

基于光纤时间频率传递的多望远镜激光测距 时间同步研究

张海峰^{1,2*}, 邓华荣¹, 龙明亮¹, 程志恩¹, 张忠萍^{1,2}, 赵罡¹, 王家亮³

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中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 多台望远镜同时进行信号接收可有效增加激光回波数,提升目标激光信号探测能力。多望远镜接收测量系统间的时间同步精度,直接影响测量数据误差。为此,提出了光纤时间频率传递在多望远镜测量系统中的时间频率同步方法,并测试了光纤时间频率传递系统的装置性能,其时间同步精度达 62 ps,变化率每天约为 4 ps,满足卫星激光测量要求。基于双望远镜信号接收激光测距系统及光纤时间频率传递装置,开展了单望远镜激光发射、双望远镜信号接收的卫星激光观测实验。与卫星精密轨道相比,双望远镜联合获得的卫星距离测量外符误差小于 6 cm,可应用于卫星精密定轨。实验结果验证了光纤时间频率传递方法在多望远镜信号接收激光测距应用中的可行性。

关键词 测量; 卫星激光测距; 多望远镜测距; 时间同步; 光纤时间频率传递; 卫星观测实验

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.011204

Time Synchronization in Laser Ranging with Multi-Receiving Telescopes Based on Fiber-Time-Frequency Transfer

Zhang Haifeng^{1,2*}, Deng Huarong¹, Long Mingliang¹, Cheng Zhien¹,
Zhang Zhongping^{1,2}, Zhao Gang¹, Wang Jialiang³

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

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

³Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The number of laser echoes can be obviously increased with multi-receiving telescopes to simultaneously receive signals, and the detection ability of target laser signals can be enhanced. However, the precision of time and frequency synchronization directly influences the errors of laser ranging data by means of multi-receiving telescopes. Thus the time and frequency synchronization method for the laser ranging system with multi-receiving telescopes is described based on fiber-time-frequency transfer. The performance of a fiber-time-frequency transfer device is tested and the results show that its time synchronization precision is 62 ps and the linear slope is 4 ps a day, which meet the requirements of laser ranging to satellites. The experiments of laser ranging to satellites are performed with single-transmitting telescope and dual-receiving telescopes based on the laser ranging system with dual-receiving telescopes and the fiber-time-frequency transfer device. Compared with that of the precise orbits of satellites, the error of ranging data derived from the dual-receiving telescopes is less than 6 cm, indicating that it can be used for the precise orbit determination of satellites. Moreover, the experimental results confirm the application feasibility of the fiber-time-frequency transfer method in laser ranging with multi-receiving telescopes.

Key words measurement; satellite laser ranging; multi-telescope ranging; time synchronization; fiber-time-frequency transfer; satellite observation experiments

OCIS codes 120.1880; 120.3930; 120.6085; 280.3400

收稿日期: 2018-06-07; 修回日期: 2018-07-07; 录用日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(U1631240,11503068)

* E-mail: hfzhang@shao.ac.cn;

1 引言

激光信号具有波束窄、方向性好、抗干扰强等特点,拥有大气传播时延影响小、测量精度高等优势,已成为高精度空间目标测量的重要手段。最典型的应用就是卫星激光测距(SLR),通过记录激光发射时刻和接收时刻获得卫星精确距离信息。对于带有激光反射器合作目标,单次精度达毫米级,已在卫星精密定轨、建立和维护全球地球参考框架,以及实现全球范围的高精度时间传递、广域相对论研究等方面获得了广泛应用^[1-5]。技术的发展也促使激光测距技术应用领域得到扩展,测量范围已从数百至数万千米的卫星发展到月球甚至行星际,测量目标类型从传统带反射器合作目标(镜面反射)拓展到仅有非合作目标(表面漫反射),包括失效卫星、航天器残骸、火箭体,及其解体碎片等^[6-7]。

漫反射激光测距技术主要特点是激光回波信号微弱,小尺寸目标漫反射回波信号强度极低,使得提升对激光回波信号接收探测能力成为该技术发展的重点。从激光测距雷达方程可知,地面激光测距系统对激光回波信号接收能力与望远镜接收面积成正比,采用大口径望远镜接收将十分有利于微弱激光回波信号探测。但对于光学望远镜,接收口径提升需要大口径光学镜磨制技术、大规模支承结构,以及驱动装置的支撑,实现难度较大,望远镜接收口径增加必将受到限制,且大口径望远镜系统运行复杂、维护难度大、快速响应能力不足,限制了大口径望远镜系统灵活应用。

从空间目标返回的激光信号在到达地面站时可覆盖一定区域,单台望远镜接收口径越大,接收的信号覆盖范围越广,其探测的回波光子数越多。在激光束所覆盖区域内设置多台望远镜,同时进行激光回波信号接收探测和计时,则可增加单位时间内激光回波数,等效实现单台大口径望远镜对激光回波信号的接收能力。Vilnrotter等^[8]开展了 N 个等小口径光学望远镜组阵研究,可实现相当于小口径望远镜口径 \sqrt{N} 倍望远镜接收效果,并进行了相关实验。张忠萍等^[9]基于双望远镜系统进行了空间目标激光测距实验研究,验证了多望远镜阵列接收的可行性和优势。

根据卫星激光测距原理^[1],激光测距误差与激光发射、接收时刻记录精度直接相关。在单台望远镜的激光测距系统中,激光回波时刻和发射时刻均由一台计时器完成,激光发射时刻和接收时刻记录误差相

同,故时间同步精度不引入距离误差。但对于多望远镜回波信号接收,当各自测量系统采用独立的精密计时系统时,即激光发射时刻和接收时刻由不同计时器和时间频率基准进行记录,则测量系统间的时间同步精度会直接影响卫星距离测量误差。

对于两地或多地时间同步,已发展的技术有:近距离的地面线缆双向比对方法、远距离的地面光纤传输方法、卫星双向时间比对方法等^[10-12]。多望远镜测量系统中,由于望远镜系统间的距离可从数十米到百米及千米级。为满足系统应用需求,本文在上海天文台60 cm和1.56 m口径双望远镜系统(相距约60 cm)建立光纤时间频率传递链路实验系统,将60 cm口径望远镜系统的10 MHz和秒脉冲(1 PPS)信号传输到1.56 m口径望远镜系统,作为测量系统的时间频率基准,实现双望远镜测量系统时间频率信号同步与同源。通过1.56 m/60 cm双望远镜系统对具有精密轨道的合作目标进行测量实验,并对1.56 m口径望远镜观测数据进行处理,与卫星精密轨道比较,检验双望远镜时间同步后的观测数据外符误差,验证光纤时间频率传递在多望远镜测量卫星测距中的性能。

2 光纤时间频率传递的时间同步方法

2.1 光纤时间频率传递原理

本文光纤时间频率传递设备采用了密集波分复用技术,实现原理如图1所示^[13],分为本地端设备[图1(a)]和远端设备[图1(b)]。在单根光纤中采用双向传递1 GHz正弦信号(由本地端10 MHz正弦信号倍频100倍而得到),并通过本地端1 GHz信号与远端回传的1 GHz信号之间的相位变化调节光纤传输链路的时延,以实时补偿温度等环境因素对链路传输时延的影响,从而稳定信号传输链路时延。同时对本地端1 PPS信号进行调制,其调制光信号与1 GHz信号的调制光信号在同一根光纤中传输,故1 PPS信号的传输链路时延相对稳定,进而实现1 PPS时间信号和10 MHz频率信号的稳定传输。对于1 PPS时间信号,可在远端接入延时发生器,设置补偿固定传输时延,进而实现本地端和远端的1 PPS时间同步。

本地端设备将输入的10 MHz正弦信号通过倍频器倍频到1 GHz,并对激光器进行调制产生调制光信号。同时,将输入的1 PPS信号,亦通过对激光器进行调制产生调制光信号。两种调制的光信号由光纤耦合器耦合到同一根光纤。经过环形器、机械

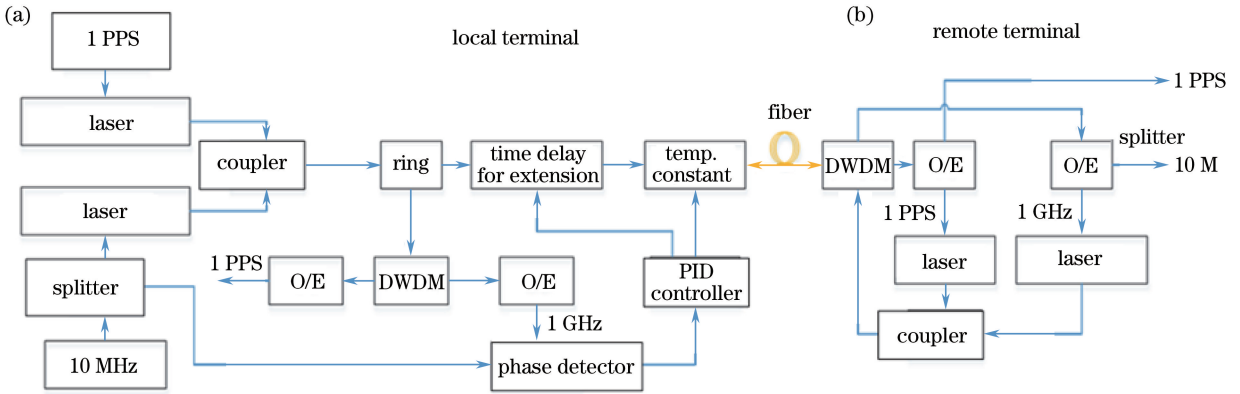


图 1 光纤时间传递设备原理框图

Fig. 1 Block diagram of fiber-time-frequency transfer device

拉伸光纤延时线、温度光纤延时线输入到连接远端设备的光纤传输链路。

另外,本地端设备还通过将本地 1 GHz 信号和远端回传 1 GHz 信号输入到模拟鉴相器进行比对处理,经过比例积分微分(PID)控制器滤波输出的电信号来控制机械拉伸光延时线和温控延时线,实现对传输链路的补偿,进而保证光纤传输链路时延的稳定性。对于远端设备,亦通过采用密集波分复用器(DWDM)复分解出 1 GHz 和 1 PPS 调制的光信号,并通过光电转换器转换为 1 GHz 和 1 PPS 信号。通过倍频器将 1 GHz 信号降频为 10 MHz 信号,并将其作为远端设备系统的时间频率基准。

为实现在本地设备端对远端信号性能的检测,在远端信号复原过程中,还将 1 GHz 和 1 PPS 信号分别调制两台激光器产生两路光信号,由耦合器耦合到光纤链路回传给本地端设备。本地端设备亦采用密集波分复用器(DWDM)复分解出回传的 1 GHz 和 1 PPS 调制的光信号,通过光电转换器获得 1 GHz 或 10 MHz 和 1 PPS 信号。

2.2 光纤时间传递装置性能测试分析

根据图 1 的原理框图,本地端设备可接收从远端返回的信号,通过时间间隔计数器(SR620)记录本地端信号和远端返回的信号间隔,并进行统计分析检验光纤传输链路稳定性,进而评估本地端和远端的时间同步性能。图 2 给出了本地端秒信号和远端返回的秒信号之间的间隔变化,测试时间长度近 20 d。

由图 2 可知,在近 20 d 的测试时间内,本地端秒信号与远端返回的秒信号时间间隔平均变化率约为 4.3 ps/d,时间间隔抖动精度(RMS)为 68.9 ps,扣除 SR620 时间计数器计时精度约 30 ps,则时间频率传递系统时间同步精度为 62 ps。限于本文中

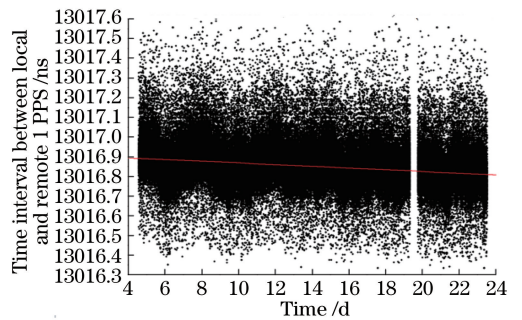


图 2 光纤时间传递装置链路时间同步精度测试(1PPS 信号)

Fig. 2 Accuracy test of time synchronization between local and remote terminals in fiber-time-frequency transfer device (1PPS signal)

时间频率传递装置中所采用的激光器稳定性,以及内部探测器带宽,尚未达到目前已有的光纤链路时间频率所达到的时间频率传递性能^[14-16]:传递 80 km 的天稳定度达到了 5×10^{-19} , 50 km 的时间同步精度达 1.6 ps。

对于本文光纤时间频率传递装置,其采用 PID 控制器,并对机械拉伸光延时线和温控延时线进行有效控制,实现了对光纤传输链路的补偿,可满足多望远镜信号接收测量系统对卫星厘米级精度激光测量要求。

3 双望远镜系统卫星测量及分析

3.1 双望远镜激光测量系统

中国科学院上海天文台佘山观测站拥有相距约 60 m 的两台光学望远镜,其中一台接收口径为 60 cm,专用于卫星激光测距^[17],另外一台接收口径为 1.56 m,用于天体测量和目标观测^[18]。为了验证多望远镜激光接收在空间目标激光测距的可行性,

利用上述两台光学望远镜系统组建了单望远镜激光发射、多望远镜信号接收测量实验系统。

对于合作目标,经卫星激光反射器反射到地面的光斑直径为几十米到千米不等;对于非合作目标,返回的光斑覆盖范围则更大^[9]。因此,上述两台光

学望远镜可同时接收空间目标激光回波信号,为开展多望远镜激光信号测量实验提供了良好平台。表1给出了1.56 m口径望远镜和60 cm口径望远镜系统的主要参数。

表1 1.56 m和60 cm口径望远镜系统的主要参数
Table 1 Specifications of 1.56 m and 60 cm optical telescopes

| Item | 1.56 m telescope | 60 cm telescope |
|---|------------------|-------------------|
| Receiving telescope | R-C system | R-C system |
| Tracking mount | Equatorial | Altazimuth |
| Focus length /m | 15.6 | 5.2 |
| Diameter of secondary mirror /m | 0.5 | 0.2 |
| Efficiency of receiving optical system(@532 nm) /% | 50 | 60 |
| Efficiency of laser detector(@532 nm) /% | C-SPAD,20 | C-SPAD,20 |
| FOV of detection /(") | 45 | 135 |
| Tracking precision (RMS) /(") | 2 | 1 |
| Timing system | A033 event timer | A033 event timer |
| Time and frequency source | End run | Symmetricom @ XLi |
| Efficiency of laser transmitting system(@532 nm) /% | none | 65 |
| Laser system(@1 kHz) /W | none | 1 |
| Diameter of laser transmitting telescope /cm | none | 21 |
| Divergence of laser signal /(") | none | 8-10 |

上述双望远镜测量系统中,如采用独立的全球定位系统(GPS)时间频率系统,时间同步误差在数十纳秒量级,不能满足高精度卫星测距要求。为实现双望远镜测量系统时间同步,则在双望远镜测量系统间搭建了光纤时间频率传递系统,如图3所示,图3(a)为远端信号接收终端设备(放置在1.56 m望远镜系统),图3(b)为本地信号发射

终端设备(放置在60 cm望远镜系统)。本地端设备接入60 cm望远镜系统 Symmetricom@XLi GPS钟所产生的10 MHz和1 PPS信号。经过信号处理及光纤链路传输到1.56 m望远镜系统,由远端设备进行处理和复原,输出10 MHz和1 PPS信号作为远端测量系统的时间频率基准,进而实现两地精确时间同步。

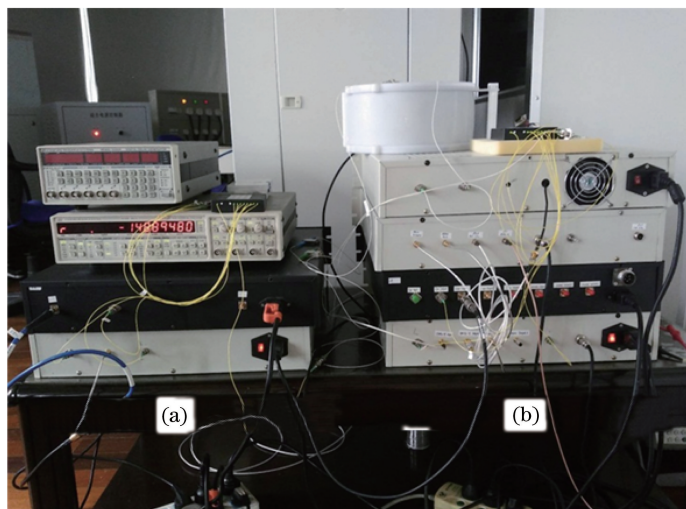


图3 光纤时间频率传递装置。(a)远端信号接收端;(b)本地信号发射端

Fig. 3 Fiber-time-frequency transfer device. (a) Remote signal receiving terminal; (b) local signal transmitting terminal

由于光纤传输链路存在传输延时和设备延时,使得 60 cm 望远镜系统产生的 1 PPS 信号到达 1.56 m 望远镜系统后存在固定时延量。此时时延量可通过测量远端设备所返回的秒信号与本地秒信号的时间间隔,再扣除本地端和远端设备时延,即可得到传输链路时延量。

3.2 双望远镜测量系统地面靶目标激光测量结果

在 1.56 m 望远镜上安装了固定靶目标,如图 4(a)所示,60 cm 望远镜系统向靶目标发射激

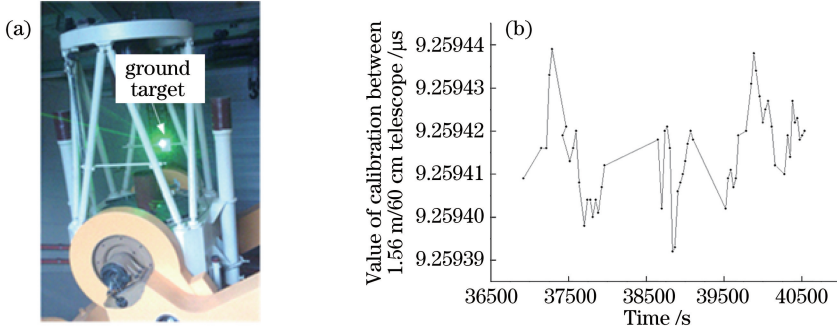


图 4 1.56 m/60 cm 双望远镜系统对固定在 1.56 m 望远镜上靶目标激光测量

Fig. 4 Laser ranging to ground targets installed at 1.56 m telescope by 1.56 m/60 cm dual-receiving telescope system

3.3 双望远镜激光测量系统卫星测量结果

在上述双望远镜系统及光纤时间频率传递装置进行地面靶目标测量基础上,对带有激光反射器卫星(日本激光动力学卫星 Ajisai、美国激光动力学卫星 Lageos2、欧洲激光动力学卫星 Etalon1、俄罗斯 Glonass 导航卫星、中国北斗卫星 IGSO3 和 IGSO5)进行了测量。在对 Glonass128 卫星进行测量的过程中,将 1.56 m 望远镜测量系统 10 MHz 信号由光纤传输切换到系统内部时钟,然后再切换回光纤传输,则发现采用不同时钟 10 MHz 信号后卫星距离残差发生明显变化,如图 5(a)~(c)所示。其中,图 5(a)和(c)为 1.56 m 望远镜测量系统采用光纤传输的 10 MHz 信号,即与 60 cm 望远镜系统 10 MHz 信号同源;图 5(b)为 1.56 m 望远镜系统内部时钟,即与 60 cm 望远镜系统 10 MHz 信号不同源。由图可看出,当两个系统采用不同源 10 MHz 信号后卫星测量距离发生变化,由此证明,时间频率不同步对卫星距离测量值的准确度产生了影响。

图 6 为 1.56 m 望远镜系统对北斗 IGSO5 (Compassi5)卫星实时激光测距界面,测量距离约为 3.6×10^4 km。在跟踪卫星激光测量任务完成后,对安装在 1.56 m 望远镜上的固定靶目标进行测量,获得 1.56 m/60 cm 双望远镜测量系统时延量(包含光纤时间频率传递链路时延),再对 1.56 m 望远

光,由 1.56 m 望远镜接收系统和计时系统进行回波信号探测和计时,再与 60 cm 望远镜系统记录的激光发射时刻进行配对处理,获得 60 cm/1.56 m 双望远镜系统时延量。图 4 给出了每组靶目标测量平均值,测量时间长度约 1 h,其中地靶测量值中包含光纤传输链路时延,地靶测量平均值变化(P-P)约 50 ps,其均值变化量与单台望远镜系统对地面靶目标测量结果相当,内符测量精度(RMS)为 1.2 cm。

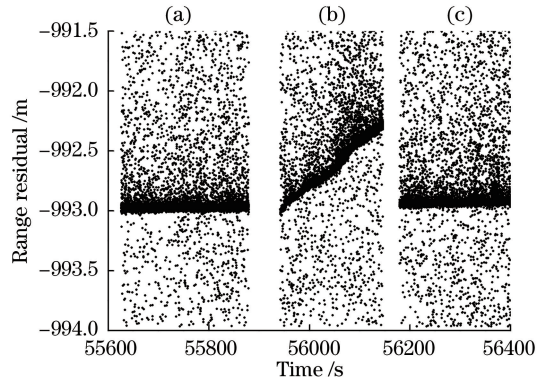


图 5 1.56 m 望远镜测量 Glonass128 卫星距离残差图。

(a) 10 MHz 信号相同源的残差图;(b) 10 MHz 信号不同源的残差图;(c) 10 MHz 信号相同源的残差图

Fig. 5 Range residual from Glonass128 satellite measured by 1.56 m telescope.

(a) Range residual when using 10 MHz signal from the same source; (b) range residual when using 10 MHz signal from the different source; (c) range residual when using 10 MHz signal from the same source

系统得到的卫星距离值扣除系统时延量,获得相对于测量系统参考点的距离值。

通过对 1.56 m 望远镜获得的卫星距离值进行预处理(有效数据提取、系统时延扣除、标准点数据生成等)^[19],激光观测数据内符精度与 60 cm 望远

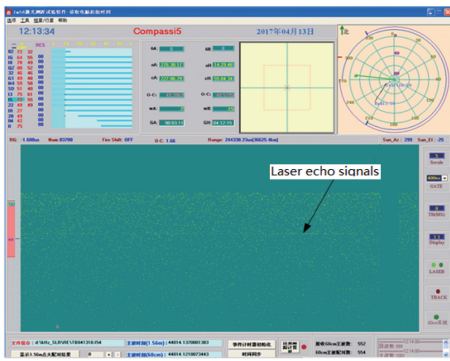


图6 1.56 m望远镜实时测量北斗IGSO5(Compass5)卫星距离残差结果

Fig. 6 Range residual from Beidou IGS05 (Compass5) satellite measured by 1.56 m telescope

镜系统观测数据相当,达1~2 cm。为验证激光观

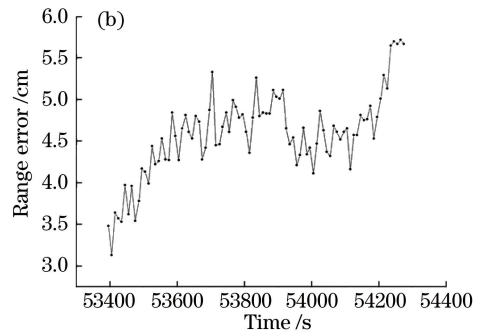
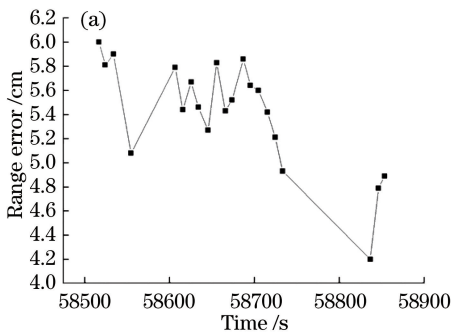


图7 1.56 m望远镜对(a) Lageos2和(b)北斗IGSO3卫星测量距离误差

Fig. 7 Range errors from (a) Lageos2 and (b) Beidou IGS03 satellites measured by 1.56 m telescope

通过对其他卫星(Ajisai、Eatlon1)观测数据处理,1.56 m口径望远镜获得的卫星距离测量外符误差均在厘米级水平。对于单台望远镜激光测距系统,卫星距离的外符误差通常在2~3 cm^[17],而对于上述双望远镜测量系统中的光纤时间频率传递装置,由于时间同步误差限制,再加上两台计时器计时误差,以及受安装在1.56 m口径望远镜靶目标测量误差的影响,使得1.56 m望远镜激光测距值误差偏大。

上述双望远镜系统卫星测量结果,验证了所采用的光纤时间频率传递装置在多望远镜卫星测量时间同步中的有效性,为后续多望远镜系统卫星测量数据应用奠定了基础。

4 结 论

对于空间目标激光测距,由于目标回波信号到达地面时具有一定覆盖范围,使得地面相距一定距离的多望远镜可同时接收回波信号,增加了单位时间内的激光回波数据,可实现单台大口径接收望远镜卫星测量效果,是提升空间目标微弱信号激光测

测数据的外符精度,与该卫星经全球激光测距站观测数据所确定精密轨道进行了比较^[20-21],以验证1.56 m望远镜系统在实际应用光纤时间频率传递装置后所测量的卫星距离准确性,即外符合验证。

根据双望远镜系统与卫星所构成的三角形以及几何关系,1.56 m望远镜接收到的回波信号所对应卫星距离值参考站点坐标可选取为1.56 m/60 cm望远镜相位中心的中点,即在对1.56 m望远镜观测数据进行处理时所采用的站点坐标为双望远镜相位中心的中点坐标。图7给出了1.56 m望远镜对近地轨道Lageos2和同步轨道远地北斗IGSO3卫星测量的距离外符误差结果。由图7可知,卫星距离测量外符误差小于6 cm,达厘米级水平,满足激光数据卫星定轨应用要求。

距的探测能力的重要途径。在多望远镜激光接收测量系统中,各个系统的时间频率同步精度将直接影响卫星距离测量结果的准确性,其为多望远镜系统卫星激光观测的关键问题。基于光纤时间频率传递研究了多望远镜测量系统的时间频率同步方法,利用上海天文台1.56 m/60 cm双望远镜系统平台,组建了单台望远镜激光发射、多台望远镜信号的测量实验系统,并将光纤时间频率传递装置应用于双望远镜测量系统,将60 cm望远镜系统10 MHz和1 PPS信号传递给1.56 m望远镜系统,实现了双望远镜测量系统的时间频率同步。经测试,双望远镜系统的时间同步精度为62 ps,变化率约为4 ps/d,具有较高的传递稳定性。通过双望远镜系统对地面靶目标和卫星测量实验,卫星距离测量外符误差小于6 cm,达厘米级水平,满足了激光观测数据应用需求。通过进一步提高光纤时间频率传递精度以及计时器精度,可以进一步地降低测量误差,使其与常规单台站望远镜卫星测距精度相当。以上结果表明了光纤时间频率传递在多望远镜信号接收激光测距

应用的可行性,为后续多望远镜测量系统在微弱激光信号探测与应用奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Degnan J J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review [J]. Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology, Geodynamics Series, 1993, 25:133-162.
- [2] Lucchesi D M, Anselmo L, Bassan M, *et al.* Testing the gravitational interaction in the field of the earth via satellite laser ranging and the laser ranged satellites experiment (LARASE) [J]. Classical and Quantum Gravity, 2015, 32(15): 155012.
- [3] Bonin J A, Chambers D P, Cheng M K. Using satellite laser ranging to measure ice mass change in Greenland and Antarctica [J]. The Cryosphere, 2018, 12(1): 71-79.
- [4] Kirchner G, Hausleitner W, Cristea E. Aisai spin parameter determination using Graz kilohertz satellite laser ranging data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(1): 201-205.
- [5] Zhang Z P, Cheng Z E, Zhang H F, *et al.* Global laser ranging observation of Beidou satellites and data application[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0404004.
张忠萍,程志恩,张海峰,等.北斗卫星全球激光测距观测及数据应用[J].中国激光,2017,44(4): 0404004.
- [6] Bennett J C, Sang J, Smith C H, *et al.* Accurate orbit predictions for debris orbit manoeuvre using ground-based lasers[J]. Advances in Space Research, 2013, 52(11): 1876-1887.
- [7] Coyle D B, Stysley P R, McGarry J F, *et al.* Adapting a ground-based laser ranging system at NASA-GSFC for identification and tracking of orbital debris[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8731: 1-7.
- [8] Vilmrotter V, Lau C W, Srinivasan M, *et al.* Optical array receiver for communication through atmospheric turbulence [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(4): 1664-1675.
- [9] Zhang Z P, Zhang H F, Deng H R, *et al.* Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0102002.
张忠萍,张海峰,邓华荣,等.双望远镜的空间碎片激光测距试验研究[J].红外与激光工程,2016,45(1): 0102002.
- [10] Kodet J, Schreiber U, Eckl J, *et al.* Local ties control in application of laser time transfer [C] // Proceedings of 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium, 2013: 81-85.
- [11] Gao C, Wang B, Bai Y, *et al.* Fiber based time and frequency synchronization system [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(34): 41-46.
高超,王波,白钰,等.基于光纤链路的高精度时间频率传输与同步[J].科技导报,2014,32(34): 41-46.
- [12] Li M. Research on improving ranging precision method in dual one-way ranging and time synchronization system [D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2014.
李梦.双向测距与时间同步系统提高测量精度的方法研究[D].西安:中国科学院国家授时中心,2014.
- [13] Cheng N, Chen W, Liu Q, *et al.* Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0705002.
程楠,陈炜,刘琴,等.光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J].中国激光,2015,42(7): 0705002.
- [14] Wang L D, Wu G L, Shen J G, *et al.* Simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber link [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406004.
王灵东,吴龟灵,沈建国,等.基于100 km光纤链路的时间和频率同时传递[J].光学学报,2015,35(4): 0406004.
- [15] Liu T, Liu J, Deng X, *et al.* Research on fiber-based time and frequency transfer[J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(3): 207-215.
刘涛,刘杰,邓雪,等.光纤时间频率信号传递研究[J].时间频率学报,2016,39(3): 207-215.
- [16] Chen F X, Zhao K, Zhou X, *et al.* High-precision long-haul fiber-optic time transfer between multi stations [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(20): 200701.
陈法喜,赵侃,周旭,等.长距离多站点高精度光纤时间同步[J].物理学报,2017,66(20): 200701.
- [17] Zhang Z P, Zhang H F, Wu Z B, *et al.* kHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(15): 1177-1183.
张忠萍,张海峰,吴志波,等.高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果[J].科学通报,2011,56(15): 1177-1183.

- [18] Qian B C, Zhou H N, Pan H J, *et al.* Observing the collision of comet SL9 with Jupiter using a 1.56 m telescope [J]. *Acta Astrophysica Sinica*, 1995, 15(1): 99-100.
钱伯辰, 周洪楠, 潘红鉴, 等. 1.56 m 望远镜观测彗-木相撞概况[J]. *天体物理学报*, 1995, 15(1):99-100.
- [19] Zhang H F, Zhang Z P, Qin S, *et al.* The functions of satellites position prediction and data pre-processing software for Shanghai SLR station [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 2009, 30: 153-156.
张海峰, 张忠萍, 秦思, 等. 上海天文台卫星激光测距的台站预报和数据预处理软件的功能[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2009, 30: 153-156.
- [20] Huang C, Feng C G. SLR data processing and its software implementation [M]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2003.
黄斌, 冯初刚. SLR 数据处理及其软件实现[M]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2003.
- [21] Zhao G. Studies on applications of SLR precise orbit determination in China's satellite projects [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2013: 18-33.
赵罡. 激光测距精密定轨在中国卫星工程中的应用研究[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2013: 18-33.