

云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统

郑向明 李祝莲* 伏红林 何少辉 李荣旺 李语强 翟东升 熊耀恒

(中国科学院国家天文台云南天文台, 云南 昆明 650011)

摘要 千赫兹(kHz)激光测距是增加卫星激光测距观测数据和提高标准点精度的有效措施之一。分析研究了基于共光路的 kHz 激光测距系统的实现原理和方法,包括光路、电路和计算机控制等。给出了使用旋转快门实现共光路 kHz 激光测距的新思路,开发 1.2 m 望远镜共光路 kHz 激光测距系统。该系统已用于常规观测,实际观测结果表明,系统性能较好且工作稳定,地靶测距精度约为 5 mm,卫星测距精度优于 2.0 cm。

关键词 测量;千赫兹激光测距;收/发共光路;卫星激光测距;天文仪器;事件计时器

中图分类号 P171.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0512002

1.2 m Telescope Satellite Co-Optical Path kHz Laser Ranging System

Zheng Xiangming Li Zhulian Fu Honglin He Shaohui Li Rongwang

Li Yuqiang Zhai Dongsheng Xiong Yaoheng

(Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China)

Abstract Kilo-Hertz (kHz) laser ranging is one of effective methods to increase the measurement frequency and improve the accuracy of normal point (NP). Principle and method of realizing common optical path kHz laser ranging are analyzed, which include optical path, circuit and computer control etc. Novel concept of rotation shutter is proposed to build kHz system, and control system of 1.2 m telescope common optical path kHz laser ranging has been developed. It has been successfully used for routine observation. Actual observations show that the system performs well and runs stable. The ground target ranging accuracy is about 5 mm, and satellite ranging accuracy is better than 2.0 cm.

Key words measurement; kHz satellite laser ranging; receive and emit common optical path; satellite laser ranging; astronomical instruments; event timer

OCIS codes 120.0120; 120.6085; 280.3400

1 引言

卫星激光测距(SLR)的原理是通过精确测定激光脉冲在地面观测站与激光测距卫星之间的往返时间间隔,从而算出地面观测站到卫星的距离^[1,2]。

云南天文台激光测距组于 1998 年在 1.2 m 地平式望远镜建立了高指向精度、收/发共光路的卫星精密激光测距系统,并于同年正式参加国内和国际激光测距联测,测距频率为 1~10 Hz,单次测距精

度优于 3 cm,测时设备为 SR620 时间间隔计数器^[3,4]。千赫兹(kHz)激光测距技术是近几年发展起来的新的测距方式,它通过增加测距频率来增加观测数据和提高标准点精度,观测数据量的增加,可以有效地提高标准点的精度,利于卫星的精密定轨,是激光测距的发展方向之一^[5]。

在国家重大科技基础设施建设项目——《中国大陆构造环境监测网络》的支持下,国内激光测距网

收稿日期: 2010-11-10; 收到修改稿日期: 2011-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(10778705)资助课题。

作者简介: 郑向明(1964—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事空间目标光电探测方面的研究。

E-mail: zhengxm@ynao.ac.cn

导师简介: 熊耀恒(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事天文仪器与方法、自适应光学和卫星/月球激光测距技术等方面的研究。E-mail: xyh@ynao.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: lzhl@ynao.ac.cn

均改造升级为 kHz 测距系统,包括云台 1.2 m 望远镜激光测距系统。作为共光路激光测距方式,因发射激光束发射时刻的强散射光和被大气反射的后向散射,在 1.2 m 望远镜实现 kHz 共光路测距系统难度较大。研究组经过反复研究和试验,最终采用旋转快门的方式,于 2010 年初实现了 kHz 共光路激光测距系统,并进入常规观测。本文研究共光路激光测距的实现方式,并在 1.2 m 望远镜上成功建立 kHz 共光路卫星激光测距系统,文中对该系统实现原理和方法进行了详细的阐述,包括光路、电路和计算机控制等。

2 原理及实现

2.1 测距光路

1.2 m 望远镜共光路 kHz 卫星激光测距光路

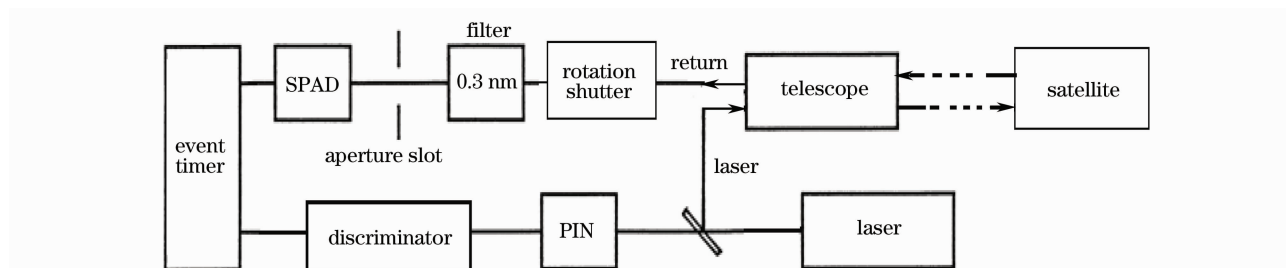


图 1 1.2 m 望远镜 kHz 激光测距光路框图

Fig. 1 Block diagram of optical path of 1.2 m telescope kHz satellite laser ranging

在 kHz 激光测距中,采用单个 SR620 时间间隔计数器采集激光脉冲在观测站和卫星之间飞行时间的方法已不再适用,故采用 ps 事件计时器(采用 A033-ET,测量精度优于 5 ps)采集激光发射时刻和回波到达时刻,这两个时刻的差即为激光脉冲飞行时间^[1,8,9]。

2.2 测距控制系统

1.2 m 望远镜 kHz 共光路测距控制系统如图 2 所示。旋转快门产生同步信号,控制计算机在收到该信号时刻根据用户指令选择激光发射频率和是否

如图 1 所示^[6],是从原来低频激光测距系统的基础上升级而成的,例如 kHz 激光器,ps 事件计时器和旋转快门等替代原来的低频激光器,SR620 时间间隔计数器和旋转镜等。

1.2 m 望远镜低频(小于 10 Hz)共光路激光测距中采用收/发共光路旋转镜^[7]实现接收光路和发射光路的互相切换,此时旋转镜的转速小于 20 r/s。因此,对 kHz 激光测距,该方法失效。在 1.2 m 望远镜 kHz 共光路激光测距中,用旋转快门替换上述的旋转镜,实现提供激光器发射激光的同步信号、激光发射时以及发射激光束的大气后向散射到达时保护雪崩二极管(C-SPAD)单光子探测器和回波到达时接通回波光路等功能。这是实现共光路 kHz 激光测距的一种有效方法,是在 1.2 m 望远镜上实现 kHz 共光路激光测距的关键技术之一。

发送激光点火指令给激光器;激光经光电二极管(PIN)主波探测器产生主波信号送事件计时器记录下主波时刻,同时送回控制计算机计算 C-SPAD 门控时刻,结果送距离门发生器;在回波快到达时刻由距离门发生器产生门控信号给 C-SPAD 单光子探测器,使其开门探测回波信号^[10],并由事件计时器记录下回波时刻;事件计时器每记录满一组数据(例如 255,511 或 1023 个数据等)送控制计算机进行数据初步处理及显示,用于实时测距监测。

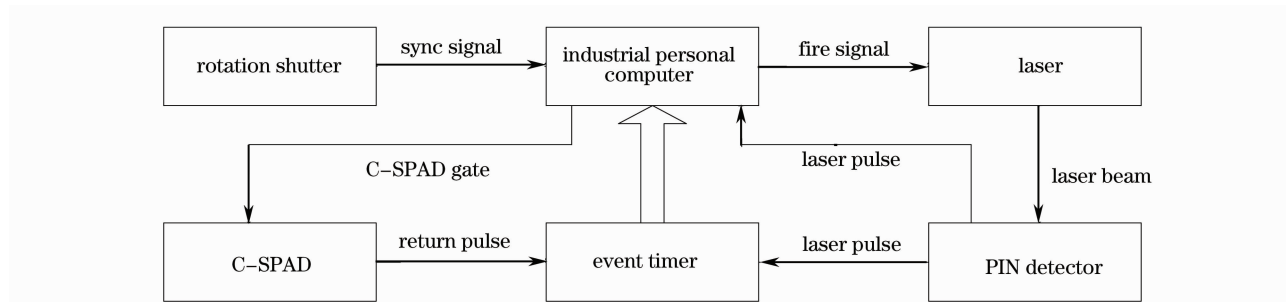


图 2 1.2 m 望远镜 kHz 激光测距控制框图

Fig. 2 Control block diagram of 1.2 m telescope kHz satellite laser ranging

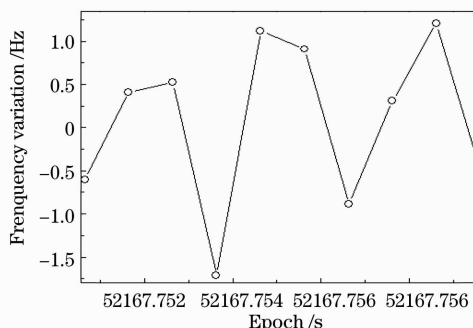
2.3 旋转快门及其稳定性测定

旋转快门为一边缘上开有多个小齿的大约 25 cm 直径的圆盘(像齿轮一样),经直流电机驱动,可实现不同的转速,在圆盘背后靠近圆盘的一个固定位置处装一个光电探头使其能正对着圆盘边缘的小齿,这样每当各小齿转过时就产生一个光电信号,即文中所述的旋转快门同步信号。

如 2.1 节中所述,旋转快门是 1.2 m 望远镜 kHz 测距系统的关键技术,控制计算机根据旋转快门产生的同步控制信号并对其进行分频处理,得到

所需激光发射频率信号。故其是否能够平稳工作对整个系统的平稳性运行起着至关重要的作用。如图 3(a)所示,采集每个同步控制脉冲时刻计算信号频率,虚线框内的数据表示 10 ms 内约有 10 个脉冲到来,频率达到 kHz 数量级(根据需要该频率可以调高或调低)。频率平均值约为 1002.8 Hz;如图 3(b)所示为频率偏离平均值图,偏离值在 ± 1.5 Hz 范围内,精度优于 0.15%。该偏差主要是由于旋转快门的机械加工精度和驱动电机的误差等引起的,但是此精度已满足测距系统的需要。

Epoch/s	Frequency/Hz
52167.74765	1003.209371
52167.74865	1003.309512
52167.74964	1001.911749
52167.75064	1002.198528
52167.75164	1003.209664
52167.75264	1003.3217
52167.75363	1001.090285
52167.75463	1003.921925
52167.75563	1003.709411
52167.75663	1001.911844
52167.75762	1003.109543
52167.75862	1004.00971
52167.75962	1002.310725
52167.76061	1002.198425
52167.76161	1002.80987
52167.76261	1003.109543
52167.76361	1003.409387



(a) measuring frequency of shutter

(b) stability of rotation shutter

图 3 旋转快门稳定性测量数据

Fig. 3 Data measured for stability of rotating shutter

kHz 测距中存在发射激光的瞬间有回波到达探测器(即回波时刻与激光发射时刻重叠)的情况,为了保护探测器,旋转快门提供激光发射同步信号时,它将回波光路切断,故有很少部分回波被丢失,但对 kHz 测距基本无影响。另一方面,当发生上述情况时,对旋转快门速度进行微调,回波不再丢失,仅延迟了激光的发射时间。

2.4 电路时序

图 4 所示为 kHz 测距控制系统电路时序图。

旋转快门产生 kHz 同步信号,在每个同步信号上升沿控制计算机选择是否产生一个激光发射指令信号给激光器发射激光;PIN 主波探测器将探测到每次发射的激光信号并输出主波脉冲;一旦接收到主波信号,控制计算机就根据观测目标轨道距离预报信息计算回波到达时刻送距离门发生器[其先进先出(FIFO)可存储多达 256 个的回波时刻数据],由它在回波快到达时刻送门控信号给 C-SPAD 单光子探测器。

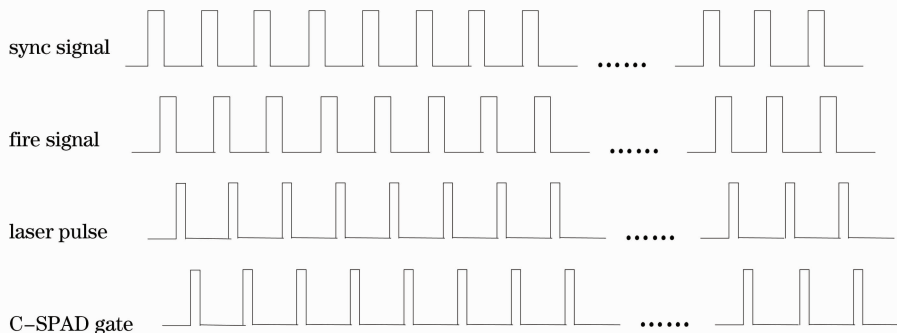


图 4 1.2 m 望远镜 kHz 激光测距时序图

Fig. 4 Sequence chart of 1.2 m telescope kHz satellite laser ranging

2.5 软件控制

激光测距软件操作流程如图 5 所示,首先运行测距软件,其中包含测距目标轨道预报、激光跟踪测距、数据采集和测量数据处理等功能;然后进行测距目标轨道预报,望远镜根据目标轨道预报程序跟踪测距目标(该功能专门在望远镜控制计算机中实现,不包含在这里的激光测距控制软件中);望远镜跟踪上目标后即可开始激光测距和数据采集等工作;最后一步是进行测量数据处理,这一步工作可以在一个目标测距结束后进行,也可以在所有目标测距结束后进行。跟踪测距时,是实线框内的部分发挥作用,而虚线框内的部分不起作用。

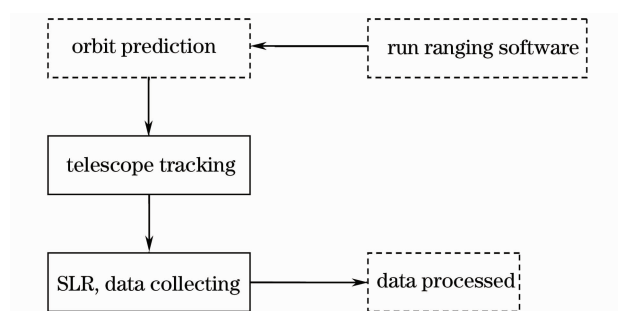


图 5 测距操作流程

Fig. 5 Ranging operational process

在激光测距工作中,轨道预报、跟踪测距控制和测量数据处理可非同时进行,故测距控制软件采用了 VC++ 中单文档多视图的方式实现^[8]。

3 观测结果和分析

3.1 夜晚观测数据

测距系统已用于常规观测,图 6 所示为 2010 年 4 月 10 日晚的部分观测数据。为了获得测距系统的系统延迟(包括电路、光路和仪器等延迟),每晚测距中都对已知距离的地面靶进行多次测距。图 6(a)为地面靶观测数据,测量精度约为 5 mm,系统延迟为 2358.9 cm;图 6(b)为对 Jason2 激光卫星的测量数据,数据标准偏差为 1.17 cm,约 6 min 内测得回波点数为 26 496 个点,而其它大量数据皆为噪声;图 6(c)为对 Lageos2 激光卫星的测量数据,标准偏差为 1.46 cm,约 10 min 内测得回波点数为 9 434 个点,而其它大量数据为噪声。

3.2 白天观测数据

2010 年 10 月底,1.2 m 望远镜共光路 kHz 激光测距系统已成功获得白天激光测距的观测数据,每天将获得测距卫星更多的观测圈数。图 7 所示为 2010 年 11 月 1 日 Ajisai 卫星的观测数据,标准偏

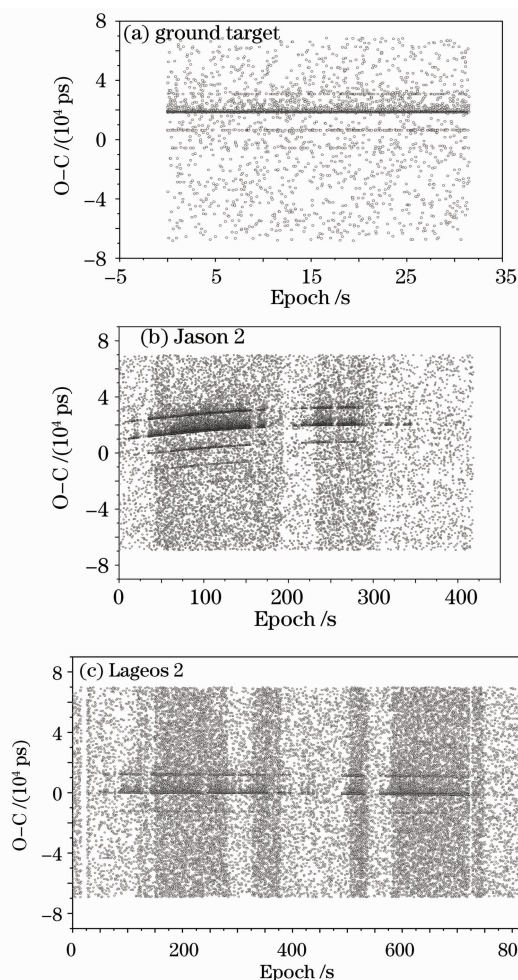


图 6 测量数据

Fig. 6 Ranging data

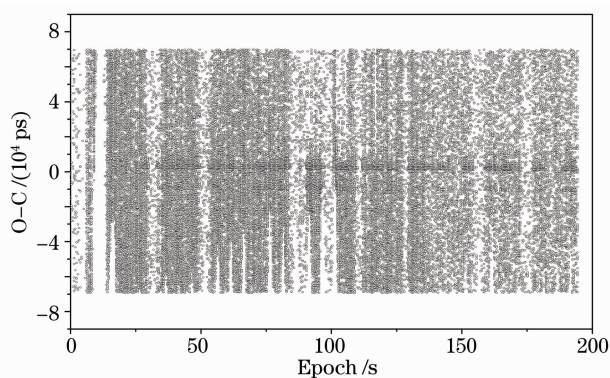


图 7 Ajisai 白天测量数据

Fig. 7 Ajisai daylight ranging data

差为 1.41 cm。

在传统的激光测距系统(小于 10 Hz)中,对于近地星(如 Jason2),6 min 内测到的回波数据可能到几百个点,而对于远地星(如 Lageos2),10 min 内测到的回波数据可能到上百个点,显然,在 kHz 测距系统中测量数据几十甚至上百倍地增加。对比白

天和夜晚的测量数据,白天测距背景噪声要多得多,故对 C-SPAD 距离门信号精度提出了更高的要求,经大量观测试验发现当距离门分辨率调到 20 ns(该系统距离门分辨率可调,最小优于 5 ns)时,提前 200 ns 送 C-SPAD 门控信号,该共光路 kHz 测距系统便能对卫星进行很好的测距跟踪。图 6,7 中黑色的粗线为大量回波数据点,其上下方的点均为噪声,多条黑色粗线是因激光器发出的激光包含多脉冲信号。

如图 6,7 所示,kHz 测量数据量成百倍增加,包括卫星回波信号和其它的噪声信号。这对观测过程中的数据采集并显示和事后数据处理等均提出了很高的要求,故对 kHz 激光测距处理方法的研究是本课题组的另一重要课题。

4 结 论

实现共光路 kHz 卫星激光测距技术比较困难,通过在云南天文台 1.2 m 望远镜上实现该技术的实验充分说明了这一点,但同时也证明了共光路 kHz 卫星激光测距是可以被实现的。文中提出旋转快门等独特的技术方法研制了 1.2 m 望远镜共光路 kHz 卫星激光测距系统,并使用该系统进行了大量的白天和夜晚观测实验。实测结果表明,系统性能较好且工作稳定,地靶测距精度约为 5 mm,卫星测距精度优于 2.0 cm。将来,进一步提高旋转快门的机械加工精度和去除激光器的多脉冲后,可以使得测距精度更高,激光器多脉冲问题解决后还将增加测距数据的量,充分发挥 1.2 m 望远镜的优势为国际国内激光测距服务。

参 考 文 献

- Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrodynamics[M]. Shandong: Shandong Science and Technology Publishing House, 2000. 91~118
叶叔华, 黄 城. 天文地球动力学[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 2000. 91~118
- Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng *et al.*. All-phase Fourier transform spectrum analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2928~2934
贾方秀, 丁振良, 袁 峰等. 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的激光动态目标实时测距系统[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2928~2934
- He Miaochan, Zheng Xiangming, Jiang Chongguo. The detectors of satellite laser ranging in Yunnan observatory[J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 2003, **3**: 62~67
何妙婵, 郑向明, 姜崇国. 云南天文台激光测距中使用的光电探测器[J]. 云南天文台台刊, 2003, **3**: 62~67
- Li Zhulian, Xiong Yaoheng, He Miaochan *et al.*. Principle of 1.2 m telescope satellite laser ranging system[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2008, **5**(3): 248~252
李祝莲, 熊耀恒, 何妙婵等. 云南天文台人造卫星激光测距系统原理[J]. 天文研究与技术, 2008, **5**(3): 248~252
- Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Yang Fumin *et al.*. Statistical analysis of successful detection probability of the returns in satellite laser ranging[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, **31**(3): 28~29
吴志波, 张忠萍, 杨福民等. 卫星激光测距回波探测成功概率统计分析[J]. 测绘科学, 2006, **31**(3): 28~29
- Xiong Yaoheng, Fu Honglin. Optical system of the Yunnan Observatory 1.2 m telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**: 66~69
熊耀恒, 伏红林. 云南天文台 1.2 m 望远镜的光学系统[J]. 光电工程, 1998, **25**: 66~69
- He Shaohui, Zheng Xiangming. Design and realization of a synchronized rotating shutter for a laser range finder on the 1.2 m telescope of YNAO[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2009, **6**(4): 305~309
何少辉, 郑向明. 1.2 m 望远镜激光测距系统同步旋转快门的设计与实现[J]. 天文研究与技术, 2009, **6**(4): 305~309
- Li Zhulian, Xiong Yaoheng. Realization and design of high-accuracy event timer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2022~2025
李祝莲, 熊耀恒. 高精度事件计时器的设计与实现[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 2022~2025.
- Lei Linjun, Yang Yan, Chen Weibao. High-accuracy time-interval-unit for spaceborne laser range finder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1422~1426
雷琳君, 杨 燕, 陈卫标. 星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1422~1426
- Jiang Chongguo, He Miaochan, Zheng Xiangming. The application of the gateable single photon detectors in astronomical observation [J]. *Optical-Electron Technology and Information*, 2001, **14**(4): 35~38
姜崇国, 何妙婵, 郑向明. 可门控单光子探测器在天文观测中的应用[J]. 光电子技术与信息, 2001, **14**(4): 35~38
- Shi Yanling. Several realization methods of single document multi-view[J]. *Computer Application Research*, 1999, **16**(10): 100~102
石艳玲. 单文档多视图的多种实现方式[J]. 计算机应用研究, 1999, **16**(10): 100~102