

引用格式: LI Xin, ZHU Wei, LUO Qing-shan, *et al.* kHz Repetition Rate Mobile Laser Ranging System with High Precision and Measuring Results Analysis in Western China[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2):0228001

李欣, 朱威, 罗青山, 等. 高精度千赫兹流动激光测距系统中国西部地区实测结果分析[J]. 光子学报, 2020, 49(2):0228001

高精度千赫兹流动激光测距系统中国西部地区 实测结果分析

李欣^{1,2,3}, 朱威^{1,3}, 罗青山^{1,2,3}, 邹彤^{1,2,3}, 郭唐永^{1,3}

(1 中国地震局地震研究所 地震大地测量重点实验室, 武汉 430071)

(2 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

(3 湖北省地震局 地震预警湖北省重点实验室, 武汉 430071)

摘 要:为了解决人造卫星激光测距观测站在我国东西部地区分布不均衡的现状, 中国地震局地震研究所采用方便运输的载车结构和皮秒级千赫兹半导体激光器, 结合自行研制的皮秒级事件计数器和纳秒级距离门, 研制了新一代的大口径流动卫星激光测距系统 TROS1000. TROS1000 具备千赫兹流动激光测距的能力, 并且具有机动灵活、架设周期短等特点. 2019 年 9 月, TROS1000 抵达中国科学院新疆天文台南山观测站, 在我国西部地区首次获取千赫兹激光观测数据. 经过数据预处理, 中低轨卫星的单次精度优于 14 mm, 高轨卫星的单次精度优于 19 mm, 与上一代流动激光测距系统相比, 其单次精度更高, 有效回波信号更多, 目标探测能力更强.

关键词: 卫星激光测距; 流动观测; 千赫兹激光器; 事件计数器; 距离门

中图分类号: P228.5

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204902.0228001

kHz Repetition Rate Mobile Laser Ranging System with High Precision and Measuring Results Analysis in Western China

LI Xin^{1,2,3}, ZHU Wei^{1,3}, LUO Qing-shan^{1,2,3}, ZOU Tong^{1,2,3}, GUO Tang-yong^{1,3}

(1 Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China)

(2 Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201, China)

(3 Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Hubei Earthquake Agency, Wuhan 430071, China)

Abstract: Institute of Seismology, China Earthquake Administration has developed a new generation of large-aperture mobile satellite laser ranging system TROS1000, which uses a convenient transport structure, a picosecond kHz semiconductor laser, a self-developed picosecond event timer and a nanosecond range gate generator, in order to solve the unbalanced distribution of satellite laser ranging stations in the East and West of China. TROS1000 is the kilohertz satellite laser ranging system, it can be transport conveniently and setup quickly. In september 2019, TROS1000 arrived at Nanshan station of Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences. TROS1000 acquire kHz satellite laser ranging observation data in Western China for the first time. After data preprocessing, the single accuracy of low earth orbit and medium earth orbit satellites are better than 14 mm, that of high earth orbit satellites are better than 19 mm. Compared with the previous mobile satellite laser ranging system, TROS1000 has higher single accuracy, more valid echo signals and stronger target detection capability.

基金项目: 中国地震局地震研究所和中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项(No.IS201506208)

第一作者: 李欣(1978—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为人造卫星激光测距. Email: lxcomcn@aliyun.com

通讯作者: 朱威(1984—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为人造卫星激光测距. Email: 15972138235@163.com

收稿日期: 2019-10-23; 录用日期: 2019-11-27

Key words: Satellite laser ranging; Mobile observation; kHz repetition rate laser; Event timer; Range gate generator

OCIS Codes: 280.3400; 120.4640; 010.3640

0 引言

人造卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)是空间大地测量领域的重要技术手段之一,实现原理是测量激光脉冲往返于地面和卫星之间的飞行时间,进而解算出相关的精确距离.SLR在卫星精密定轨、地壳运动监测、参考框架确定和维持等领域有重大作用.

目前,固定SLR观测站在我国分布不均,仅在长春、北京、上海、武汉和昆明五地建有,其他大多数地区特别是西部地区需要流动SLR观测站来弥补站点均衡.因此,中国地震局地震研究所于2000年成功研制出流动SLR系统TROS-I,并从2000年8月开始分别在北京、乌鲁木齐和拉萨等地进行流动SLR观测,这也是我国首次实现流动SLR观测^[1-4].2008年4月13日,TROS-I于北京观测到国内第一圈千赫兹(kHz)测距数据^[5].

在国家重大科学工程“中国大陆构造环境监测网络”的支持下,中国地震局地震研究所于2011年成功研制出世界上首台接收口径达到1 m的流动卫星激光测距系统TROS1000,该系统具有口径大、测程远、技术集成度高、流动便捷的特点^[6-8],已经先后在武汉九峰地震台、湖北咸宁、山东荣成地震台等地进行流动SLR观测.

2019年8月29日,TROS1000从湖北咸宁出发,途经湖北、陕西、宁夏、甘肃、新疆5省,历时7日,跨越约3 500 km距离,到达中国科学院新疆天文台南山观测站,并成功建站.2019年9月19日,成功进行了首日观测,分别观测到高、中、低轨人造卫星,这也是我国西部地区首次进行kHz流动SLR观测.

本文详细介绍了流动SLR系统TROS1000的技术构成情况,分析了kHz激光测距的观测结果并与10 Hz激光测距结果进行了对比,以验证kHz高重复频率激光测距的优势.

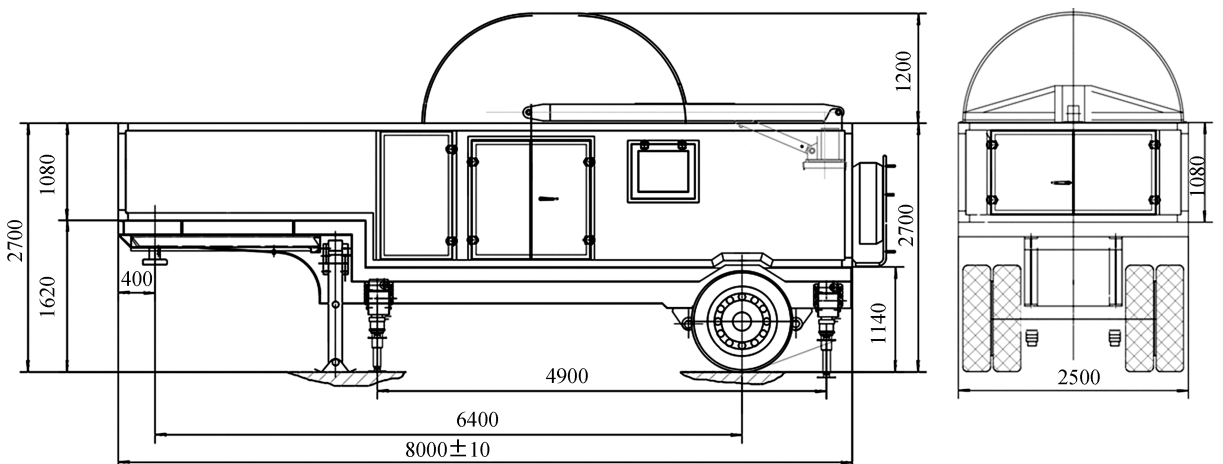
1 高精度 kHz 流动 SLR 激光测距系统 TROS1000

实现TROS1000的流动kHz激光测距,需要特别准备运输载车,并且具备kHz激光器、距离门、事件计数器等方面的技术及装备.

1.1 流动SLR系统载车结构

TROS1000载车长15 m,宽2.5 m,高3.9 m,采用标准卡车底盘,通过改装连接和减震系统,实现车辆、观测设备的有机结合,外形尺寸如图1所示.系统在质量达到15 t的情况下,实现了便捷流动、快速建站的功能.

TROS1000处于运输状态时,其仪器主体通过减震器机构安装于载车主梁上,并由减震器承担仪器的全部质量,通过旋转机构收起底部4个支撑脚,此时仪器最低点与地面间距保持在380 mm,仪器主体与载车底板通过4根钢丝绳辅助连接,载车主梁下部均布4根辅助弹簧拉住底部支撑脚,如图2所示.连接车头即可进行流动运输.



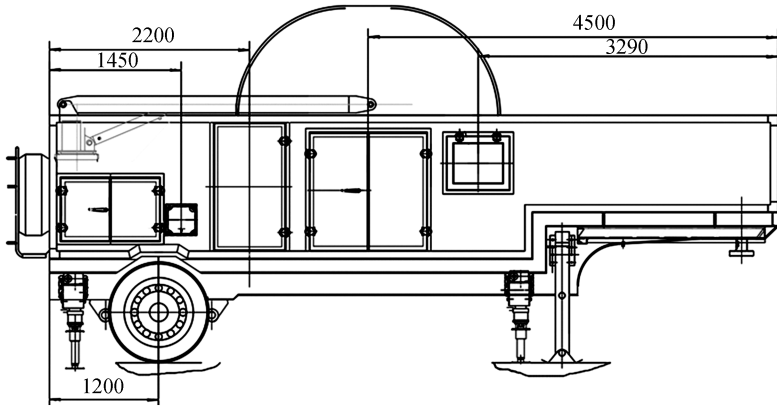


图1 TROS1000 外形尺寸

Fig.1 Overall dimension diagram of TROS1000

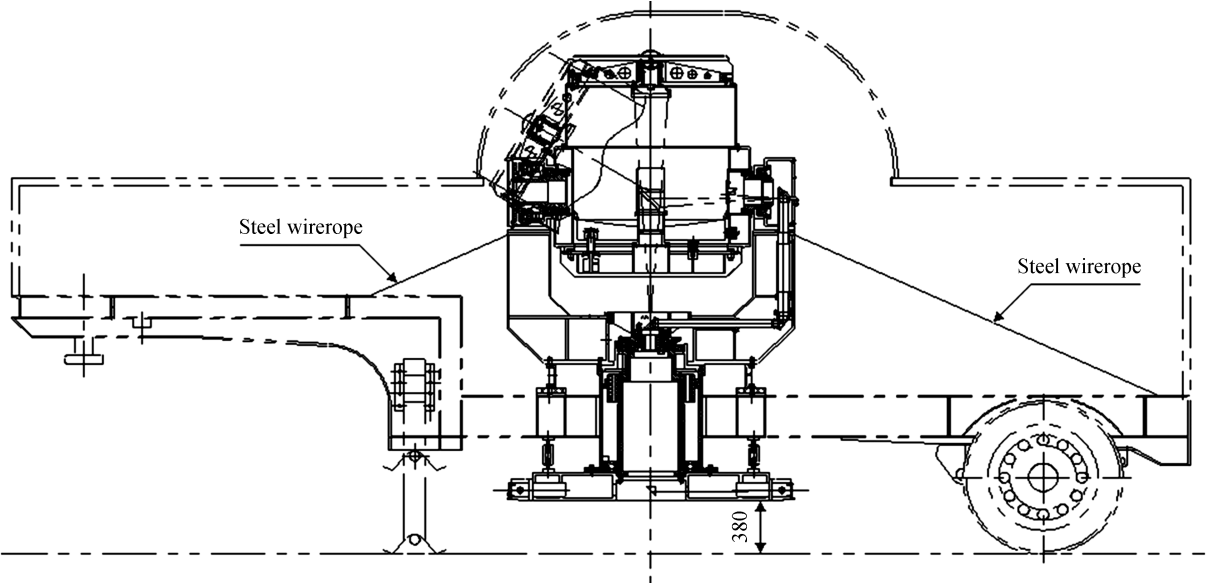


图2 TROS1000 运输状态

Fig.2 Transportation diagram of TROS1000

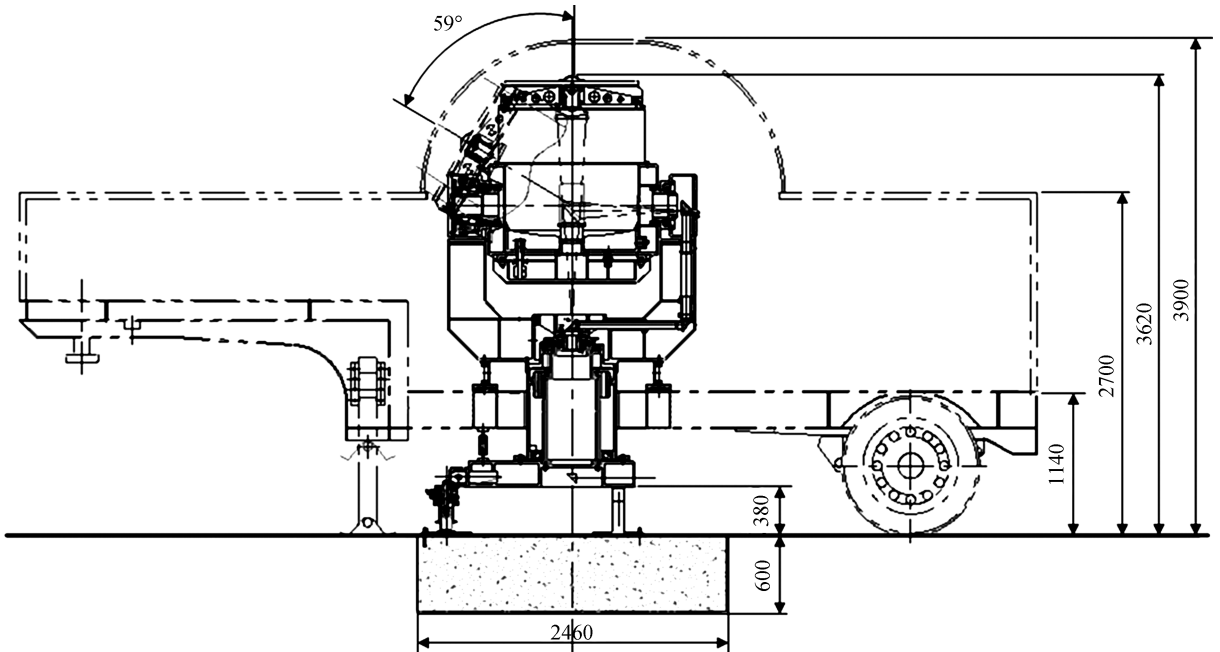


图3 TROS1000 工作状态

Fig.3 Operation diagram of TROS1000

TROS1000 处于工作状态时,仪器主体与载车的连接脱离,底部支撑脚固定在预置地基上,支撑起整个仪器,如图 3 所示.地基深度不小于 600 mm,宽度不小于 2 460 mm.载车圆顶展开高度为 6 600 mm,展开半径为 3 200 mm.

TROS1000 于 2019 年 9 月 8 日完成在中国科学院新疆天文台南山观测站的架设工作,如图 4 所示.



图 4 TROS1000 在南山观测站架设图

Fig.4 Setup diagram of TROS1000 in Nanshan Station

1.2 kHz 高重复频率激光器

TROS1000 采用的 kHz 激光器为美国 Photonics Industries 公司的 RG-L-532 型激光器,该激光器技术参数见表 1^[9].

表 1 RG-L-532 激光器技术参数
Table 1 Specifications of RG-L-532 Laser

Item	Specification
Repetition rate/kHz	0.01~10
Wave length/nm	532
Pulsewidth/ps	10~15
Pulseenergy/mJ	3
Beammode	TEM ₀₀
Beamquality factor /M ²	<1.3
Long term stability	±3%
Beampointing stability/μrad	<20
Beamdivergence/mrad	0.6
Resonatorcavity length/mm	1 900
Beamdiameter/mm	1.3

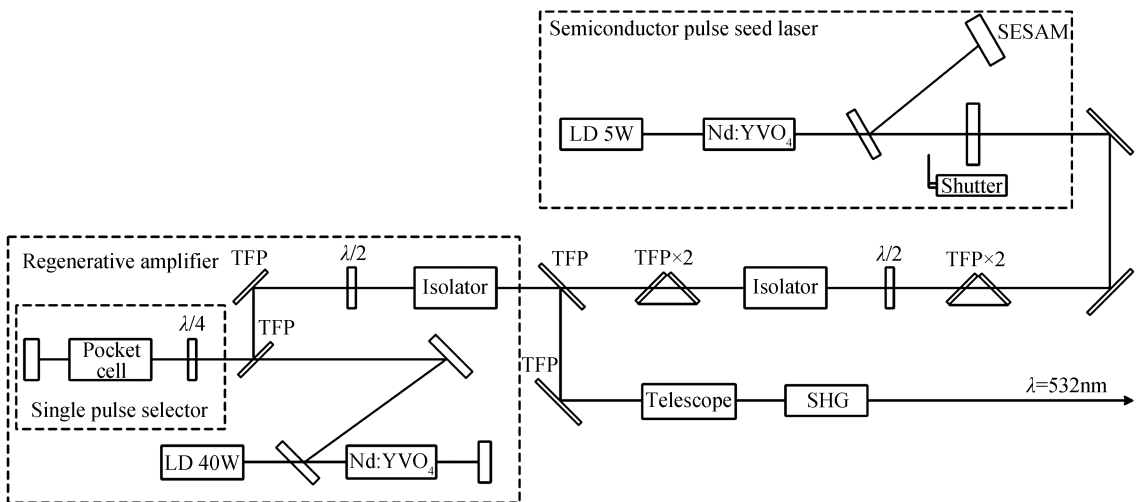


图 5 RG-L-532 激光器光路结构

Fig.5 Optical path diagram of RG-L-532 Laser

该激光器重复频率最高可达 10 kHz,但在实际 SLR 观测工作中,一般选择 1 kHz 频率、1 mJ 能量的指标参数.该激光器利用基于半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)的被动锁模技术,构成重复频率为 80 MHz 的皮秒锁模振荡器,产生波长为 1 064 nm、脉冲宽度小于 15 ps 的种子源,经过两级隔离后进入普克尔盒,普克尔盒中选出 1 kHz 的脉冲序列注入再生放大腔,当脉冲序列在再生放大腔内达到饱和时进入倍频晶体,最终产生波长为 532 nm、脉冲宽度小于 15 ps、单脉冲能量为 1 mJ 的激光,其光路结构如图 5 所示.

1.3 事件计数器

kHz 高重复频率激光测距的脉冲时序如图 6^[10]所示,在时刻 n 发射主波脉冲,在时刻 n' 接收回波脉冲,在它们之间还有 M 个主波脉冲和若干个回波脉冲,传统时间间隔计数器已无法满足需求,因此必须采用记录事件的测量模式才能完成高重复频率测距任务,采用专用时间数字转换(Time-to-Digital Conversion, TDC)芯片和现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)芯片实现事件计数器.

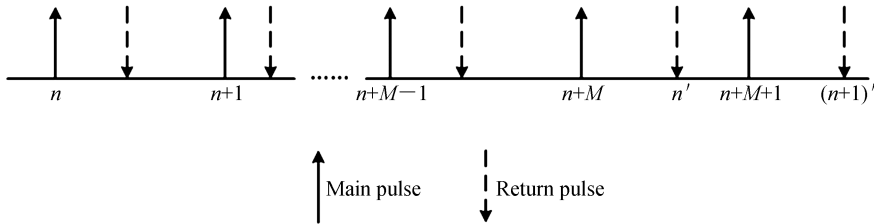


图 6 kHz 激光测距脉冲时序
Fig.6 Time diagram of kHz laser ranging

事件计数器的原理如图 7^[11-14]所示,100 MHz 参考时钟和锁相环(Phase Locked Loop, PLL)提供稳定的系统时钟,并将该系统时钟同步到协调世界时(Universal Time Coordinated, UTC)时间标准.假设在 04:31:10 与 04:31:11 两个时刻之间有两个事件 E_1 和 E_2 ,放大这个时间周期.事件 E_1 的系统时钟上升沿时刻 t_{R+1} 已知,则事件 E_1 时刻为 $t_{R+1} - \Delta T_1$,同样的,事件 E_n 时刻为 $t_{R+n} - \Delta T_n$.显然,事件时刻测量即是对相应间隔 ΔT_n 的测量,利用 TDC 芯片就可以得到这个测量值.经过实际观测验证,事件计数器的计时精度小于 20 ps,最大重复速率达到 2 kHz.

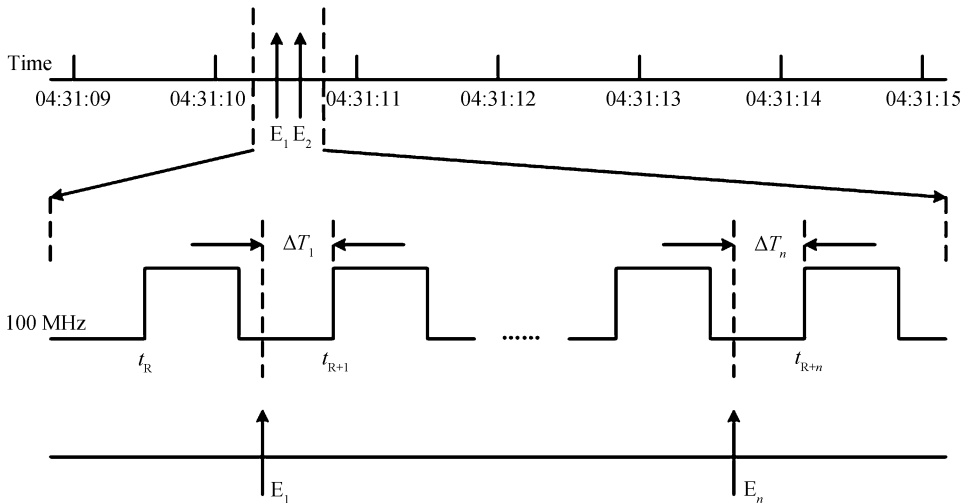


图 7 事件计数器原理
Fig.7 Principle diagram of event timer

1.4 距离门

单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)是 SLR 测距系统接收回波信号的重要器件,SPAD 通过雪崩效应探测信号强度微弱、速度快的回波光子信号,与此同时其工作特性还会带来大量的噪声^[15].为了解决噪声问题,通常采用一种时间滤波技术——距离门.距离门表示采集回波信号的时间范围,这个范围越小,进入 SPAD 的噪声也越少.

在 kHz 激光测距系统中,采用 FPGA 实现距离门功能.其原理如图 8 所示.图中,当 T_1 时刻取出后,队列向前移动, T_n 时刻将替换到原来的 T_{n-1} 时刻的位置,如此周而复始.

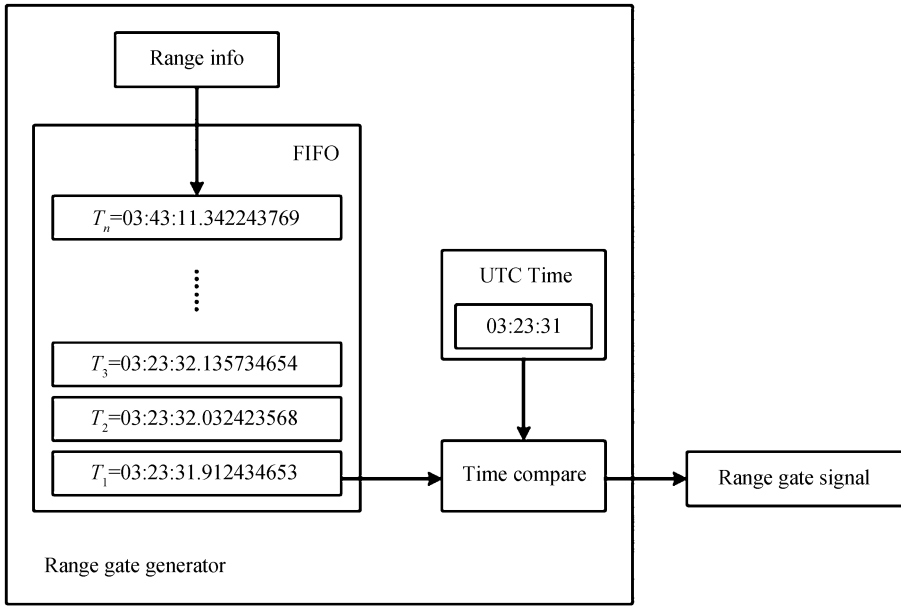


图 8 距离门实现原理

Fig.8 Principle diagram of range gate generator

首先需将该功能模块时钟同步到 UTC 时间标准,激光脉冲发射后,事件计数器记录发射时刻,按照卫星预报信息,可以计算出回波信号的返回时刻,将其存入 FPGA 芯片中的先进先出(First In First Out, FIFO)队列中,将 UTC 时间和 FIFO 中的时刻值进行比较,当符合判定条件后,发出距离门信号,打开 SPAD 接收回波信号.经测试,距离门的最高重复频率达到 10 kHz,分辨率达到 2 ns.

2 观测结果及比较分析

2.1 TROS1000 观测结果

图 9 是 2019 年 9 月 19 日 13 点 59 分(UTC 时间)获取的一圈 Ajisai 卫星 kHz 激光测距观测结果,观测弧段共 216 s,回波点数总共 128 460 个.经过数据预处理后,有效观测点数 17 369 个,单次精度 0.9 cm,有效回波率大约 13.5%.图中黑色区域是接收回波信号区,其中水平明亮的数据线为自动识别出的回波信号.这圈数据也是在我国西部获取的第一圈 kHz 激光测距数据.

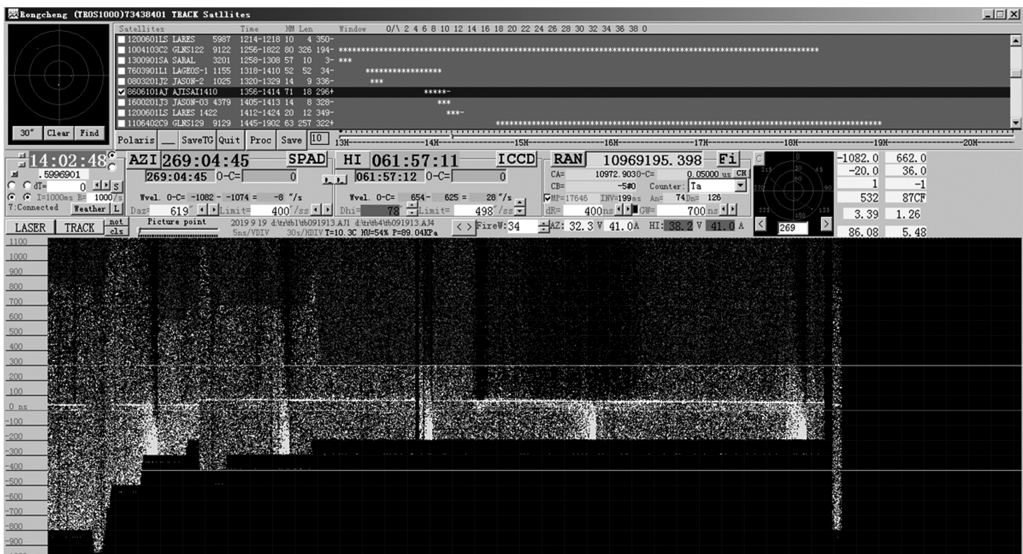


图 9 kHz 激光测距 Ajisai 卫星观测数据

Fig.9 Diagram of Ajisai data in kHz SLR

图 10 是 2019 年 9 月 19 日 16 点 49 分(UTC 时间)获取的一圈 Lageos1 卫星的数据预处理图,观测弧段 888 s,回波点数总共 321 384 个,有效观测点数 36 670 个,单次精度 0.9 cm,有效回波率大约是 11.4%.

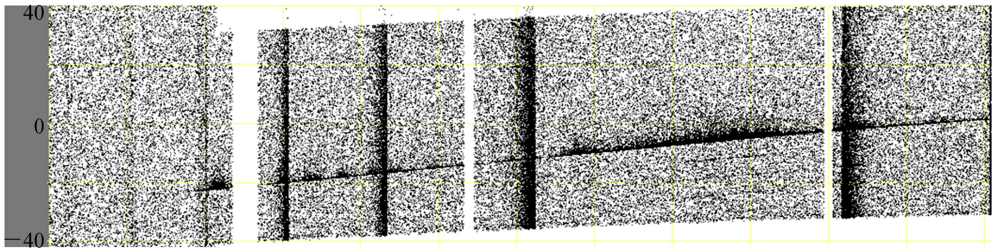


图 10 kHz 激光测距 Lageos1 卫星数据预处理
Fig.10 Preprocessing diagram of Lageos1 data in kHz SLR

2019 年 9 月 19 日, TROS1000 共获取高、中、低轨卫星 7 颗 9 圈数据, 其中, 高轨卫星 2 颗(Glonass122、Glonass129)2 圈, 中轨卫星 1 颗(Lageos1)1 圈, 低轨卫星 4 颗(Ajisai、Jason2、Jason3、Lares)6 圈, 详细情况见表 2.

表 2 kHz 激光测距预处理结果
Table 2 Preprocessing result of kHz SLR

UTC time	Satellite	Orbit altitude/km	Valid echo	RMS precision/mm	Arc length/s	Valid echo rate/%
2019-09-19 13:59	Ajisai	1 485	17 369	9	216	13.5
2019-09-19 14:04	Glonass122	19 140	954	19	642	1.3
2019-09-19 15:18	Jason2	1 336	13 562	9	366	22.1
2019-09-19 16:01	Ajisai	1 485	15 377	14	234	21.8
2019-09-19 16:06	Jason3	1 336	8 621	10	168	29.7
2019-09-19 16:11	Lares	1 450	1 934	11	180	7.2
2019-09-19 16:15	Glonass129	19 140	3 244	16	582	5.8
2019-09-19 16:49	Lageos1	5 850	36 670	9	888	11.4
2019-09-19 17:12	Jason2	1 336	3 293	10	168	14.8

2.2 比较分析

表 3 比较了 TROS-I 与 TROS1000 两代流动 SLR 系统的性能指标. 相比 TROS-I, TROS1000 重复频率更高; 激光脉冲宽度更窄, 测距精度更高; 接收口径更大, 信号接收效率更高; 数据传输也更快.

表 3 TROS-I 与 TROS1000 性能指标比较
Table 3 Compare with TROS-I and TROS1000

	TROS-I	TROS1000
Observation time	Night	Day and night
Track method	Analog digital hybrid	Digital
Laser type	Solid-state dye	Diode
Repetition rate/Hz	1~10	1 000
Pulsewidth/ps	30~50	10~15
Receiving aperture/cm	38	100
Communication port	Serialport	Network

表 4 是 TROS 于 2003 年 5 月 15 日在乌鲁木齐水磨沟地震台获取的 11 圈 10 Hz 激光测距预处理结果. 对比前后两次在西部地区的 SLR 激光测距结果, kHz 激光测距的优势明显: kHz 激光测距的单次精度优于 2 cm, 部分圈数的单次精度优于 1 cm, 10 Hz 激光测距的单次精度大于 2.7 cm, 部分圈数的单次精度甚至超过 3.5 cm; 虽然 10 Hz 激光测距的回波率更高, 但由于 kHz 激光测距技术特点的原因, 其有效回波点数远大于前者; 表 2 和表 4 对比显示, 采用更窄脉冲宽度的激光测距方式, 也是导致 kHz 激光测距单次精度更高的重要因素, 这一点与长春 SLR 站及昆明 SLR 站的相关研究结论一致^[16-17].

表 4 10 Hz 激光测距预处理结果
Table 4 Preprocessing result of 10 Hz SLR

UTC time	Satellite	Orbit altitude/ km	Valid echo	RMS precision/ mm	Arc length/s	Valid echo rate/%
2003-05-15 14:11	Topex	1 350	511	40	245	51
2003-05-15 14:28	Ajisai	1 485	600	50	418	56
2003-05-15 15:11	Lageos2	5 625	75	38	656	43
2003-05-15 15:23	BEC	927	460	32	242	55
2003-05-15 16:00	Topex	1 350	248	37	247	51
2003-05-15 16:24	Ajisai	1 485	734	38	476	57
2003-05-15 16:57	GFO1	800	224	37	363	56
2003-05-15 17:13	BEC	927	271	27	297	55
2003-05-15 18:27	Ajisai	1 485	810	40	415	57
2003-05-15 18:57	Lageos2	5 625	161	30	1 264	45
2003-05-15 20:31	Ajisai	1 485	371	35	597	58

选取 SLR 专用卫星 Ajisai、Lageos1 和 Lageos2 进行比较,结果见表 5.

表 5 单位时间内两种激光测距结果对比
Table 5 Comparison of two laser ranging results in unit time

UTC time	Satellite	Repetition rate/Hz	Valid echo	Arc length/s	Valid echo per second
2003-05-15 14:28	Ajisai	10	600	418	1.44
2003-05-15 15:11	Lageos2	10	75	656	0.11
2003-05-15 16:24	Ajisai	10	734	476	1.54
2003-05-15 18:27	Ajisai	10	810	415	1.95
2003-05-15 18:57	Lageos2	10	161	1 264	0.13
2003-05-15 20:31	Ajisai	10	371	597	0.62
2019-09-19 13:59	Ajisai	1 000	17 369	216	80.41
2019-09-19 16:01	Ajisai	1 000	15 377	234	65.71
2019-09-19 16:49	Lageos1	1 000	36 670	888	41.30

表中,相比 10 Hz 激光测距,kHz 激光测距得到的低轨卫星 Ajisai 在单位时间内的有效回波点数提高了几十倍,得到的中轨卫星 Lageos1、Lageos2 在单位时间内的有效回波点数提高了几百倍.表明 kHz 激光测距比 10 Hz 激光测距更易探测到搭载合作目标的人造卫星,探测效率也更高.

3 结论

相比于固定 SLR 观测站,流动 SLR 激光测距系统提高了观测的灵活性,可以解决 SLR 观测站在我国东西部分布不均衡的现状.流动激光测距系统 TROS1000 在重复频率、测距精度、探测效率、接收效率等方面比上一代流动激光测距系统 TROS-I 提升不少,也使数据的数量与质量得到显著提高.TROS1000 将在我国西部地区更好地完成 SLR 激光测距任务.

致谢 感谢中国大陆构造环境监测网络科学工程及其工程中心领导对本工作的指导与支持.感谢中国科学院新疆天文台为本工作提供观测场地.

参考文献

- [1] GUO Tang-yong, LI Xin, TAN Ye-chun, *et al.* New generation mobile SLR system TROS-I in China[J]. *Geomatics and Infomation Science of Wuhan University*, 2006, **31**(1): 31-34.
郭唐永, 李欣, 谭业春, 等. 中国新一代流动卫星激光测距系统研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2006, **31**(1): 31-34.
- [2] GUO Tang-yong, WANG Tan-qiang. Data analysis of mobile SLR at Beijing station[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, **22**(11): 120-123.
郭唐永, 王谭强. 流动 SLR 北京站观测结果分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, **22**(11): 120-123.
- [3] GUO Tang-yong, TAN Ye-chun, LI Cui-xiao, *et al.* First observational achievement obtained by mobile SLR in China

- [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, **22**(1): 119-124.
- 郭唐永, 谭业春, 李翠霞, 等. 我国流动 SLR 首次取得观测结果[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, **22**(1): 119-124.
- [4] SUN Jian-zhong, WANG Pei-yuan, TANG Ye-chun, *et al.* Research on transportable SLR of millimeter precision and high density data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, **25**(2): 123-126.
- 孙建中, 王培源, 谭业春, 等. 毫米级高数据密度流动卫星激光测距仪的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, **25**(2): 123-126.
- [5] GUO Tang-yong, WANG Pei-yuan, LI Xin, *et al.* Experimental result of high repeated rate laser ranging[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, **28**(6): 137-138.
- 郭唐永, 王培源, 李欣, 等. 高重复频率激光测距的实测结果[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, **28**(6): 137-138.
- [6] GUO Tang-yong, WANG Pei-yuan, LI Xin, *et al.* Progress of the satellite laser ranging system TROS1000[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, **6**(1): 67-72.
- [7] LUO Qing-shan, GUO Tang-yong, ZOU Tong, *et al.* Theoretical analysis of laser retro-reflectors and experiment of laser ranging for HY-2 satellites[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(11): 114-120.
- 罗青山, 郭唐永, 邹彤, 等. HY-2 卫星激光反射器理论分析及激光测距实验[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(11): 114-120.
- [8] LUO Qing-shan. Design of micro laser retro-reflector for pico& nano-satellite and analysis of laser ranging [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2018.
- 罗青山. 皮纳微小卫星激光反射器设计及激光测距分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2018.
- [9] LI Xin, WANG Pei-yuan, ZOU Tong, *et al.* Experiment on kHz laser ranging at Wuhan Satellite laser ranging station [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(2): 367-370.
- 李欣, 王培源, 邹彤, 等. kHz 激光器在武汉卫星观测站的测距实验[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(2): 367-370.
- [10] WANG Pei-yuan, GUO Tang-yong, GAO Hao, *et al.* Key technologies implementation of high-repetition-rate satellite laser ranging[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2013, **4**(1): 51-54.
- [11] WANG Rong, GUO Tang-yong, ZOU Tong, *et al.* TDC502 time interval measurement applied to absolute gravimeter [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, **33**(S2): 74-77.
- 王荣, 郭唐永, 邹彤, 等. TDC502 时间测量在绝对重力仪中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, **33**(S2): 74-77.
- [12] ZHU Wei. Research on high-accuracy time measurement [D]. Wuhan: Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2008.
- 朱威. 高精度时间测量技术的研究[D]. 武汉: 中国地震局地震研究所, 2008.
- [13] ZHU Wei, WANG Pei-yuan, LI Xin, *et al.* Application of TDC-GPX in Satellite Laser Ranging [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, **31**(S1): 174-177.
- 朱威, 王培源, 李欣, 等. TDC-GPX 在卫星激光测距中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, **31**(S1): 174-177.
- [14] WANG Lei, GUO Tang-yong, PANG Chong. A TDC design method by improved counting method [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, **37**(9): 987-990.
- 王磊, 郭唐永, 庞聪. 一种改进的计数型 TDC 设计及实现[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, **37**(9): 987-990.
- [15] XUE Li, ZHAI Dong-sheng, LI Zhu-lian, *et al.* Signal-to-noise ratio analysis on APD arrays in laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(3): 101-108.
- 薛莉, 翟东升, 李祝莲, 等. 激光测距中 APD 阵列探测信噪比分析[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(3): 101-108.
- [16] LIU Yuan, AN Ning, FAN Cun-bo, *et al.* Echo characteristics of satellite laser ranging based on geiger mode SPAD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0828002.
- 刘源, 安宁, 范存波, 等. 基于 G-SPAD 的卫星激光测距回波特性[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0828002.
- [17] ZHAI Dong-sheng, TANG Ru-feng, LI Zhu-lian, *et al.* A study into laser pulse's impact on the precision and accuracy of the diffuse laser ranging system [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2016, **13**(3): 326-332.
- 翟东升, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 激光脉冲特性对漫反射激光测距系统精度的影响研究[J]. 天文研究与技术, 2016, **13**(3): 326-332.