

高海拔 1.2m 望远镜的瓦级皮秒激光空间目标测距研究

阳 宇^{1,2}, 龙明亮^{1*}, 张海峰^{1,2,3*}, 张晓祥^{3,4}, 黄星旻^{4,5}, 丁 洁², 李 朴¹,
邓华荣¹, 张忠萍^{1,3}

- (1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
2. 河北工业大学, 先进激光技术研究中心, 天津 300401;
3. 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏, 南京 210008;
4. 中国科学院紫金山天文台, 江苏, 南京 210008;
5. 中国科学院紫金山天文台青海观测站, 青海, 德令哈, 817000)

摘要: 高精度的空间碎片测量, 可以提供更精确的碎片目标实时信息, 增强卫星对空间碎片的规避预警实效性。通过对青海口径 1.2 m 量子通信望远镜(海拔 3200 m)进行改造, 采用单脉冲能量 1.2 mJ、重复频率 1 kHz 皮秒激光开展了卫星激光测距(SLR)与空间碎片激光测距(DLR)试验, 其中合作卫星的探测范围由低轨扩展至同步轨道, 测距精度优于 2 cm; 空间碎片目标测量最远距离 1620.5 km, 雷达散射截面积(RCS)为 2.41 m², 测距精度达到 10.64 cm, 实现了单套激光器系统既可开展合作目标厘米级高精度测距, 又可实现空间碎片观测。这是目前为止国际首次采用高重复低功率激光测距系统实现对空间碎片目标高精度测量, 体现了皮秒激光及高海拔大口径望远镜测量优势, 为我国西部开展空间目标的激光测距提供参考, 以及为空间碎片激光测距系统选址与空间碎片监视能力的提升提供了有效途径。

关 键 词: 空间碎片; 卫星激光测距; 单光子探测; 高海拔; 皮秒激光
中图分类号: TN206 **文献标识码:** A

A study of watt-scale picosecond laser space target ranging for a 1.2m telescope at high altitude

YANG Yu^{1,2}, LONG Ming-liang^{1*}, ZHANG Hai-feng^{1,2,3*}, ZHANG Xiao-xiang³, HUANG Xing-min,
DING Jie², LI Pu¹, DENG Hua-rong¹, ZHANG Zhong-ping^{1,3}

- (1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. Center For Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
3. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, China Academy of Sciences, Nanjing 210008, China,
4 Zijinshan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, 5 Qinghai Observatory,
Zijinshan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Delingha, Qinghai, 817000)

Abstract: High-precision space debris measurements can provide more accurate real-time information on debris targets and enhance the effectiveness of satellite avoidance warnings for space debris. Through the modification of the 1.2 m aperture quantum communication telescope (altitude 3200 m) in Qinghai Province, the satellite laser ranging (SLR) and space debris laser (DLR) experiments were carried out by using a single pulse energy of 1.2 mJ and a repetition rate of 1 kHz picosecond laser, in which the detection range of cooperative satellites has been extended from Low Earth Orbit to Geosynchronous Earth Orbit, and the ranging accuracy was better than 2 cm. The maximum distance of space debris target measurement is 1620.5 km, the radar cross section (RCS) is 2.41 m², and the ranging accuracy reaches 10.64 cm. A single laser system can not only carry out centimeter-level high-precision ranging of cooperative targets, but also realize space debris observation. This is the first time in the world to use high repetition frequency and low power

作者简介(Biography): 阳宇(2000-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要研究领域为卫星/空间碎片激光测距, E-mail: oy17855685652@126.com
*通讯作者(Corresponding author): 龙明亮(1989-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事卫星/空间碎片激光测距技术及应用研究, E-mail: F_CEO_beifeng@126.com; 张海峰(1981-), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要研究方向为卫星/空间碎片激光测距, Email: hfzhang@shao.ac.cn

er laser ranging system to achieve high precision measurement of space debris targets, reflecting the advantages of pico-second laser and high-altitude large-aperture telescope measurement, providing reference for developing space target laser ranging in western China, and providing an effective way for space debris laser ranging system site selection and space debris monitoring capability enhancement.

Key words: space debris, satellite laser ranging, single photon detection, high altitude, picosecond laser

PACS:

引言

自 1957 年前苏联向太空发射了第一颗人造卫星,航天航空得到快速的发展。时至今日,累计发射的卫星数量已经突破了 20,000^[1]。近些年来,SpaceX, Telesat 和 Google 等企业将上万颗卫星送入太空轨道,对地球轨道资源造成巨大冲击。然而目前在轨运行可控卫星仅为 5%,废弃的卫星及空间碎片占据了大量的空间轨道资源,并伴随着后续碰撞,形成更多的碎片垃圾,这对在轨航天器会造成极大的影响^[1-4]。

截至目前,欧空局(European Space Agency, ESA)对空间碎片与航天器的碰撞预警年平均超过 50 次,碰撞避免机动在 2018 年更是达到 22 次。据美国军方统计,平均每天将有 21 次潜在的空间碰撞事故,国际空间站也曾数次变轨躲避太空垃圾^[5-6]。因此,为保证在轨航天器的稳定运行,需要通过对空间碎片的位置信息进行实时精确测量,来对碎片进行预警规避,从而降低航天器的碰撞风险。激光具有方向性好、发散角小、抗干扰强等特点,受大气传播延时影响小,适合远距离目标高精度测量,采用激光对空间碎片进行实时测量,能够有效提升碎片轨道的测定精度,对加强航天器碰撞预警能力具有重要作用。

空间碎片的测量系统普遍采用百赫兹纳秒级激光器系统,输出功率最高达百瓦量级,例如 2019 年,奥地利 Graz 测距站采用 532 nm 纳秒激光器进行碎片观测,重复频率 200 Hz,平均功率 16 W,率先在白天实现了空间碎片激光测距^[7]。欧空局最新空间碎片激光测距设备 IZN-1 采用 1064 nm 纳秒激光器,重复频率 200 Hz、脉冲能量约 180 mJ,可对 1400 km 高度的小尺寸碎片目标进行测量^[8]。国内云南天文台基于超导纳米线单光子探测技术实现了轨道高度约 1000 km、RCS 小于 0.05 m² 的空间碎片的探测,激光重频 100 Hz,输出功率约 200 W^[9]。上海天文台基于 60 cm 卫星激光测距系统,利用 532 nm 纳秒激光器实现了 1300 km 高度下 RCS 为 1 m² 的碎片观测,重复频率 200 Hz,输出功率 60 W,测量精度

为厘米级^[10]。然而,百赫兹纳秒激光器测距系统的回波密度难以继续提升,限制了碎片的测量能力。为进一步探索系统的碎片测量能力,上海天文台提出发展皮秒脉宽空间碎片激光测量技术,利用皮秒激光的大气传输特性,提高空间碎片测量的精度^[11-12]。

本文从激光雷达的回波光子理论出发,分析了高重频皮秒激光系统对探测能力的影响,并通过对青海站 1.2m 量子通信望远镜系统进行改造,配置激光发射系统、接收终端系统、以及测距控制系统等,应用单脉冲能量 1.2 mJ、重复频率 1 KHz 皮秒激光测距系统成功实现了不同轨道高度的在轨合作卫星和空间碎片激光测距试验,展现了我国西部地区在激光测距方面具有极佳的地理环境优势。

1 测距回波分析

卫星激光测距是利用激光脉冲在卫星与地面站之间往返飞行的时间来获得来两者的距离值,由于激光传输受大气的影响,其回波十分微弱,往往都是单光子量级^[13-14],根据文献[13]中的激光雷达方程,合作目标和碎片目标的回波光子数用 n_1 、 n_2 可分别表示为:

$$n_1 = \frac{16}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda \eta_q}{hc} \cdot \frac{E_t A_s A_r}{R^4 \Omega_t \Omega_s} \cdot T^2 \cdot K_t \cdot K_r \cdot \alpha \quad (1)$$

$$n_2 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\lambda \eta_q}{hc} \cdot \frac{E_t \sigma A_r}{R^4 \Omega_t^2} \cdot \rho \cdot T^2 \cdot K_t \cdot K_r \cdot \alpha \cdot \cos \beta \quad (2)$$

式中 E_t 为发射激光的能量, λ 为激光发射波长, η_q 为探测器的探测效率, A_r 和 A_s 分别表示目标有效反射面积和望远镜有效接收面积, σ 为碎片目标散射横截面积 RCS, R 为目标距离, Ω_t 和 Ω_s 分别为发射激光和经反射回波的发散角, T 为单程大气透射率, K_t 和 K_r 为发射系统和接收系统的光学效率, α 为大气衰减因子, ρ 为碎片目标反射率, β 表示碎片辐射方向与表面法线的夹角。回波光子的探测采用单光子探测器,其光电转换产生的光电子数服从泊松分布,单位时间内的回波平均点数 D 满足:

$$D = fe^{-(n_3 + n_4)}(1 - e^{-n}) \quad (3)$$

其中 n_3 、 n_4 为背景光噪声产生的光电子数以及探测

器自身暗噪声光电子数, n 为空间目标的回波光子数。结合上式(1)~(3)可以看出, 提高发射激光的重频 f 和单脉冲能量 E_p , 能够有效提升碎片探测的回波光子数, 这也从理论上解释了 KHz 纳秒激光测距系统具有更好的测距能力。

根据青海观测站测距系统, 在式(3)中待入 $\lambda=532\text{ nm}$, $h=6.6260693 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$, $c=3 \times 10^8\text{ m/s}$, 取 $\eta_q=40\%$, $T=0.6$, $A_t=1\text{ m}^2$, $K_t=K_r=0.6$, $\alpha=0.1$, $\Omega_t=30\text{ }\mu\text{rad}$, $\Omega_s=30\text{ }\mu\text{rad}$, 对于合作目标, 取距离 $R_1=36000\text{ km}$, 有效反射面积 $A_s=0.1\text{ m}^2$; 对于碎片目标, 取 $\rho=0.1$, $\sigma=1\text{ m}^2$, $R_2=1000\text{ km}$ 。夜间观测时, 噪声可近似忽略不计, 得到合作目标和碎片目标的回波光子数可分别为 $n_1=1.9838$, $n_2=1.4721 \times 10^{-4}$ 。因此采用千赫兹皮秒测量系统, 碎片目标在 RCS 为 1 m^2 对应的每秒回波平均点数 D_2 仅为 0.147, 这对于单光子探测器来说, 难以探测到来自空间碎片返回的光信号, 因而, 不得不考虑激光传输路径的效率, 特别是高海拔为激光传输带来的优势。

2 1.2 m 激光测距系统

1.2 m 空间光学望远镜位于中国青海省德令哈市紫金山天文台青海观测站, 海拔 3200 m, 主要用于量子通信及天文成像。望远镜采用 R-C 式光学设计, 具有近衍射极限的成像质量, 并通过复合跟踪控制策略, 实现高精度和高带宽的目标跟踪。此外其接收系统配备有两个接收终端接口, 分别用于量子通信和天文观测, 通过第三反射镜进行光路切换, 实现不同终端的接收。

2.1 测距系统改造

为开展空间目标激光测距实验, 需要对 1.2 m 量子实验望远镜的光路系统、发射端和接收端进行相应的改造。光路系统改造如图 1 (a) 所示, 在原有

望远镜基础上安装发射望远镜, 用于激光的准直发射, 同时增加 Coude 光路和对接光路, 引导激光束从光学平台进入发射望远镜, 经过 20 cm 的 6 倍发射望远镜发射激光。激光光源则采用中心波长为 532 nm 的皮秒激光器, 输出功率 1.2 W, 重复频率为 1 KHz, 脉冲脉宽 30 ps, 可开展卫星激光测距与空间碎片测距。接收终端箱光路如下图 1 (b) 所示, 其中探测器采用 APD 单光子探测器, 安装在 1.2 m 望远镜的天文观测焦点, 靶面 500 μm , 量子效率 40%。在完成激光测距系统的发射望远镜、接收终端、激光器等器件的安装与连接后, 再进行系统的集成调试。

2.2 激光测距过程

图 2 所示为青海 1.2 m 望远镜系统的碎片激光测距的流程框图, 从计算机控制系统下载目标轨道预报参数, 经计算机处理转换为可执行文件, 随后计算机系统根据轨道预报控制望远镜机架进行跟踪, 并在编码器的反馈下实现对测量目标的精确跟踪和瞄准, 同时由接收系统的 CCD 相机实时监测碎片位置。此时观测人员发出点火指令, 皮秒激光器输出激光信号, 通过折反式光学系统和望远镜光路系统, 发射至待测目标上, 并由光电二极管 PIN 接收激光发射脉冲信号, 经恒比定时器送至并事件计时器, 作为事件计时器的开门信号, 计算机终端记录主波时刻; 碎片目标的激光回波信号经接收系统传送至单光子探测器 APD 上, 通过电平转换关闭事件计时器, 获得回波时刻。根据激光往返飞行的时间差, 从而计算出测量目标和地面站之间的距离。为避免其他噪声光对单光子探测器产生干扰, 通过时钟信号精准控制 APD 探测器的开门时刻, 同时在探测器前面放置一块 2 nm 带宽的滤波片进行光谱滤

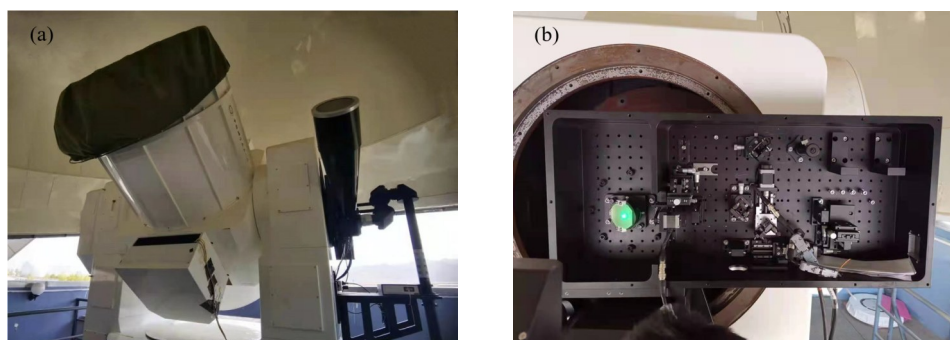


图 1 1.2 m 量子望远镜改造: (a) 发射望远镜安装; (b) 终端接收系统

Fig.1 1.2 m Quantum telescope modification: (a) Launch telescope installation; (b) Terminal receiving system

波,以滤除杂散光。

3 测量结果

通过国际激光测距服务组织(ILRS)提供的卫星目标轨道预报以及北美防空司令部(NORAD)的Space-Track 网站(网址 <https://www.space-track.org>)公布的空间碎片轨道参数获得各卫星与空间碎片目标预报,经计算机处理后输入到伺服系统,控制望远镜对目标进行跟踪,CCD 相机负责实时监控目标在相机视场中的位置,并通过微调跟踪使目标稳定在 CCD 视场中的指定位置^[10]。此时,激光信号由 6 倍发射望远镜发射,光束指向如图 3 所示,亮点为观测目标,光尖部分较为清晰,光束能够准确的对目标进行跟踪瞄准。

3.1 合作目标测量

根据卫星预报,通过计算机控制系统对望远镜微调跟踪,我们采用单脉冲能量 1.2 mJ(平均功率 1.2 W)的皮秒激光器发射激光脉冲,对多颗合作目标进行观测,测量高度涵盖低轨(LEO)、高轨(HEO)和同步轨道(GEO),测量结果如表 1 所示,测距精度优于 2 cm。

3.2 碎片目标测量

同时我们对多颗碎片目标进行观测,由于空间碎片体积小,激光回波主要来自其对激光的漫反射,接收到的回波信号非常微弱,因此相较于合作目标,碎片的测量难度更大。图 4 显示的是碎片目标 Globstar(GZ)(编号 25163)的控制系统操作界面,雷达散射截面 RCS 面积为 2.4 m²,距离门控设置为 0.5 us。图中下方为探测器实时采集的信号,其中呈线状的密集信号点即为空间碎片返回的有效回波信号,其他数据分布的则为噪声点,可以看出,噪

声点较为稀疏,回波信号相对明显的识别出来。

表 2 显示了部分空间碎片的测量结果统计,包含高度在 1000–2000 km 的碎片目标,实现了 RCS 低于 1 m² 左右的碎片探测,对应的探测精度 RMS 最高低于 10 cm,此外,表 2 中目标 SL_16R_B_O 的几次测量精度均较低(RMS 高于 200 cm),可能是目标轨道预报较差的原因;而目标 SL_8R_B 在不同的测量过程中精度差异较大,这可能与天气条件和地面系统有关,如大气可见度较差、时间系统未同步等。图 5(a)展示了此次空间碎片测量的统计结果,总计 60 余圈次,碎片目标数十个,其中在 1000 km 的距离下,等效 RCS 为 0.1 m² 至 0.2 m² 的碎片目标有一个,等效 RCS 为 0.2 m² 至 0.3 m² 的多个目标。对于 RCS 小于 2 m² 的碎片,测距精度约 10 cm,如图 5(b)所示。

4 结果分析

综合表 2 的测量结果可知,我们基于 1.2 mJ 千赫兹皮秒观测系统,成功实现了十余颗等效 RCS 低于 1 m² 的碎片目标的测量,探测范围 1000–2000 km,最高精度为 8.92 cm,对应的 RCS 为 0.99 m²,而在文献[11]中,我们采用上海 60 cm 测距系统进行了碎片测量,其激光光源重复频率 1 KHz,单脉冲能量 2.1 mJ,在 1000 km 高度获得的测量精度 RMS 为 400.5 mm,对应的 RCS 为 2 m²,相比之下,青海站在激光输出功率更小的情况下,所获得的测量精度却更高,表明青海站碎片观测系统的回波探测能力获得了极大的提高,结合第一节的回波分析,我们认为其主要来源于皮秒激光的大气传输效应,西部地区的地理和气候因素。

激光的大气传输是影响激光回波探测的一个

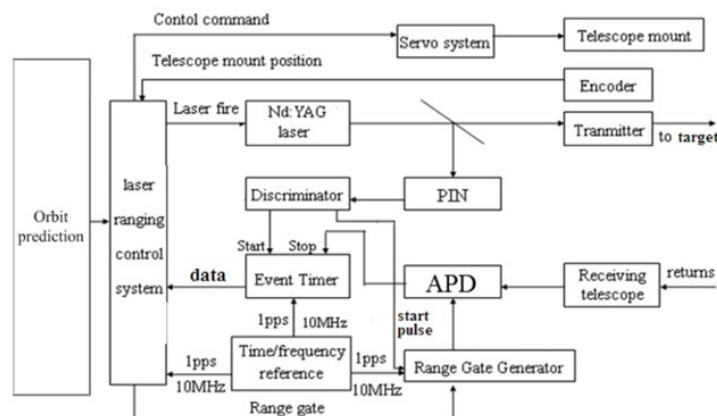


图2 卫星/空间碎片激光测距系统框图

Fig. 2 Block diagram of satellite/space debris laser ranging system

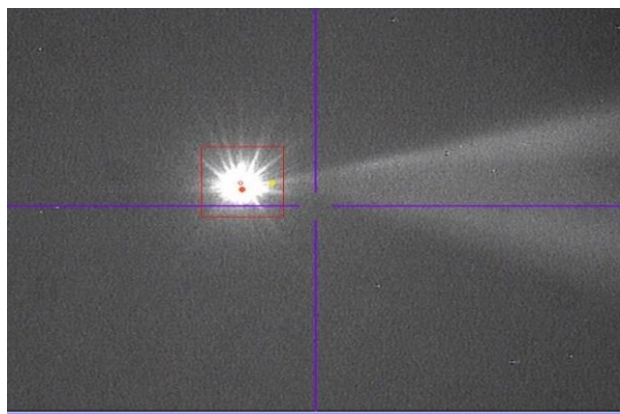


图3 发射激光的光束与目标跟瞄
Fig. 3 Laser beam and target tracking

重要因素。除了大气分子和气溶胶等粒子的吸收和散射、以及大气湍流引起的湍流效应外,皮秒激光在大气传输中还会由于其自身的强光作用,使得光束周围空气的折射率发生变化,产生自聚焦和热晕等非线性效应^[15-16],其中自聚焦是由于光束中心部分的折射率就会比边缘部分的高,从而使光束在传播时产生相位畸变,这种畸变使光束在传输过程中逐渐向中心聚焦,自聚焦效应能够增强激光能量,实现光束更远距离的传输;而热晕效应是源自于强激光在大气传输过程中产生的热效应,当皮秒激光穿过大气时,会对周围空气加热,使得空气的气压发生改变,从而引起局部折射率的变化。光强越强的地方,空气加热越严重,折射率也就越高,因此在激光传输过程中,光斑弱的地方向光斑强的地方折射会聚,并随着传输距离的增大,光斑内的能量逐渐汇聚在光斑的一侧。这两种非线性效应会导致激光的能量分布发生变化,光斑逐渐集中。对于空间目标激光测距系统来说,能量越集中,光强越强,目标返回的信号也越强。相比于纳秒激光测距系统,皮秒激光传输的非线性效应比纳秒激光更强,这有利于实现激光能量的集中,从而进一步增强空间碎片的测量能力。

在地理位置方面,青海观测站位于我国西部地区,海拔3200米,高海拔地区的大气稀薄,大气透过率高,空气中含有的悬浮颗粒和气溶胶等粒子较少,这可以有效减少激光光束的衰减和散射,能够实现更远距离的传输,进一步提高了激光测距的精度和可靠性,十分适合空间目标的观测^[17],同时青海晴朗干旱的气候,也为目标观测提供了极佳的条件,这在一定程度上提高了空间目标的回波强度。

表1 卫星激光测距测量结果统计
Tab.1 Statistics of satellite laser ranging measurement results

目标序号	目标卫星	轨道高度	测量精度
1	Galileo101	高轨	1.28 cm
2	Galileo102	高轨	1.41 cm
3	Qzs2	同步	0.96 cm
4	Galileo206	高轨	1.69 cm
5	Technosat	低轨	0.52 cm
6	Galileo216	高轨	0.86 cm
7	Qzs2	同步	0.92 cm
8	Lares	低轨	1.02 cm
9	Qzs1	同步	1.19 cm
10	Qzs3	同步	0.85 cm
11	Galileo210	高轨	0.61 cm
12	Lageos2	低轨	0.84 cm
13	Geoik2	低轨	0.89 cm
14	Jason3	低轨	1.06 cm
15	Galileo213	高轨	1.12 cm
16	Cryosat2	低轨	1.06 cm
17	Qzs3	同步	1.1 cm
18	Galileo210	高轨	1.41 cm
19	Glonass129	高轨	1.76 cm
20	Jason3	低轨	0.86 cm
21	Lageos1	低轨	1.38 cm
22	Galileo214	高轨	1.07 cm
23	Qzs4	同步	1.26 cm
24	Qzs2	同步	0.68 cm
25	Galileo215	高轨	0.82 cm
26	Jason3	低轨	1.77 cm
27	Lares	低轨	2.17 cm
28	Saral	低轨	1.46 cm
29	Lageos2	低轨	1.13 cm
30	Glonass127	高轨	1.86 cm
31	Glonass129	高轨	1.13 cm
32	Qzs4	同步	1.23 cm

5 结论

高精度的卫星与空间碎片测量为卫星与空间碎片提供高精度轨道位置信息,同时也为监视空间碎片的规避预警机动提供了更为有效的途径与依据。高海拔测距站的大气相对稀薄,对激光信号的衰减较小,这有利于提高激光探测能力。本文采用1.2 mJ的1 KHz的皮秒激光对卫星与空间碎片进行测距,实现了对带有反射器的合作目标的厘米级测距和对碎片目标的分米级测距,解决了大能量高功率激光器对测距系统所带来设备损伤问题,同时展现了我国西部地区在空间目标测距上的强大优势。

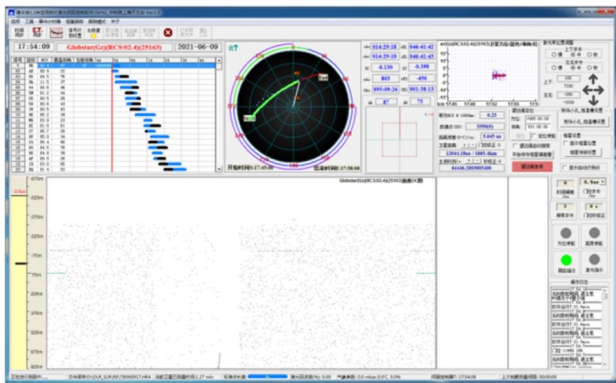


图4 空间碎片 Globstar(Gz)的实时测量结果

Fig. 4 Real-time measurement results of space debris Globstar(Gz)

表2 部分碎片激光测量结果统计

Table 2 Statistics of partial debris laser measurement results

测量日期	碎片名称	距离/km	Point	RCS/m ²	RMS/cm	等效 RCS
2021/5/29	AGENADR_B_O	1186. 4	142	2. 5	15. 57	1. 26
2021/6/4	SJ-5(Gz)	1627. 5	188	1. 56	7. 91	0. 22
2021/6/6	SL_16R_B_O	1598	108	1. 74	282. 71	0. 27
2021/6/6	SL_16R_B	1816. 8	784	9. 95	153. 51	0. 91
2021/6/6	SL_16R_B	1757. 1	3285	8. 79	154. 73	0. 92
2021/6/6	SL_8R_B	1464. 5	444	4. 46	279. 79	0. 97
2021/6/6	SL-8R_B_O	1425. 3	1461	4. 82	97. 67	1. 17
2021/6/6	SL_16R_B_O	1488. 2	1071	5. 42	241. 65	1. 10
2021/6/6	SL-8R_B	1905. 5	211	7. 66	28. 99	0. 58
2021/6/8	SICH_2(Gz)	1496. 4	2617	0. 99	8. 92	0. 20
2021/6/8	SL-8R_B_O	1454. 2	115	2	20. 55	0. 45
2021/6/8	AGENADR_B_O	1348. 9	231	2. 5	175. 13	0. 76
2021/6/8	Target36095	1796. 5	1658	3. 5	62. 8	0. 34
2021/6/9	SL-16R_B_O	1635	1205	1. 74	276. 76	0. 24
2021/6/9	GloBstar(Gz)	2056. 4	196	2. 41	10. 64	0. 13
2021/6/11	SICH_2(GZ)	1404. 2	8233	0. 99	10. 54	0. 25

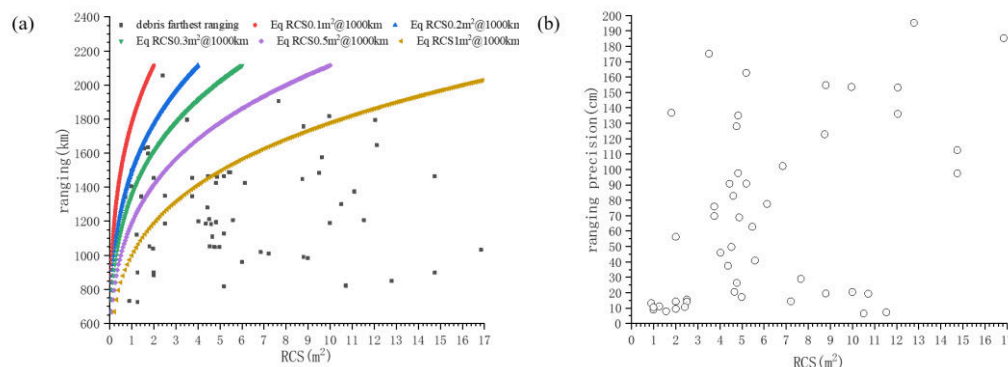


图5 空间碎片测量结果统计:(a) 测量结果分布图;(b) 测距精度分布图

Fig. 5 Statistics of space debris measurements:(a) Distribution diagram of measurement results;(b) Range Accuracy Distribution Map

致谢:感谢大恒新纪元科技股份有限公司提供皮秒激光器系统及技术指导,本文工作得到国家自然科学基金12003056与中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室空间碎片观测项目的支持。

参考文献

- [1] Bennett J C, SANG Ji-Zhang, 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.
- [2] Esmiller B, Jacqueland C, Eckel H A, *et al.* Space debris removal by ground-based lasers: main conclusions of the European project CLEANSAPCE [J]. *Applied optics*, 2014, **53**(31): I45–I54.
- [3] Cherniaev A, Telichev I. Weight-efficiency of conventional shielding systems in protecting unmanned spacecraft from orbital debris [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2017, **54**(1): 75–89.
- [4] Pardini C, Anselmo L. Revisiting the collision risk with cataloged objects for the Iridium and COSMO-SkyMed satellite constellations [J]. *Acta Astronautica*, 2017, **134**: 23–32.
- [5] Morin J. Four steps to global management of space traffic [J]. *Nature*, 2019, **567**(7746): 25–27.
- [6] Witze A. The quest to conquer the space junk problem [J]. *Nature*, 2018, **561**(7721): 24–26.
- [7] Steindorfer M A, Kirchner G, Koidl F, *et al.* Daylight space debris laser ranging [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 3735.
- [8] Ploner M, Håkansson N, Heinzl L, *et al.* Space Debris Laser Ranging – Challenging and Rewarding – Update of the Izaña-1 Station [C]. 2022, 22nd IWL. S07–T01. <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/lw22/Program/index.html>
- [9] 张海涛, 李祝莲, 汤儒峰, 等. 阵列探测技术在激光测距中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(10): 20200006. (ZHANG Hai-Tao, LI Zhu-Lian, TANG Ru-Feng, *et al.* Application of array detection technology in laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(10): 20200006.
- [10] ZHANG Hai-Feng, LONG Ming-Liang, DENG Hua-Rong, *et al.* Space debris laser ranging with a 60 W single-frequency slab nanosecond green laser at 200 Hz [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, **17**(5): 051404.
- [11] ZHANG Zhong-Ping, ZHANG Hai-Feng, LONG Ming-Liang, *et al.* High precision space debris laser ranging with 4.2 W double-pulse picosecond laser at 1 kHz in 532nm [J]. *Optik*, 2019, **179**: 691–699.
- [12] 龙明亮, 张海峰, 门琳琳, 等. 10 kHz 重复率全天时卫星激光测距 [J]. *红外与毫米波学报*, 2020, **39**(06): 778–785. (LONG Ming-Liang, ZHANG Hai-Feng, MEN Lin-Lin, *et al.* Satellite laser ranging at 10 kHz repetition rate in all day [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2020, **39**(06): 778–785.
- [13] 张海峰, 龙明亮, 邓华荣, 等. 地基空间碎片激光测距技术发展与应 (特邀) [J]. *光子学报*, 2020, **49**(11): 1149004. (ZHANG Hai-Feng, LONG Ming-Liang, DENG Hua-Rong, *et al.* Development and Application for Ground-based Space Debris Laser Ranging (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(11): 1149004.
- [14] 高添泉, 吴先霖, 张才士, 等. 基于近红外小功率卫星激光测距研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, **41**(5): 905–913. (GAO Tian-Quan, WU Xian-Lin, ZHANG Cai-Shi, *et al.* Satellite laser ranging research based on near-infrared low-power laser [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, **41**(5): 905–913.
- [15] 翟东升, 伏红林, 熊耀恒. 大气对 532nm 激光影响在漫反射激光测距中的应用 [J]. *天文研究与技术*, 2010 **7** (1): 33–39. (ZHAI Dong-Sheng, FU Hong-Lin, XIONG Yao-Heng. Study of Atmospheric Effects on a 532nm Laser and Its Applications in the Laser Ranging Based on Diffuse Reflection [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2010 **7**(1): 33–39.
- [16] 邓宇. 大气自聚焦效应和湍流效应对地基激光空间碎片清理的影响 [D]. 四川师范大学, 2021. (DENG Yu, The effects of self-focusing and turbulence on ground based laser space-debris cleaning [D] Sichuan Normal University, 2021.
- [17] DENG Li-Cai, YANG Fan, CHEN Xiao-Dian, *et al.*

Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observ-

ing site[J]. *Nature*, 2021, **596**(7872): 353–356.