

激光与光电子学进展

基于 532 nm 波长的空间碎片白天激光测距 研究与试验

李祝莲^{1,2}, 翟东升^{1,2*}, 汤儒峰¹, 张海涛¹, 李荣旺^{1,2}, 皮晓宇¹, 伏红林¹, 李语强^{1,2}

¹中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

²中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210023

摘要 为了提高中国科学院云南天文台 1.2 m 望远镜激光测距平台对空间碎片的监测能力,开展了白天空间碎片激光测距技术与方法研究。首先,分析了利用云南天文台现有的 1.2 m 望远镜激光测距试验平台开展白天空间碎片激光测距的可行性。然后,对白天空间碎片激光测距关键问题进行了分析并提出解决措施。通过白天空间碎片激光测距试验,获得了一部分空间碎片激光测距数据,所测量空间碎片的雷达散射截面范围为 9.0~20.0 m²、近地点范围为 400~900 km、远地点范围为 500~900 km。结果表明:云南天文台空间碎片激光测距平台具备空间碎片白天激光测距的潜力,可为后续开展全天时空间碎片激光测距研究提供技术支持。

关键词 测量; 激光测距; 空间碎片白天激光测距; 单光子探测技术

中图分类号 P228.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1112003

Research and Experiment on Space Debris Daytime Laser Ranging Based on 532 nm Wavelength

Li Zhulian^{1,2}, Zhai Dongsheng^{1,2*}, Tang Rufeng¹, Zhang Haitao¹, Li Rongwang^{1,2},
Pi Xiaoyu¹, Fu Honglin¹, Li Yuqiang^{1,2}

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, Yunnan, China;

²Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences,
Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract Laser ranging technology is crucial for the monitoring and early warning of space debris. To improve the monitoring capability of the 1.2 m telescope laser ranging platform of the Yunnan Observatory of the Chinese Academy of Sciences for space debris, the daytime laser ranging technology and method for space debris monitoring were studied. First, the feasibility of using the existing 1.2 m telescope laser ranging platform of the Yunnan Observatory to perform daytime space debris laser ranging was analyzed. Then, the key problems associated with space debris laser ranging during daytime were analyzed and solutions were proposed. Based on a daytime space debris laser ranging experiment, some space debris laser ranging data were obtained. The cross section of the measured space debris radar ranges from 9.0 m² to 20.0 m², the perigee ranges from 400 km to 900 km, and the apogee ranges from 500 km to 900 km. Results show that the space debris laser ranging platform of the Yunnan Observatory can perform space debris laser ranging during daytime, which can provide technical support for subsequent research on space debris laser ranging.

Key words measurement; laser ranging; space debris daylight laser ranging; single photon detecting technique

收稿日期: 2021-07-13; 修回日期: 2021-07-24; 录用日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(U1431116, U1631134, U1731112, 11703086)

通信作者: *zdsxy@ynao.ac.cn

1 引言

空间碎片激光测距技术是最新发展起来的一项新的空间目标跟踪、监测技术,具有测量速度快、测距精度高等优点,因此对空间碎片轨道精确测定、精密编目及监测预警等多方面具有重要作用。与卫星激光测距类似,空间碎片激光测距也是通过测量激光脉冲从地面观测站到空间碎片之间的往返时间(Δt),结合光速(c)计算出地面观测站与空间碎片间的距离(R),即 $R = (\Delta t \times c) / 2$ 。

大多数空间碎片不带后向角反射器,仅有极少数回波光子返回地面测站。空间碎片轨道预报偏差比较大,因此,对测距系统的探测能力提出了极高的要求,目前国际上仅有少数台站实现了该技术。

2002年10月,Greene等^[1-2]在华盛顿第13届国际激光测距会议上作了题为“Laser Tracking of Space Debris”的报告,介绍了空间碎片激光测距的研究进展,能够实现对1250 km、大小为15 cm空间碎片开展漫反射激光测距。奥地利Graz卫星激光测距站采用532 nm Nd:YAG激光器,脉冲重复频率为1 kHz,脉冲宽度为10 ns,脉冲能量为25 mJ,于2012年实现了空间碎片激光测距^[3]。2008年7月,中国科学院上海天文台成功实现了空间碎片激光测距试验,激光器重复频率为20 Hz,功率为40 W @ 532 nm^[4-5];中国科学院云南天文台于2010年建立了10 Hz漫反射激光测距系统,并获得了空间碎片激光测距数据^[6];中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站于2014年实现了空间碎片

激光测距技术,测距频率为500 Hz^[7-8]。近年来,国际上还有一些卫星激光测距台站也在开展空间碎片激光测距技术研究,如德国Wettzell站、波兰Borowiec站^[9]等。

目前空间碎片激光测距主要在晨昏时间段且目标可见时进行,观测弧段较少,实现空间碎片白天激光测距技术则可获得更多的观测数据。然而白天天空背景噪声比夜晚高约 10^6 倍^[10],对于回波信号极其微弱的空间碎片激光测距系统,实现白天观测将面临着更高的技术挑战。目前,仅奥地利Graz测站获得了初步的观测结果^[11-12]。本文基于云南天文台1.2 m望远镜的激光测距试验平台,分析并解决空间碎片白天激光测距关键技术,开展白天空间碎片激光测距研究与试验,以提升该测距平台对空间碎片的监测能力。

2 1.2 m 望远镜系统白天测距能力分析

2.1 白天卫星激光测距

云南天文台于2010年建立了1.2 m望远镜10 Hz共光路空间碎片漫反射激光测距系统^[6],对系统升级优化后,2018年该系统具备了月球激光测距能力^[13],对预报较准的测距卫星(携带激光角反射器)可开展白天激光测距。图1为2019年8月12日7时50分对Galileo 204导航卫星的白天激光测距距离残差图,横坐标为激光发射时刻,纵坐标为测量距离与预报距离之间的偏差(残差),测距结束时太阳高度角为14.42°。因为目标轨道预报较准,所以测距过程中没有对卫星成像。

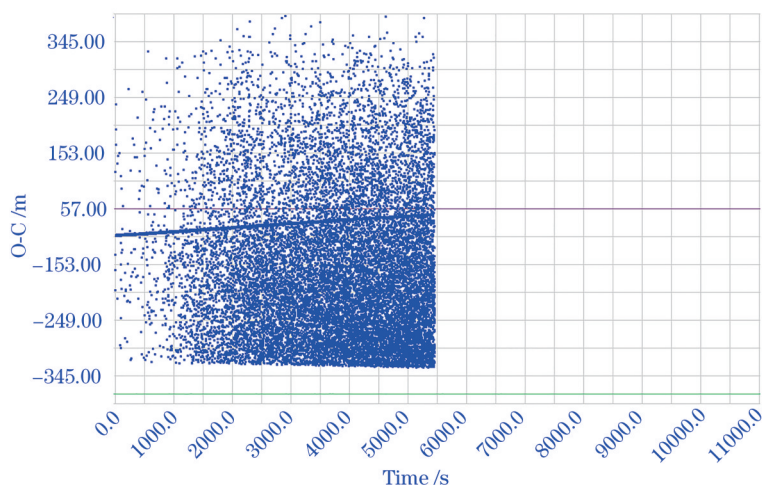


图1 Galileo 204(20000 km)卫星白天激光测距距离残差图

Fig. 1 Daytime laser ranging residual of Galileo 204 (20000 km) satellite

对测量数据进行分析结果如图 2 所示(横坐标时间为 UTC),统计每 5 s 内的噪声数据以及信号数据个数,信噪比(SNR)为相同时间内信号个数与噪声个数的比值。在开始测距时,太阳高度角为一 5.67°,噪声极少,信噪比高;随着太阳的升高,噪声越来越多,信噪比快速减小,到测距结束时信噪比已降至 0.5 以下,但仍能探测到回波信号。

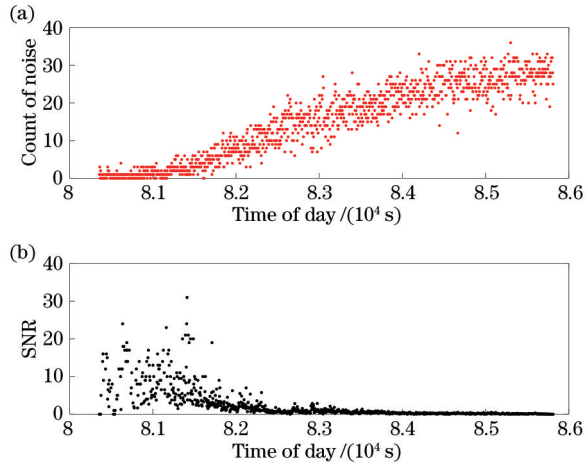


图 2 Gallileo204 卫星白天激光测距数据分析结果。

(a) 每 5 s 的噪声统计; (b) 每 5 s 的 SNR 值

Fig. 2 Analyzing results of the Gallileo204 satellite daylight laser ranging data. (a) Noise statistics every 5 s; (b) SNR value every 5 s

从图 1 和图 2 可见,测距结束时噪声较强、信号变弱,但系统能正常工作。因此,理论上,可使用该系统开展空间碎片白天激光测距研究与试验。

2.2 白天空间碎片探测能力分析

系统使用的激光波长为 532 nm,每个激光脉冲能量 $E_0 \approx 3.0$ J,发射系统光路的透过率 $T_e \approx 0.5$,测距系统发散角 $\theta_e \approx 8''$,白天大气单程透过率 $T_a = 0.3^{[10]}$,激光在发射处的光束直径 $D = 1060$ mm,假设空间碎片反射率 $\rho = 0.16$,并在 2π 立体角内发生漫反射,接收光路的光学效率 $T_r \approx 0.3$,空间碎片面积为 A_m ,探测器量子效率 $\eta = 0.6$;记 N 为每焦耳激光光子数, A_r 为接收镜面有效面积, R 为测站到空间碎片的距离,则根据激光雷达测距方程^[13-14]系统接收到的平均光电子数 N_r 为

$$N_r = \frac{E_0 N T_e A_m \rho A_r T_r \eta T_a^2}{2\pi^2 \left(\frac{\theta_e}{2} R + \frac{D}{2} \right)^2 R^2} \quad (1)$$

根据式(1),空间碎片距离 R 为 500 km, 800 km, 1000 km 时,每发射一个激光脉冲,返回到系统的平均光子数与空间碎片尺寸间的关系如图 3

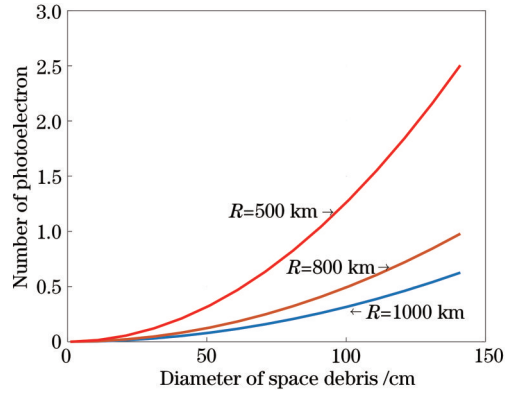


图 3 测距系统回波光电子数估算

Fig. 3 Returned photoelectron number estimation of ranging system

所示。由图 3 可知,当空间碎片直径为 100 cm、离地面距离为 1000 km 时,每个脉冲可产生的平均回波光电子数约为 $N_r = 0.3214$ 。根据探测器光敏面产生光电子的光电效应服从泊松分布可知,探测器获得 1 个以上光电子的概率为 $P_D(K \geq 1) = 1 - \exp(-0.2609) = 0.27$ 。10 Hz 激光测距频率,每秒探测成功次数为 $10 \times 0.23 \approx 2$ 次。可见系统具有对距离 1000 km、米级空间碎片的白天激光测距能力。

3 白天空间碎片关键问题

3.1 单光子探测器时间滤波

滤除白天背景噪声、提高系统白天信噪比是成功实现空间碎片白天测距的必备条件之一。白天强背景噪声将使得回波信号已经极其微弱的空间碎片测距系统的信噪比更低,导致探测成功概率减小。

在白天卫星激光测距系统中,通常采用时间滤波、光谱滤波以及空间滤波等技术来抑制强背景噪声。具体方法如下:提高单光子探测器的距离门控精度和减少开门时间(200 ns)、在回波接收光路中加入 0.15 nm 带宽的窄带滤光片以及采用小孔光阑来减小接收视场。

对于空间碎片激光测距系统,因目标轨道预报精度低,回波信号很难出现在 200 ns 的开门时间内(图 1)。加长探测器开门时间可降低对空间碎片距离预报精度的需求,如图 4 所示,当探测器开门时间从 200 ns 增加到 20 μ s 时,理论上,回波信号出现在开门时间内的概率将得到很大提高;从晨昏实际观测经验来看,大部分空间碎片距离预报误差小于 20 μ s。

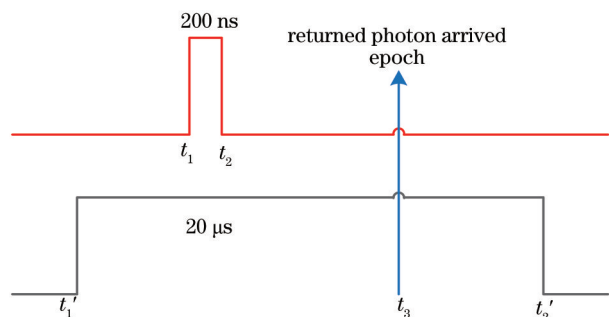


图 4 探测器开门时间加长

Fig. 4 Lengthening detector's detecting time

因此,根据噪声分布情况,在 200 ns 到 20 μs 范围内不断调整探测器开门时间,将提高空间碎片的白天激光测距成功概率。

1.2 m 望远镜激光测距系统在接收光路中,采用了低噪声高量子效率单光子雪崩探测器激光测距系统来接收从空间碎片返回的回波光子,表 1 为该探测器的主要参数。因其暗计数低,故可加长开门时间,这里开门时间约为 27 μs,该探测器门控信号如图 5 所示。加长探测器开门时间后,将降低对空间碎片轨道预报精度的要求。探测效率高,有利于探测极微弱信号。

表 1 探测器主要参数

Table 1 Main parameters of the detector

Parameter name	Value
Photosensitive area diameter / μm	500
Quantum efficiency (@532 nm) / %	>60
Dark count (@1 kHz, 10 μs window)	15
Recovery time / ns	50
Time jitter / ps	160

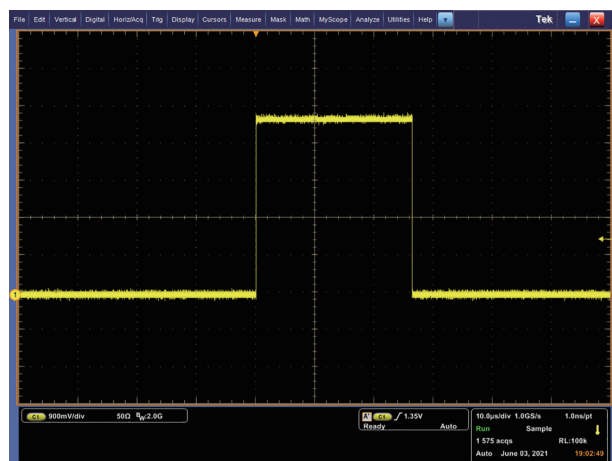


图 5 单光子探测器门控信号

Fig. 5 Gate signal of single photon detector

白天由背景噪声产生 1 个光电子以上的虚警概率 $P_{fa}(\geq 1) = 1 - \exp(-N)$, N 为背景噪声在探测器光敏面上产生的平均光电子数,其速率按 $2.7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 计^[10]。开门时间为 200 ns 时, $N = 0.54$, 虚警概率约为 $P_{fa} = 0.42$; 开门时间为 1 μs 时, $N = 2.7$, 虚警概率约为 $P_{fa} = 0.93$ 。如图 6 所示(横坐标时间为 UTC), 在 27 μs 脉宽门控信号的实际控制下,使用系统白天跟踪空间碎片,背景噪声每 5 s 有 35~45 个,探测器实际响应时间在 0~520 ns 范围内。此时,通过光谱滤波和空间滤波等方法可保证探测器更长的开门时间。

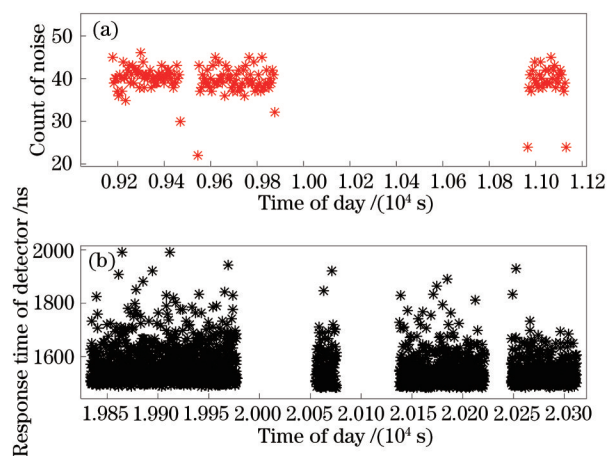


图 6 单光子探测器白天背景噪声计数和响应时间。

(a) 每 5 s 的噪声统计; (b) 门控信号宽度约 27 μs

Fig. 6 Single photon detector daytime background noise count and response. (a) Noise statistics every 5 s;

(b) gate signal width is about 27 μs

3.2 空间碎片跟踪

激光测距中,从望远镜发射的激光照射到空间碎片和被空间碎片反射回来的回波光子能进入望远镜接收视场,是对空间碎片进行成功激光测距的必要条件之一。晨昏时段激光测距时,先使用导星镜获取空间碎片初始位置,接着将其位置修正到望远镜视场中心,然后发射激光并接收反射回来的回波信号。对于 1.2 m 望远镜共光路激光测距系统,因其收发光路同轴性较好,所以将空间碎片引入接收相机视场中心即可。实现对空间碎片可见便可大幅提高白天激光测距成功概率。

1.2 m 望远镜共光路激光测距系统采用 SCMOS 相机作为目标监测光路终端接收器件^[12],对跟踪目标成像起到目标引导跟踪的作用。SCMOS 相机外形及光谱响应如图 7 所示,主要参数如表 2 所示。

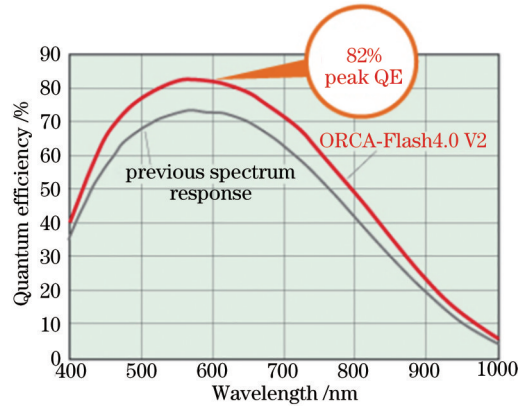


图7 CMOS相机及其光谱响应

Fig. 7 CMOS camera and its spectral response

表2 相机主要参数

Table 2 Main parameters of the camera

Parameter name	Value
Photosensitive area / (mm × mm)	13.2 × 13.2
Detecting efficiency (@500~600 nm) / %	>78
Number of pixel / (pixel × pixel)	2048 × 2048
Dark current (@-10 °C, -20 °C & -30 °C) / (pixel ⁻¹ · s ⁻¹)	0.061, 0.02, 0.006
Exposure time / s	0.001-10
Reading speed / (frame · s ⁻¹)	30-100

白天目标监视系统的 F 数为 7, 采用 650~

2500 nm 之间的截止型滤光片进行光谱滤波后实现了系统的白天成像功能, 峰值透过率为 90%。在北京时间 15 时到 16 时之间, 相同条件下分别跟踪东南西北四个方向的恒星, 如表 3 所示, 实际成像结果表明, 系统白天可探测约 5 等星。跟踪太阳附近的恒星 HIP_7999 (4.98 等星), 因相机饱和导致目标不可见。图 8 为 HIP_75097 (3.0 等星) 和 HIP_69373 (5.18 等星) 在北京时间 10 时 53 分和 11 时 47 分在相机里的成像, 此时太阳高度角分别为 36.66° 和 42.57°。图 9 为空间碎片 03598 和 06155 在 1000 ms 曝光下的成像效果。

表3 恒星白天成像数据

Table 3 Stellar daytime imaging data

Local time	Stellar code	(A, E) of the stellar / (°)	(A, E) of the sun / (°)	Exposure time / ms	Magnitude	Visible
10:19:31	HIP_7999	(120.71, 41.85)	(100.86, 48.03)	1000	4.98	No
15:18:31	HIP_117718	(277.86, 32.06)	(252.75, 56.14)	1000	5.06	Yes
15:26:10	HIP_15890	(352.53, 49.71)	(254.13, 54.64)	1000	5.15	Yes
15:30:09	HIP_37300	(88.32, 41.99)	(254.89, 53.76)	1000	5.04	Yes
15:41:47	HIP_19777	(185.14, 54.65)	(256.93, 51.25)	1000	4.87	Yes

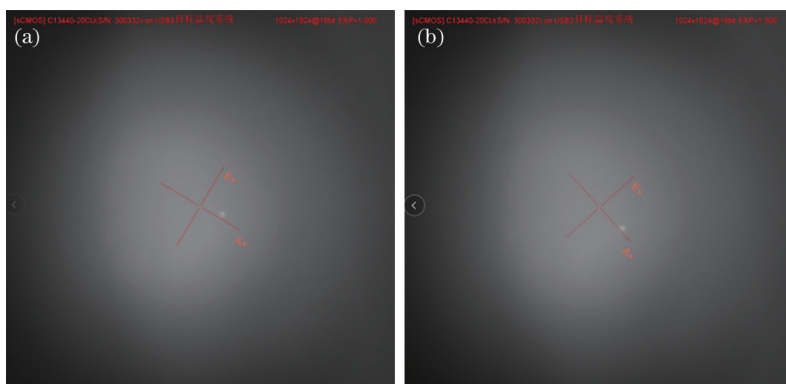


图8 恒星的白天成像图。(a) HIP_75097; (b) HIP_69373

Fig. 8 Daytime images of stellar. (a) HIP_75097; (b) HIP_69373

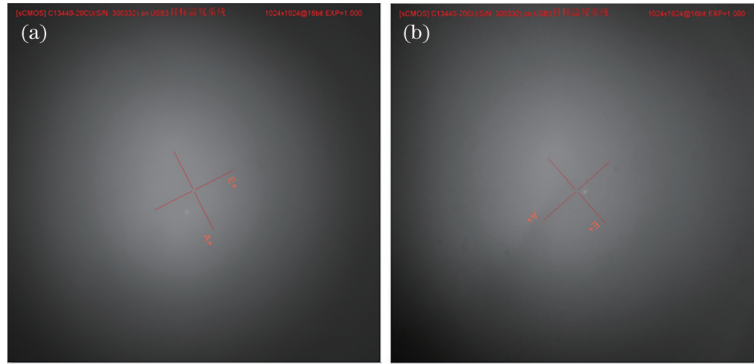


图 9 空间碎片的白天成像图。(a) 03598;(b) 06155

Fig. 9 Daytime images of space debris. (a) 03598; (b) 06155

4 空间碎片白天激光测距试验

2020 年 11 月 13 日上午成功测到了空间碎片(代号:26474)的回波数据,图 10 为所测得的距离残差图,横坐标为激光发射时刻,纵坐标为测量距离与预报距离之间的偏差。图中体现了根据回波数据搜索目标的过程,即从回波搜索到回波出现再到回波搜索。表 4 给出了测距试验中所观测到的部分

空间碎片情况,图 11 为空间碎片白天激光测距结果图。表 4 中,第 1 列为测到碎片的时间,第 2 列为碎片类型及其代号,第 3 列为日出时间^[14],第 4 列为日落时间^[15],第 5 列为测到空间碎片时的太阳相位角,第 6~8 列分别为空间碎片的近地点、远地点和雷达散射截面。

由图 11 可知,火箭体 20453 的白天激光测距回波较少,对其测量数据中的噪声数据以及信噪比进

表 4 空间碎片白天激光测距试验数据

Table 4 Experimental data of space debris laser ranging in daytime

Date (local time)	Type/code	Sunrise (local time)	Sunset (local time)	Phase angle / (°)	Perigee /km	Apogee /km	RCS /m ²
2020. 11. 13 (10:38:04)	ROCKET BODY/26474	07:23:55	—	168. 15	540	618	15. 67
2020. 11. 23 (07:31:17)	ROCKET BODY/28932	07:30:57	—	67. 09	528	653	16. 13
2020. 11. 24 (08:33:40)	ROCKET BODY/28480	07:31:40	—	105. 80	703	909	10. 77
2020. 11. 27 (07:42:07)	ENVISAT/27386	07:33:49	—	67. 80	764	766	17. 61
2021. 04. 21 (17:20:39)	TOPEX/22076	—	19:33:49	86. 95	1331	1343	8. 59
2021. 04. 22 (07:14:14)	ENVISAT/27386	06:40:02	—	41. 06	764	766	17. 61
2021. 04. 22 (07:46:33)	ROCKET BODY/06155	06:40:02	—	139. 99	629	683	13. 16
2021. 04. 22 (18:55:02)	ROCKET BODY/25861	—	19:34:17	94. 33	622	645	13. 61
2021. 04. 22 (19:16:07)	ROCKET BODY/38341	—	19:34:17	104. 17	577	655	18. 50
2021. 04. 22 (19:26:12)	ROCKET BODY/28738	—	19:34:17	102. 79	520	538	12. 75
2021. 04. 22 (19:32:00)	ROCKET BODY/28480	—	19:34:17	98. 01	703	909	10. 77
2021. 05. 04 (06:51:13)	ROCKET BODY/20453	06:30:47	—	123. 03	415	803	9. 86

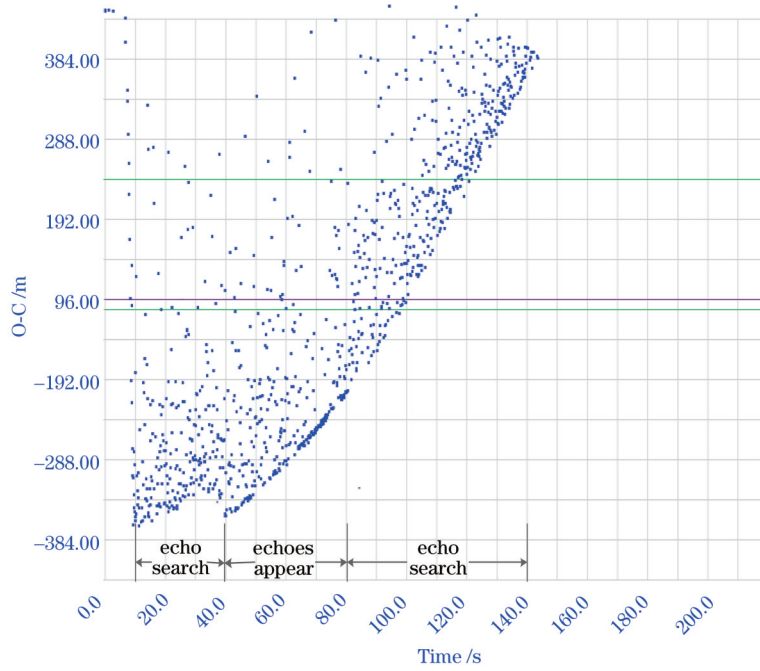


图 10 空间碎片 26474 白天测距结果

Fig. 10 Daytime ranging results of space debris 26474

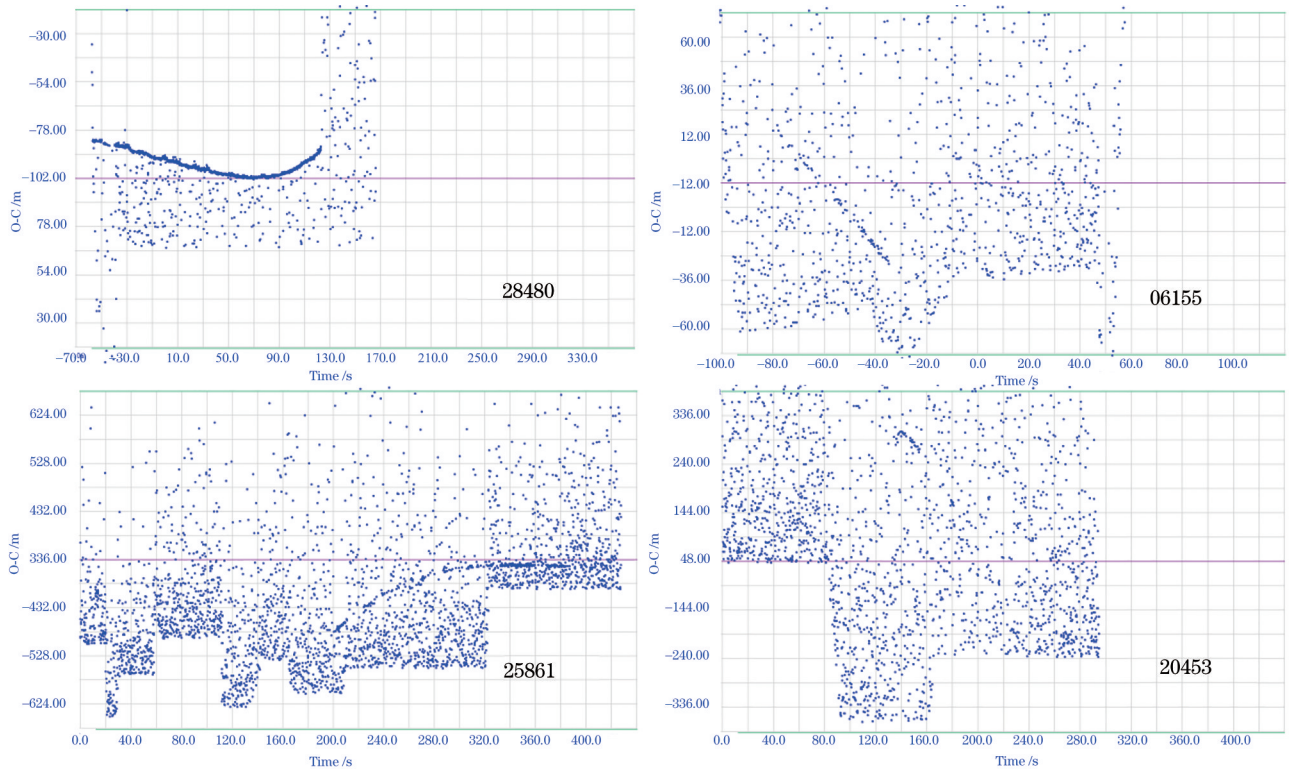


图 11 不同空间碎片白天测距结果

Fig. 11 Daytime ranging results of different space debris

行分析,统计每 5 s 内的噪声数据以及信噪比,结果如图 12 所示(横坐标时间为 UTC),噪声个数每 5 s 约 45 个,信噪比最高不到 0.3。

试验中,天亮到日出以及日落到天黑两个时

间段也测到了一些空间碎片,在表 4 中未列出。从实际观测数据结果可见,解决文中所述的关键问题对实现白天空间碎片激光测距具有重要的影响。

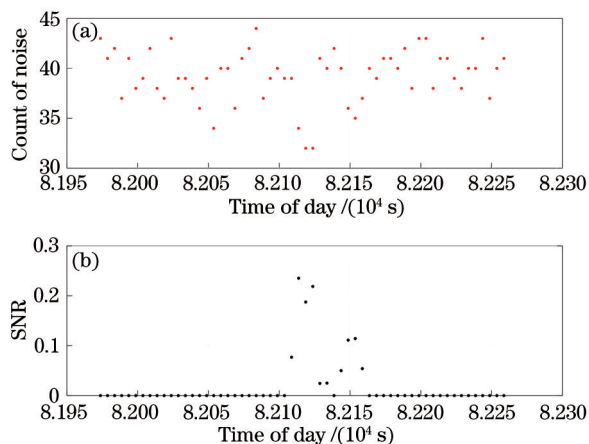


图 12 火箭体 20453 白天激光测距数据分析结果。(a) 每 5 s 的噪声统计; (b) 每 5 s 的 SNR 值

Fig. 12 Analyzing results of the 20453 rocket body daylight laser ranging data. (a) Noise statistics every 5 s; (b) SNR value every 5 s

5 结 论

自 2008 年开始, 云南天文台一直在开展空间碎片激光测距技术研究, 经过十多年的发展, 建立了 1.2 m 望远镜空间碎片激光测距平台。本文分析了该平台的白天探测能力以及实现白天空间碎片激光测距的关键技术与方法, 然后开展白天观测试验。结果表明, 1.2 m 望远镜空间碎片激光测距平台具备空间碎片白天常规激光测距的潜力。下一步我们将对系统进行优化, 例如采用 1064 nm 波长的激光、阵列单光子超导探测器等, 提高白天空间碎片激光测距成功率, 以便将来开展白天空间碎片的常规激光测距。

参 考 文 献

- [1] Greene B, Gao Y, Moore C. Laser tracking of space debris[EB/OL]. [2021-05-04]. https://cddis.nasa.gov/lw13/docs/papers/adv_green_1m.pdf.
- [2] Greene B. Laser Ranging for the precision orbit determination and remote manoeuvre of space debris [EB/OL]. (2014-10-31) [2021-05-04]. https://cddis.nasa.gov/lw19/docs/2014/Presentations/3094_Greene_presentation.pdf.
- [3] Kirchner G, Koidl F, Kucharski D, et al. Space debris laser ranging at Graz[EB/OL]. [2021-05-04]. <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc6/paper/192/SDC6-paper192.pdf>.
- [4] Zhang Z P, Yang F M, Zhang H F, et al. The experiment and results of laser ranging to space debris [EB/OL]. (2011-10-23) [2021-05-04]. <https://arxiv.org/abs/1110.2864>.
- [5] Zhang Z P, Yang F M, Zhang H F, et al. The use of laser ranging to measure space debris[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(2): 212-218.
- [6] 李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0908001. Li Y Q, Li Z L, Fu H L, et al. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 0908001.
- [7] Liu C Z. Laser ranging on space debris with the Changchun SLR station[EB/OL]. (2014-10-31) [2021-05-04]. https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/ilrw19/docs/2014/Posters/3066_Liu_poster.pdf.
- [8] 董雪, 韩兴伟, 宋清丽, 等. 空间碎片激光测距系统研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(S2): 40-45. Dong X, Han X W, Song Q L, et al. Research of space debris laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): 40-45.
- [9] Lejba P, Suchodolski T, Michałek P, et al. First laser measurements to space debris in Poland[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(10): 2609-2616.
- [10] 杨福民, 肖焱焱, 陈婉珍, 等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. *中国科学(A辑)*, 1998, 28(11): 1048-1056. Yang F M, Xiao C K, Chen W Z, et al. Design and measurement results of daytime satellite laser ranging system[J]. *Scientia Sinica(Mathematica)*, 1998, 28(11): 1048-1056.
- [11] Steindorfer M A, Kirchner G, Koidl F, et al. Daylight debris laser ranging[EB/OL]. [2021-04-05]. https://cddis.nasa.gov/2019_Technical_Workshop/docs/2019/presentations/Session4/session4_Steindorfer_presentation.pdf
- [12] Steindorfer M A, Kirchner G, Koidl F, et al. Daylight space debris laser ranging[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3735.
- [13] 李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104004. Li Y Q, Fu H L, Li R W, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan observatories[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104004.
- [14] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000. Ye S H, Huang C. *Astrogeodynamics*[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 2000.
- [15] 昆明市日出日落时刻表 2020 年 11 月份[EB/OL]. [2021-04-05]. https://richurimo.51240.com/kunming_time_2020_11_richurimo/. Sunrise and sunset schedule of Kunming November 2020[EB/OL]. [2021-04-05]. https://richurimo.51240.com/kunming_time_2020_11_richurimo/.