

基于超导探测器的白天卫星激光测距试验与研究

李祝莲¹, 翟东升¹, 张海涛¹, 皮晓宇¹, 伏红林¹, 李荣旺¹, 李鹏飞^{1,2}, 张蜡宝³, 李语强^{1*}

1. 中国科学院云南天文台, 云南昆明 650216;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏南京 210023)

摘要: 超导纳米线单光子探测器是一种新型的单光子探测器, 灵敏度高、暗计数低且可工作于恒流模式, 对 1064 nm 波长激光具有较高的探测效率。将该探测器应用于夜间卫星和空间碎片激光测距试验, 获得了较好的观测结果。为了使超导探测器的优点在空间目标激光测距中得到充分的应用, 通过卫星白天激光测距观测试验以及对白天天空背景光实际响应输出测量等方法, 研究分析了超导探测器应用于白天激光测距的可行性。在日落前测到了约 20 000 km 距离的导航卫星 glonass134 以及低轨卫星 hy2a; 实际白天天空背景光测量时, 单光子超导探测器最高计数输出可达到约 2 MHz。结果表明, 使用超导单光子探测器作为回波探测器可实现高性能和高效率的白天激光测距系统。

关键词: 测量与计量; 激光测距; 超导单光探测器; 白天激光测距

中图分类号: P171.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190536

Superconductivity detector applied to daytime satellite laser ranging experiment and research

Li Zhulian¹, Zhai Dongsheng¹, Zhang Haitao¹, Pi Xiaoyu¹, Fu Honglin¹, Li Rongwang¹,
Li Pengfei^{1,2}, Zhang Labao³, Li Yuqiang^{1*}

1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Science, Kunming 650216, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;
3. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: As a novel single photon detector, the superconducting nanowire single photon detector can work in constant current mode with high sensitivities, low dark counts, and high detecting efficiencies for 1064 nm wavelength laser. Applying the detector to satellites with retroreflectors and space debris without any retroreflector laser ranging experiments in nighttime, a set of good observing data was obtained. To make advantages of this detector in space target laser ranging, the feasibility of employing it to daylight laser ranging system was studied and analyzed through the daytime laser ranging experiment and the actual response output measurement for daytime sky background light. The navigation satellite glonass134 (~20 000 km) and the low-orbit satellite hy2a were measured before sunset; the maximum counts output of the single-photon superconducting detector could reach up to 2 MHz during the actual daytime sky background light measurement.

收稿日期: 2020-05-01; 修订日期: 2020-06-20

基金项目: 国家自然科学基金 (U1431116, U1731112); 中国科学院重大科研装备研制项目 (ZDYZ2013-2); 中国科学院青年创新促进优秀会员 (Y201817)

作者简介: 李祝莲 (1978-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事空间目标光电探测方面的研究。Email: lzhl@yao.ac.cn

通讯作者: 李语强 (1978-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间目标光电探测方面的研究。Email: lyq@yao.ac.cn

The results show that using the superconducting single photon detector as echo detector can realize a high performance and high efficiency daytime laser ranging system.

Key words: measurement and metrology; laser ranging; super-conduct single photon detector; daytime laser ranging

0 引言

超导纳米线单光子探测器 (Superconducting Nanowire Single Photon Detector, SNSPD) 是一种利用超导纳米膜条进行光子检测的高灵敏光子探测器, 作为一种高性能的单光子探测器, 它具有单光子灵敏度、高计数率、低暗计数和低时间抖动等方面的优点, 已被广泛应用于量子密钥分发、光量子计算、激光通信、光纤传感以及激光雷达等技术^[1-3]。

卫星激光测距的原理是通过测定激光脉冲在地面观测站与卫星之间的往返时间间隔, 并结合光速计算得到地面观测站到卫星的距离^[4]。因回波信号微弱, 尤其是月球激光测距, 回波在亚单光子量级^[5], 因此, 激光测距系统需要配备单光子灵敏度的回波信号探测器。结合单光子探测技术的发展, 多年来大多数测距站均采用半导体单光子探测器作为回波光子探测器, 例如, 微通道板 MCP、带时间温度补偿的单光子探测器 C-SPAD 等^[6]。

跟 532 nm 波长相比, 1064 nm 波长激光具有产生时不需要倍频晶体、大气透过率高和在相同功率下回波光子数更多等优点, 故 1064 nm 波长激光测距技术近年来被应用到了月球和空间碎片激光测距中。另外, 1064 nm 波长激光因不可见而有利于进行可见光背景噪声滤除, 所以有利于白天激光测距。然而上述单光子探测器因在该波长处量子效率极低 (<1%), 故不再适用。鉴于超导单光子探测器在 1064 nm 波长的较高探测效率 (>60%), 国内研究人员将其应用于空间目标激光测距系统, 并开展了大量观测试验: (1)2015 年在上海天文台应用中国科学院上海微系统与信息技术研究所研制的 SNSPD 进行了卫星激光测距试验, 测到了 Lares 测距卫星回波数据, 激光波长 532 nm, 测量精度到~8.0 mm, 该星距离地面测距站约 3 000 km^[7-9]。(2) 同年, 在云南天文台采用南京大学研制的 SNSPD 开展了激光测距试验, 最远探测到了放置在 19 km 处地面靶的回波数据, 测距波长是 532 nm^[10]。(3)2016 年, 云南天文台开展了基于超导探测

器的 1064 nm 波长的卫星激光测距试验, 最远测到了 20000 km 的导航卫星回波数据^[11]。(4) 2017 年, 云南天文台开展了基于超导探测器的 1064 nm 波长的空间碎片测距试验, 亦测到了大量空间碎片的回波数据。上述试验结果说明 SNSPD 在激光测距领域中具有很好的应用前景。

超导单光子探测器采用光纤耦合方式将回波信号引入探测器, 这有利于抑制背景噪声对单光子探测器的影响。同时, 超导单光子探测器遇较强光则会主动脱离超导状态, 从而大大减小了探测器被强光损坏的概率。因此, 理论上, 具备单光子灵敏度的 SNSPD 应用于白天激光测距系统将获得很好的测量结果。论文通过中国科学院云南天文台现有的激光测距试验平台, 分析研究了将 SNSPD 应用于白天激光测距系统的可行性并进行测距卫星白天激光测距观测试验。这对将来实现基于 1064 nm 激光波长和超导探测器的测距卫星白天常规激光测距观测、空间碎片白天激光测距以及月球白天激光测距具有重要意义。

1 试验平台

中国科学院云南天文台于 2016 年建立了异地收发 1064 nm 激光测距平台, 图 1 为其示意图, 53 cm 双筒望远镜发射激光, 1.2 m 望远镜接收激光回波光子, 两

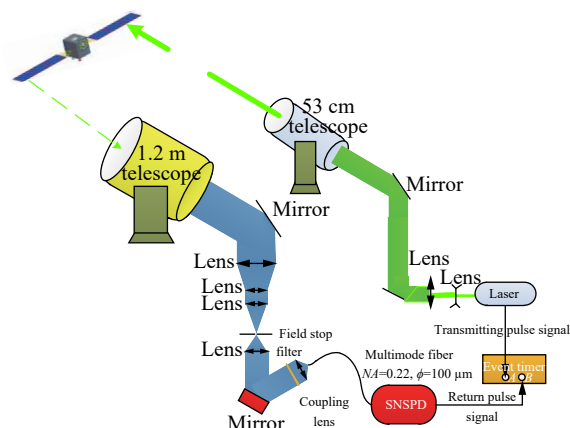


图 1 试验平台

Fig.1 Testing platform

台望远镜距离约 30 m^[12]。试验平台主要参数如表 1 所示,发射系统望远镜有效口径为 510 mm,激光器单脉冲能量约为 400 mJ,波长为 1 064 nm,重复频率为 100 Hz;接收系统望远镜有效口径为 1 060 mm,单光子超导探测器对 1 064 nm 波长激光的探测效率优于 60%,恢复时间少于 50 ns。

表 1 试验平台主要参数

Tab.1 Main parameters of testing platform

Item	Value
Transmitting telescope diameter/mm	510
Receiving telescope diameter/mm	1 060
Laser wavelength/nm	1 064
Laser pulse energy/mJ	400
Frequency/Hz	100
Detecting efficiency of SNSPD(@1064 nm)	>60%
Dead time/ns	<50

激光测距时,激光器输出的激光通过 53 cm 双筒望远镜 1 级扩束系统后再经 E 镜、D 镜、C 镜、B 镜以及 A 镜等五面反射镜依次反射至望远镜副镜,再经望远镜主副镜完成两级扩束后发射至空间目标;被空间目标反射回地面测站的少部分光子信号进入 1.2 m 望远镜的接收主副镜,然后被其反射至分光镜、反射镜以及缩束系统后从光纤耦合进入超导单光子探测器。

图 2~4 分别显示了使用上述试验平台在夜间观测到的 Beaconc 激光测距卫星、compassi6b 北斗卫星以及空间碎片 22 803 的激光测距回波信号情况,横坐标为时间,单位为 s,纵坐标为空间目标实测距离与其轨道预报距离之差,单位为 ns。观测试验中,探测器工作于无门控的自由模式。

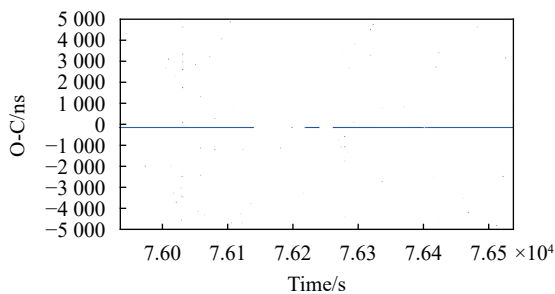


图 2 Beaconc(~1 000 km) 激光测距卫星回波信号

Fig.2 Beaconc(~1 000 km) laser ranging satellite echo signal

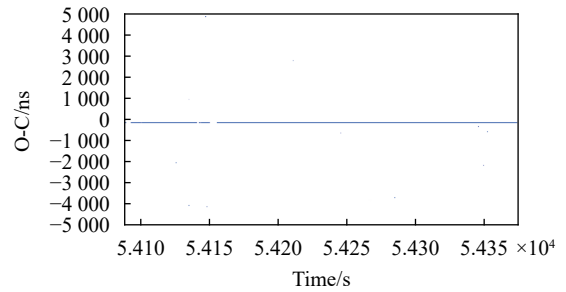


图 3 北斗卫星 compassi6b (~36 000 km) 测距回波信号

Fig.3 Beidou satellite compassi6b (~36 000 km) ranging echo signal

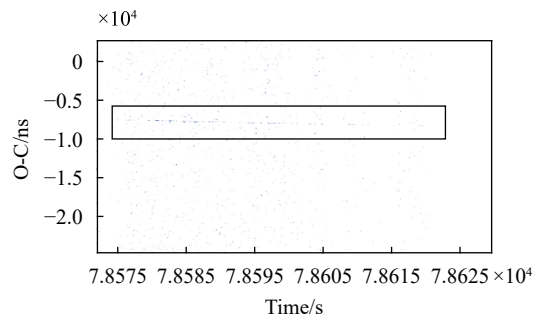


图 4 空间碎片 22 803 (~850 km, 10 m² RCS) 的回波信号

Fig.4 Echo signal of space debris 22 803 (~850 km, 10 m² RCS)

2 白天卫星测距试验

结合单光子超导探测器的优点和考虑白天激光测距的强背景噪声等特点^[13-14],2018 年 12 月 22 日、2018 年 12 月 23 日以及 2019 年 1 月 24 日,使用上述测距试验平台进行了基于超导单光子探测器的晨昏卫星激光测距试验,并获得了部分卫星的白天激光测距回波信号,观测结果如表 2 所示。

表 2 获得回波信号的部分卫星

Tab.2 Part of satellites receiving echo signal

Date	Satellites	Sunset epoch/s	Start epoch/s	$\Delta t/s$
2018-12-22	glonass122	66 297	66 698	401
2018-12-23	glonass134	66 328	65 867	-461
2018-12-23	Beaconc	66 328	67 034	706
2018-12-23	hy2a	66 328	67 444	1 116
2019-01-24	hy2a	67 646	67 498	-148
2019-01-24	glonass103	67 646	67 811	165

由表 2 可知,2018 年 12 月 23 日 18: 17: 47 开始测到导航卫星 glonass134 (约 20 000 km) 的一段观测数据,这天日落时间为 18: 25: 28^[15],因此是在日落前 461 s 开始观测到数据;2019 年 1 月 24 日在日落前

148 秒开始测到测距卫星 hy2a (约 1 000 km) 的一段观测数据。图 5 和图 6 分别是 glonass134 和 hy2a 卫星的白天跟踪测距界面图。横坐标为时间, 单位为 s, 纵坐标为空间目标实测距离与其轨道预报距离之差, 单位为 ns。

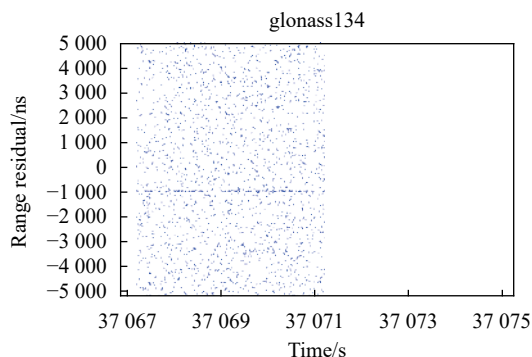


图 5 glonass134(~20 000 km) 激光测距界面截图

Fig.5 glonass134(~20 000 km) laser ranging interface screenshot

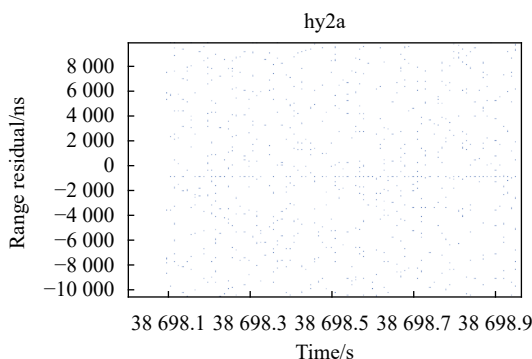


图 6 hy2a(~1 000 km) 激光测距界面截图

Fig.6 hy2a(~1 000km) laser ranging interface screenshot

图 7 为 2018 年 12 月 22 日观测到 glonass122 后于 18: 38: 39 用相机拍摄的天空背景亮度图, 当天日落时间为 18: 24: 57, 因此是日落后 13.7 min 分拍的。



图 7 天空背景亮度图

Fig.7 Sky background brightness map

由于发射望远镜和接收望远镜相隔约 30 m, 且白天卫星不可见, 很难实现高精度同步指向, 因此, 每次试验时均花了大量的时间进行目标搜索, 但在不做任何信号衰减时超导单光子探测器在试验时间内均能正常工作, 观测结果表明单光子超导探测器可应用于白天空间目标激光测距。

3 白天天空背景光响应测量

保持激光测距接收系统在夜间测距的状态, 2018 年 12 月 21 日白天使用其对白天天空背景光响应输出进行了测量, 以进一步验证超导探测器应用于白天激光测距中的可行性。这一天日出时间为早上北京时间 7: 48: 52, 日中时间为北京时间 13: 06: 39^[15]。测量试验按以下几步完成:

(1) 将望远镜定点指向东边日出的方向, 具体是: 方位角为 90.5°, 俯仰角为 42.9°, 单光子超导探测器信号输出每秒计数情况如图 8 所示, 随着太阳的升高输出信号快速增加, 当计数达到约 2 MHz 时, 超导探测器失去了超导状态, 此时太阳的方位为 117.3°, 俯仰为 2.6°。

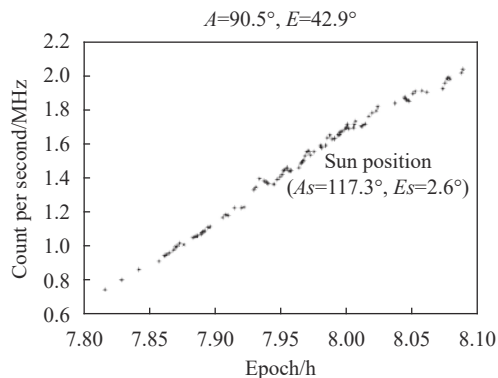


图 8 北京时间 7: 48: 59 至 8: 5: 18 超导探测器输出

Fig.8 SNSPD output at 7:48:59 to 8:5:18 Beijing time

(2) 保持望远镜方位角 90.5° 不变, 改变其俯仰角从 42.9° 到 52.9°、63.1° 以及 79.9°, 图 9 为北京时间 8: 01: 21 至 8: 29: 15 的单光子超导探测器信号输出每秒计数情况, 由图可见, 每秒输出计数随着俯仰角的增加而减少。数据采集结束时太阳的方位为 120.1°, 俯仰为 7.3°。

(3) 保持望远镜俯仰角 63.5° 不变, 改变其方位角从 90.5° 到 180°、270° 以及 0.3°, 即使望远镜指向东南西北四个方向, 图 10 为北京时间 8: 20: 14 至 8: 55: 44

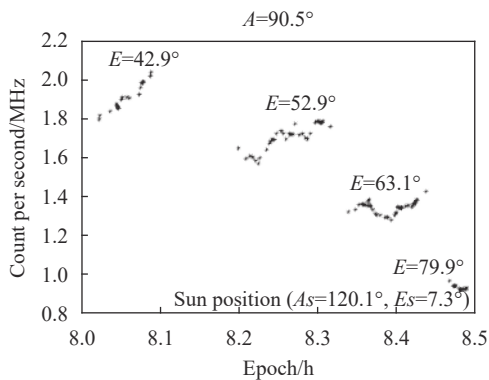


图 9 北京时间 8:01:21 至 8:29:15 超导探测器输出
Fig.9 SNSPD output at 8:01:21 to 8:29:15 Beijing time

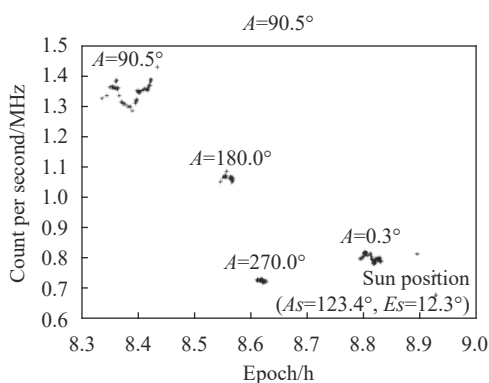


图 10 北京时间 8:20:14 至 8:55:44 超导探测器输出
Fig.10 SNSPD output at 8:20:14 to 8:55:44 Beijing time

的单光子超导探测器信号输出每秒计数情况,由图可见,探测器信号输出每秒计数值在东南两个方向的值相对较高,而西北两个方向的值相对较低。数据采集结束时太阳的方位为 123.4°,俯仰为 12.3°。

(4)使望远镜指向北边,定位到方位角 0.3°,俯仰角 63.6°,图 11 为北京时间 8:47:42 至 14:53:23 的超导探测器信号输出每秒计数情况,由图可知,探测器

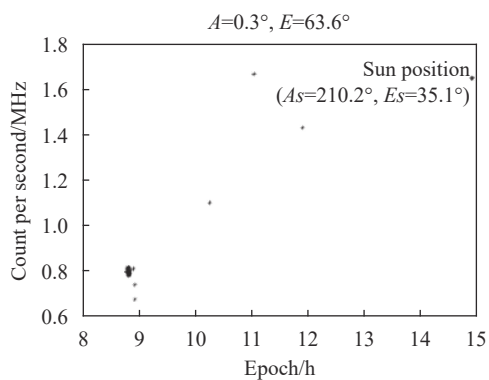


图 11 北京时间 8:47:42 至 14:53:23 超导探测器输出
Fig.11 SNSPD output at 8:47:42 to 14:53:23 Beijing time

信号输出每秒计数值低于 1.8 MHz,探测器未失去超导状态。数据采集结束时太阳的方位角为 210.2°,俯仰角为 35.1°,太阳已经过日中位置,即方位角 180.0°,俯仰角 41.6°。

测量结果表明,望远镜与太阳间方位角偏差小于 30°且俯仰角偏差小于 40°时,输入端不做任何噪声滤波处理的超导探测器将失去超导状态,其它情况下均能正常工作,也说明单光子超导探测器可应用于白天空间目标激光测距。

4 结 论

白天激光测距观测可增加空间目标测距圈数,从而使空间目标轨道覆盖范围内具有越来越短的间隙。但是由于白天天空背景噪声极强且环境温度变化范围大,所以白天激光测距技术比较复杂,实现难度大,高精度指向以及有效的噪声滤波是实现该技术的必要条件。

论文结合单光子超导探测器的特点及其在激光测距系统中的夜间观测应用情况,在云南天文台 1.2 m 望远镜 1 064 nm 波长激光测距试验平台开展了基于超导探测器的卫星白天激光测距试验与研究,从卫星白天激光测距试验情况以及白天背景噪声的测量结果可见,超导单光子探测技术有利于空间目标白天激光测距—恒流工作模式可降低对空间目标的距离预报精度要求;低暗计数又可以减少噪声滤波系统的复杂度;而且遇强光时还会通过失去超导态而实现自我保护。当然,基于无门控的恒流工作模式将使得单位时间内因被噪声触发而产生大量输出信号,从而增加了后端事件计时器的负担。因此,下一步笔者等将研究数据快速采集和处理新方法以及对输入信号进行噪声滤波处理的方法。

参考文献:

- [1] Zhang Labao, Kang Lin, Chen Jian, et al. Fabrication of superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(3): 038501. (in Chinese)
 - [2] You Lixing, Shen Xiaofang, Yang Xiaoyan. Single photon response of superconducting nanowire single photon detector [J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54(16): 2416-2420. (in Chinese)
- 尤立星, 申小芳, 杨晓燕. 超导纳米线单光子探测器的单光子响应[J]. *科学通报*, 2009, 54(16): 2416-2420.

- [3] You Lixing. Status and prospect of superconducting nanowire single photon detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1212001. (in Chinese)
- [4] Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrodynamics[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Publishing House, 2000: 91-118. (in Chinese)
- [5] Xiong Yaoheng. Research on a new technical method for the lunar laser ranging [J]. *Publication of the Yunnan Observatory*, 2002(01): 73-74. (in Chinese)
- [6] International Laser Ranging Service. Kunming: Site Log [EB/OL].[2017-01-19].https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/network/stations/active/KUN2_siteolog.html.
- [7] Zhang Zhongping, Meng Wendong, Zhang Haifeng, et al. Demonstration SLR experiment using superconducting nanowire single photon detector at 532 nm[C]//2015 ILRS Technical Workshop, 2015.
- [8] Deng Huarong, Wu Zhibo, Tang Kai, et al. 2015 Shanghai astronomical observatory satellite laser ranging observation report [J]. *Annals of Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences*, 2016, 37: 21-32. (in Chinese)
- [9] Li Hao, Chen Sijing, You Lixing, et al. Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3535.
- [10] Xue Li, Li Ming, Zhang Labao, et al. Long-range laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 071201.
- [11] Xue Li, Li Zhulian, Zhang Labao, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1064 nm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3848-3851.
- [12] Zhai Dongsheng, Li Yuqiang, Xu Rong, et al. Design and realization of single telescope transmitting and twin receiving laser ranging system at yunnan observatories [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2017, 14(3): 310-316. (in Chinese)
- [13] Yang Fumin, Xiao Zhikun, Chen Wanzhen, et al. Design and measurement results of daytime satellite laser ranging system [J]. *Science in China(Series A)*, 1998(11): 1048-1056. (in Chinese)
- [14] Kang Wenyun, Song Xiaoquan, Wei Zhen. Weak signal detecting method of laser ranging for space target in daytime [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3026-3029. (in Chinese)
- [15] Convenience Inquiry Network. Kunming sunrise and sunset timetables[EB/OL].[2019-11-05].https://richurimo.51240.com/kunming_time_2018_12_richurimo/.