,测量不同距离的卫星,回波强度变化很大,从亚光子到数千光子不等。而地靶测量,由于距离近且不变,为避免强光损坏探测器,出射激光一般进行了衰减,这样回波强度一般固定且不会太大。这造成了测星和测地靶上回波强度有差异,引起探测器时间游动,进而影响系统稳定性。

由于量子效率高、工作电压低,SPAD (Single Photon Avalanche Diodes) 探测器在卫星激光测距中得到广泛应用。SPAD 对系统误差的影响主要体现在多数探测器存在时间游动效应,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。当然,卫星角反射器阵列对激光脉冲的展宽分布会影响回波信号探测的精确时刻,同时也会造成电子学器件响应时间存在一定波动。但是,影响探测器时间游动效应最重要的是回波光光子数,由图 5 可以看出,SPAD 在不同回波光光子数(回波强度)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.

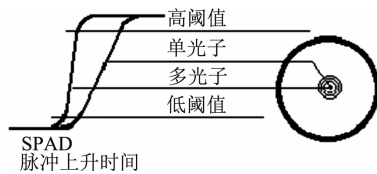


图5 在不同光子数情况下, SPAD 响应时间示意图

Fig. 5 Respond time of SPAD varied with different return photons

虽然现有的 C-SPAD 已经集成了时间游动补偿功能, 但实际使用过程中, 由于不同距离卫星的回波强度相差甚大, 时间游动仍不可忽略. 基于图 3 所示的地靶测量系统, 应用偏振调能装置连续控制发射激光功率, 得到不同回波率下的地靶测量值, 如图 6 所示. 可以看出, 对于上海 SLR 站, 回波率增加 1%, 系统延时减小 1 ps, 若取极端情况, 最大会引入 100 ps 的系统误差(约 15 mm). 根据文献[6]中指出, 回波率 10% ~ 15% 的情况下, 地靶校准值基本不变可近似认为是单光子量级的. 因此, 为使系统数据稳定, 可使卫星测距和地靶测量的回波率相当, 或者测距和测地靶的回波率均控制在 10% ~ 15% 左右.

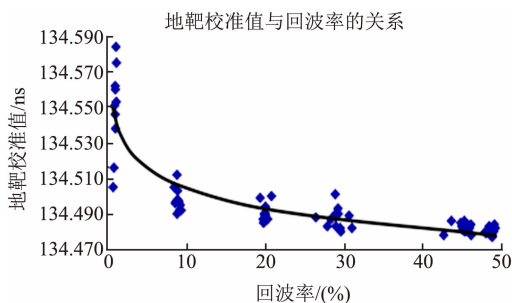


图6 地靶校准值与回波率的关系

Fig. 6 Calibration value varied with return rate

### 2.2.1 距离门控提前量

距离门控技术是各 SLR 站普遍采用的时间滤波技术, 即根据回波信号的到达时刻精确控制使探测器开始工作, 从而有效降低噪声干扰. 然而, 由于探测器对门控信号的响应需要一定时间稳定, 因此过小的距离门控提前量将会导致探测器对信号的测量不准确; 同时, 过大的距离门控提前量会降低信噪比, 特别是在白天卫星激光测距过程中, 过大的距离门控提前量可能会造成测距困难甚至失败. 因此, 距离门控提前量设置不恰当也会影响探测器响应时间,

造成系统稳定性下降.

基于地靶测量, 通过改变距离门控提前量, 获得了不同距离门控提前量下的系统延时变化, 如图 7 所示. 可以看出, 随着距离门控提前量的增加, 地靶校准值先降低后趋于稳定. 当距离门控提前量大于 80 ns 时, 地靶校准值基本稳定在 10 ps 以内. 如距离门控提前量设置太小, 最大引入 400 ps 左右的系统误差(约 60 mm). 因此, 为最小化由于距离门控提前量造成系统误差的影响, 无论是测星还是测地靶, 探测器的距离门控提前量须保持在 70 ~ 80 ns 以上.

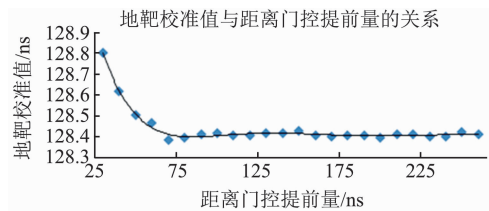


图7 系统延时随距离门控提前量的变化

Fig. 7 System delay varied with range-gate value

## 2.3 其他影响因素

### 2.3.1 电缆扭曲

回波探测器位于望远镜上的接收终端箱, 光电转换后, 电信号经近 20 m 同轴电缆下载到事件计时器. 测地靶时, 望远镜和电缆的位置是固定的; 然而测星时, 望远镜随着卫星位置变化而转动, 电缆位置和扭曲程度不断变化, 因此, 地靶测量值不能真实反映测星时的电缆延时变化. 对回波信号的同轴电缆进行延时测试, 结果如表 2 所示, 可以看出, 望远镜处于不同位置, 因电缆扭曲造成的电信号传输延时变化也高达 53 ps (7 mm). 对于此类影响, 可使用柔性的高稳相同轴电缆, 以减少扭曲延时.

表2 电缆扭曲延时变化

Table 2 Delay time of coaxial cable varied with angle of twist

望远镜位置(度)	位 089, 高度 04	位 090, 高度 42	位 147, 高度 46	位 231, 高度 63	位 260, 高度 18	位 355, 高度 23
电缆延时(ps)	129 091	129 082	129 076	129 122	129 129	129 101

### 2.3.2 光程差异

由于测地靶时目标距离非常近, 回波比较强, 为了防止损坏探测器等设备, SLR 站普遍在发射光路中加入一些衰减片. 而测星时, 为了获得尽量高的回波信号, 需要去掉这些衰减片. 这就使得地靶测量时比测星时多引入了衰减片的延时. 文献[13]对额外的延时进行了精确测量 20 ps, SLR 数据预处理时必

须扣除或采用偏振调能装置进行“零差异”切换。

此外,由于激光划圈的原因,测星和测地靶激光所经过的光程不完全相同,根据测量,最大可到 30 ps. 为尽量保持发射和返回光路的一致,需在 SLR 系统的接收光路中使用小孔进行限制,并使发射光路划圈尽量小。

### 2.3.3 计时器及频标

对于地靶测量,计时器记录的时间间隔一般为百纳秒,但对于卫星测量,时间间隔则为数毫秒到数百毫秒不等. 计时器存在非线性误差,测量不同的时间间隔测量其准确度是不同,影响着系统稳定性。

早期使用的 SR620 非线性误差达 50 ps 以上,而目前上海台 SLR 系统中使用了拉脱维亚生产的 A033 事件计时器,其广泛应用于 SLR 台站,是市面性价比最高的、具有皮秒测量精度的事件计时器,其的非线性误差小于 0.5 ps<sup>[11]</sup>,因此,采用该计时器的 SLR 站可以忽略此项影响。

另外,外部频标的频率准确度也影响着计时器的准确度,对于 300 ms 的卫星距离,频率准确度 < 1E-11 即可满足 3 ps (1 mm) 的测量误差需求,目前绝大多数 SLR 站的 GPS 接收机均可满足此条件<sup>[12]</sup>。

## 3 稳定性改善结果

根据上述分析和测量结果,对上海台 SLR 系统采取多种稳定性提高措施,包括计时器、恒比鉴别器等计时设备放于恒温房,设备提前 2 小时预热,使用柔性低温飘电缆,距离门控提前量保持 80 ns 以上,划圈尽量小以及选取第一个反射器回波信号等. 经过近一年的运行测试,上海 SLR 站观测数据质量显著改善. 图 8 列出了日本数据分析处理中心对近年上海 SLR 站数据稳定性的统计,可以看出,2013、2014 年上海台系统稳定性均没有达到 ILRS 标准,采取措施后,2015 年 SLR 数据的长期稳定性、短期稳定性以及标准点精度分别为 4.1 mm、9.3 mm 和 1 mm<sup>[14]</sup>,成为国内首个满足 ILRS 数据质量国际标准的台站,并在 2016、2017、2018 年持续保持。

## 4 结论

综上所述,由于卫星测量与系统延时校准(地靶测量)时存在状态差异,如距离门控提前量(60 mm)、环境温度(30 mm)、回波强度(15 mm)、光路延时(7 mm)等,导致了 SLR 系统偏差较大且不稳定. 文中对这些因素进行了测量分析,并提出了对应

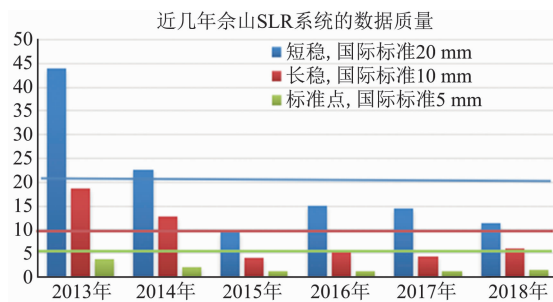


图8 上海 SLR 系统稳定性指标统计

Fig. 8 Statistics of stability index of SLR system in Shanghai station

解决方案. 成果应用于上海台 SLR 系统,使其成为国内第一个突破 ILRS 数据质量标准的站点。

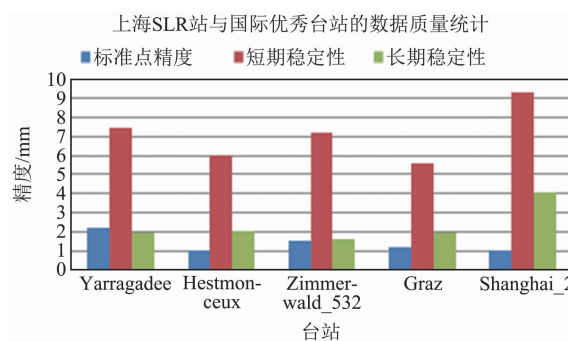


图9 上海 SLR 站与国际优秀台站的数据质量统计比较

Fig. 9 Performance comparison of Shanghai station and most excellent stations in the world

图9 将上海 SLR 站数据质量与国际其它领先台站进行统计比较,可以看出,上海天文台数据质量较国际先进 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我们后期的主要任务与目标,根据前述分析,下一步可能采取的手段包括,探测器恒温、电缆延时实时校正,卫星测距与地靶测量同时进行等。

### 致谢:

本项目工作开展中得到观测人员石海龙以及徐慧超的大力帮助,并得到科工局空间碎片专项项目的资助,在此表示感谢。

### References

- [1] [EB/OL]. <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/about/index.html>
- [2] Gross R S. The contribution of laser ranging to the global geodetic observing system[C]. *Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*, Poznan, Poland, 2008.
- [3] Applyby G, Gibbs P. Energy dependent range biases for single-photon-detection systems[C]. *Proceedings of annual eurolas meeting*, Munich, Germany. 1995:51-59.

(下转第 492 页)