

引用格式: 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

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用(特邀)[J]. 光子学报, 2020, 49(11): 1149004

## 地基空间碎片激光测距技术发展与应用(特邀)

张海峰<sup>1,2</sup>, 龙明亮<sup>1</sup>, 邓华荣<sup>1,2</sup>, 吴志波<sup>1,2</sup>, 程少宇<sup>4</sup>, 李朴<sup>1</sup>, 张忠萍<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

(2 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 南京 210008)

(3 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

(4 上海大学, 上海 200444)

**摘要:** 随着航天航空技术的快速发展, 环绕地球轨道空间碎片数量迅速增加, 占用了有限的轨道资源, 同时威胁在轨运行航天器的安全, 其陨落也对人们构成严重恐慌. 激光测距具有波长短、发散角小、方向性好、单色性好、抗干扰强等特点, 能显著提升空间碎片轨道与姿态测定精度. 本文对空间碎片激光测距做出较全面的理论分析, 从激光工作模式、回波探测与接收等方面介绍目前研究现状及技术与应用情况, 对正在发展的千赫兹重复率脉冲串模式、百千赫兹脉冲群收发交替模式空间碎片激光测距技术特点, 以及空间碎片白天激光测量技术进行阐述. 提出将超高重复频率激光测距技术应用在空间碎片激光测距上, 为进一步提高空间碎片激光测距能力提供一种新方法.

**关键词:** 空间碎片; 激光测距; 单光子探测; 多望远镜; 高重复频率

中图分类号: P215; TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204911.1149004

## Development and Application for Ground-based Space Debris Laser Ranging (Invited)

ZHANG Hai-feng<sup>1,2</sup>, LONG Ming-liang<sup>1</sup>, DENG Hua-rong<sup>1,2</sup>, WU Zhi-bo<sup>1,2</sup>,

CHENG Shao-yu<sup>4</sup>, LI Pu<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-ping<sup>1,2,3</sup>

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

(2 Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(4 Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Space debris is increasing rapidly owing to the rapid development of aerospace technology, which occupies limited orbital resources and threatens the safety of spacecraft in orbit, even the falling of space debris also poses a serious scare to people. The laser ranging has the characteristics of short wavelength, small divergence angle, good direction, good monochromaticity, strong anti-interference and so on. It can significantly improve the accuracy of space debris orbit determination. This paper makes a more comprehensive theoretical analysis for the space debris laser ranging. The technological development process of space debris laser ranging is described from the aspects of laser mode, signal detection and reception and so on. The development of the space debris laser ranging technology of the kilohertz

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. U1631240), 上海市自然科学基金面上项目(No. 20ZR1467500), 中国科学院重点部署项目(No. ZDRW-KT-2019-3-6)

**第一作者:** 张海峰(1981—), 男, 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

**通讯作者:** 龙明亮(1989—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为卫星/空间碎片激光测距. Email: F\_CEO\_beifeng@126.com

张忠萍(1960—), 男, 研究员, 学士, 主要研究方向为卫星/空间碎片激光测距. Email: zzp@shao.ac.cn

收稿日期: 2020-08-31; 录用日期: 2020-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

repetition rate of pulse bursts mode and the 100 kilohertz pulse bursts transceiver alternate mode is discussed, and daytime laser measurement techniques of space debris are explained. Ultra-high repetition rate laser ranging technology would be applied in space debris laser ranging, it provides a new method for the further improvement of space debris laser ranging capabilities.

**Key words:** Space debris; Laser ranging; Single-photon detection; Multiple telescopes; High repetition rate  
**OCIS Codes:** 280.3400; 140.7090; 140.3280

## 0 引言

随着空间技术的进步,人们进入太空的活动不断增加,与此同时导致很多失效的不可控人造卫星、火箭体、航天器被遗留在太空中<sup>[1-3]</sup>.空间碎片是指除正常工作的航天器外所有在轨的人造物体,包括完成任务的火箭箭体和卫星本体、火箭的喷射物、在执行航天任务过程中的抛弃物、空间物体之间碰撞产生的碎片等,也称“太空垃圾”.据2014年第32届机构间空间碎片协调委员会上报道,太空中毫米级以上的太空碎片数以亿计,总数量达到几千吨,全球已经向太空中发射了6 500多个航天器,废弃卫星达到5 000多颗,且数量在逐年在增长<sup>[4]</sup>.这些卫星、航天器随时可能坠入地球,威胁地面的安全.1978年,苏联的核动力卫星因空间碎片的撞击坠毁在加拿大,产生了严重的核污染.1986年,“阿丽亚娜”号火箭进入轨道之后不久便爆炸,成为564块残骸和2 300块小碎片,将两颗日本通讯卫星撞成碎片.2009年2月10日美国铱卫星公司的一颗卫星与俄罗斯一颗报废的军用通信卫星在太空碰撞,产生大量空间碎片.据计算,太空轨道上每个飞行器发生灾难性碰撞事件的几率为3.7%,发生非灾难性碰撞的可能性为20%.

近些年来,OneWeb星座、SpaceX、Telesat、鸿雁等卫星互联网星座计划呼之欲出,成千上万颗卫星将入射至地球轨道,对地球轨道资源造成很大的冲击,空间碎片已成为影响航天安全的重要因素.欧洲航天局对空间碎片与航天器的碰撞预警年平均都在50次以上,碰撞避免机动2018年更是达到22次.为保证发射升空后航天器的安全,需要对空间碎片轨道进行精密测量.激光具有波长短、发散角小、方向性好、单色性好、抗干扰强等特点,可作为实时测量技术,其精度可达厘米级,高于微波雷达、光电望远镜1~2个数量级,能显著提升空间碎片轨道测定精度,对增强航天器碰撞预警能力具有重要作用.美国、澳大利亚、奥地利、俄罗斯、波兰和中国等国均发展了非合作空间目标(空间碎片)高精度激光测距技术<sup>[5-6]</sup>.国际激光测距服务组织(International Laser Ranging Service, ILRS)在2014年9月成立空间碎片激光跟踪测量工作组,旨在通过多方技术交流和协作,致力于推进空间碎片高精度测量技术研究与应用,服务于航天活动中的空间碎片高精度监测、预警等,以增强空间目标预警能力及空间态势感知能力.

对于空间碎片激光测距,被测目标表面对入射激光束漫反射,使得返回激光信号弱,导致测量难度大,为此,提升地面站激光发射能力、微弱信号接收探测能力是实现空间碎片激光测距技术的关键.近些年空间碎片激光测距在激光发射频率、皮秒脉宽激光、单光子探测、阵列式接收等方面已取得了进展,有效提升了空间碎片激光观测能力,实现常规化观测,并开展了空间碎片轨道确定、轨道检核、姿态测量等应用.本文介绍了上述技术的研究现状,并分析和阐述了未来技术的发展,期望高精度激光测距技术的优势在空间碎片监测领域得到有效发挥.

## 1 空间碎片激光测距理论

空间碎片激光测距由于测距距离远,需要激光传输能量大,通过激光发射时刻以及空间碎片漫反射激光回波时刻,以时间飞行法进行测距,获得激光飞行往返时间,从而实现空间碎片距离测量.空间碎片离测距站距离 $R$ 为

$$R = \frac{(t_2 - t_1 - T_0) \cdot c}{2} \quad (1)$$

式中, $t_1$ 为地面系统激光发射时刻, $t_2$ 为地面系统激光接收时刻, $T_0$ 为地面测量系统时延, $c$ 为光的传输速度.

### 1.1 激光测距雷达方程

激光测距雷达方程是分析空间目标是否能被探测到,评估地面测距站测距能力计算的有效方法,在激光测距系统设计与建设中广泛应用.具有激光反射器合作目标的激光雷达方程为

$$n_0 = \frac{16}{\pi^2} \frac{\lambda \eta_q}{hc} \frac{E_0 A_r A_s}{\theta_t^2 \theta_s^2 R^4} T^2 K_t K_r \alpha \quad (2)$$

式中,  $n_0$  为系统接收平均光电子数,  $\eta_q$  为探测器探测效率,  $\lambda$  为激光波长,  $h$  为普朗克常量;  $E_0$  为激光单脉冲能量,  $A_r$  为系统有效接收面积,  $A_s$  为反射器目标反射面积,  $\theta_t$  为地面站激光束发散角,  $\theta_s$  为合作目标反射器发散角,  $T^2$  为双程大气透过率,  $K_t$  为发射光学系统效率,  $K_r$  为接收光学系统效率,  $\alpha$  为大气衰减因子.

对于非合作目标, 目标为漫反射体的空间碎片, 大多满足朗伯余弦体辐射体, 假设  $\sigma$  为目标散射横截面积, 其反射率为  $\rho$ , 则反射距离  $R$  处的地面光密度为

$$P_G = \frac{\sigma \rho E_0 K_r T}{4R^2} \cos\beta \quad (3)$$

式中,  $\cos\beta$  为朗伯余弦,  $\beta$  为朗伯体辐射方向与被测表面法线的夹角. 对非合作目标的激光雷达方程为

$$n_0 = \frac{\lambda \eta_q}{hc} \frac{E_0 \sigma \rho A_s}{4\pi \theta_t^2 R^4} T^2 K_t K_r \alpha \cos\beta \quad (4)$$

空间碎片激光测距中空间碎片对激光脉冲为漫反射, 回波信号散射广, 望远镜接收回波信号微弱, 合作目标激光测距因合作目标装有激光反射器, 可以将入射激光很好地约束在很小范围内, 回波信号覆盖范围小, 回波信号强度相比漫反射更集中, 由合作目标与非合作目标激光测距雷达方程式(2)和式(4)可得, 在相同能量的激光脉冲、望远镜接收与发射系统下, 合作目标与非合作目标回波信号比值  $S$  为

$$S = \frac{64A_r}{\pi \theta_t^2 \sigma \rho} \quad (5)$$

由式(5)可得, 合作目标与非合作目标的激光测距信号强度变化, 主要集中在合作目标激光反射的发散角  $\theta_t$ . 一般合作目标上安装激光反射器对激光反射的发散角为  $30 \sim 80 \mu\text{rad}$ , 空间碎片漫反射效率为 0.1, 由此相同反射截面非合作目标回波信号比合作目标的信号弱  $10^{-10} \sim 10^{-11}$ . 而大尺寸空间碎片尺寸在平方米量级, 低轨合作目标激光反射截面比较小, 约在平方厘米量级左右, 则对应非合作目标回波信号是合作目标回波信号强度的  $10^{-6} \sim 10^{-7}$ . 由此说明碎片目标测量探测难度大, 需通过提高激光器脉冲能量、望远镜接收面积及探测器效率, 将非合作目标的回波信号提升到单光子测量水平.

## 1.2 激光回波探测概率

空间碎片激光测距过程中使用单光子探测器, 其光电转换产生的光电子数服从泊松分布, 测距过程中虚警概率为

$$P(0, n_1 + n_2) = 1 - e^{-n_1 - n_2} \quad (6)$$

式中,  $n_1$  为背景光噪声产生的光电子数,  $n_2$  为单光子探测器自身暗噪声的光电子数. 当单光子探测器探测到背景噪声与暗噪声光电子时, 激光回波的光电子将得不到探测, 故单个激光脉冲的激光回波探测概率为

$$P(0, n_0) = e^{-(n_1 + n_2)} (1 - e^{-n_0}) \quad (7)$$

由  $n_1 \geq 0, n_2 \geq 0$ , 故当  $n_1 + n_2$  趋向于 0 时,  $P(0, n_0)$  有最大值. 由式(7)可得: 为了提高空间碎片激光回波探测概率, 应降低背景光噪声  $n_1$  与暗噪声光电子数  $n_2$ . 在重复频率  $f$  下, 由雷达方程式(4), 单位时间内回波平均点数  $D$  为

$$D = f e^{-(n_1 + n_2)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\lambda \eta_q}{hc} \times \frac{E_0 A_r \rho \sigma \cos\theta}{\pi \theta_t^2 R^4} \times T^2 \times \eta_t \times \eta_r \times \alpha\right) \right] \quad (8)$$

由式(8)得, 增加单位时间内回波平均点数  $D$ , 可通过增大激光重复频率、降低背景光噪声  $n_1$ 、暗噪声的光电子数  $n_2$ , 并增大测距系统有效接收面积  $A_r$ 、以及激光器单脉冲能量  $E_0$  等途径实现, 以上途径也是空间碎片激光测距技术发展的重要内容.

## 1.3 测距精度分析

由测距系统的激光测距距离公式(1)可以看出, 影响空间碎片激光测距精度的因素主要体现在激光发射时刻  $t_1$  与激光接收时刻  $t_2$ , 对式(1)进行微分得

$$\Delta R_1 = \frac{(\Delta t_2 - \Delta t_1 - \Delta T) \cdot C}{2} \quad (9)$$

激光发射计时偏差  $\Delta t_1$ 、激光接收时刻计时偏差  $\Delta t_2$ 、系统时间的计时偏差  $\Delta T$  的准确性直接影响测距的

精度.发射时刻  $t_1$  由快速 PIN 光电探测发射激光脉冲,通过恒定比器,测量精度基本与事件计时器精度相一致,约几皮秒.接收时刻  $t_2$  由雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)单光子探测器,探测器响应时间一般为几十皮秒.由此,测量精度误差主要集中在回波时刻  $t_2$  测量中,对于激光脉冲信号回波其光子数分布在脉冲各个部分,如图 1 所示,激光脉冲通过大气传输、目标反射后其脉冲宽度将发生改变.以盖革模式运行的单光子探测器,在接收一个光子后,探测器即将关门,此时后续脉冲的光子将无法被单光子探测器响应.图 1 中,如果脉冲( $T_2$ )处光子被单光子探测器探测,则( $T_2$ )时间后光子数将不会被单光子探测器探测;反之,则( $T_2$ )时间后光子数将被单光子探测器探测;由此,光脉冲的脉宽越宽,光子之间时间间距变动也越大,测距精度也将下降.因而,对于尺寸较小,对脉冲展宽效应不明显的空间碎片的高精度激光测距,可选择窄脉冲激光源.

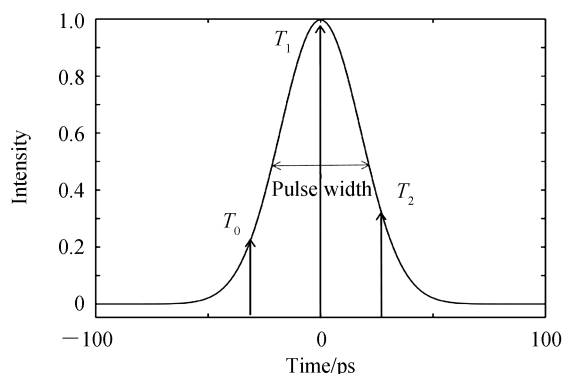


图 1 激光脉冲中不同位置的光子探测

Fig.1 Photon detected at different positions in the laser pulse

## 2 空间碎片激光测距技术现状与实现

大尺寸空间碎片尺寸在平方米量级,低轨合作目标反射截面比较小,在平方厘米量级,对应非合作目标回波信号是合作目标回波信号强度的  $10^{-6} \sim 10^{-7}$ .对于合作目标测距中,同步轨道激光能量在 mJ 级,同步轨道距离比低轨轨道高一个数量级,由式(2)测距能力与距离四次方成反比,故低轨合作目标其测距所需能量一般在  $\mu\text{J}$  级或亚  $\mu\text{J}$ .空间碎片激光测距碎片目标目前主要集中在低轨道,碎片测距过程中激光能量一般上百 mJ 或焦耳级,相比低轨合作目标测量,碎片测距激光脉冲能量是低轨合作目标测量的  $10^6 \sim 10^7$  倍,即 6 到 7 个数量级,从而使得空间碎片激光测距得以实现.由式(8)与(9)分析可得,空间碎片激光测距技术发展过程主要集中在激光发射、接收面积及探测器等,其中激光发射由低重复频率向高重复频率发展,脉宽由纳秒向皮秒发展,并向大气透过率较好的近红外波段发展;接收面积从小口径望远镜向大口径望远镜、小口径望远镜阵列方式发展;探测器从高精度单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)向大靶面、高效率 APD 探测器及暗噪声数少的超导探测器发展.目前国内外针对空间碎片探测能力与探测精度的提高进行了广泛研究.

### 2.1 高重复频率空间碎片激光测距技术

早期的空间碎片激光测距,因测距难度大,受光电子、激光等技术限制,初期主要采用低重复频率大能量激光脉冲.2002年10月,澳大利亚 EOS 公司在华盛顿第 13 届国际激光测距会议上首次发表了题为“Laser Tracking of Space Debris”的报告,简单介绍了研究进展,并利用 Stromlo 激光测距站口径为 76 cm 的望远镜和高能量 532 nm 纳秒激光器,实现了对 1 250 km 远的大小为 15 cm 的空间碎片的测距<sup>[5]</sup>.国内上海天文台积极瞄准国际空间碎片激光测距技术发展,对 60 cm 口径卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)系统进行了技术改造,采用重复频率为 20 Hz、输出功率为 40 W、激光脉宽为 10 ns 大能量激光器系统,于 2008 年 7 月在国内首次成功实现了 900 多公里空间碎片激光测距,测距精度约为 1 m<sup>[6]</sup>.上述激光器为灯泵浦模式、双光束合成,输出光束质量较差,连续工作时间短.为此,2008 年引进了一台高稳定性、输出功率为 10 W、重复频率为 10 Hz、激光脉宽为 8 ns 的大能量激光器系统,并改进了激光测距控制系统,于 2009~2010 年度多次成功实现了对火箭体、失效铱星等空间碎片目标的激光测距,测量距离达到 1 200 多公里,测距精度为 80~

100 cm<sup>[7]</sup>.2011年,在中科院项目支持下,将10 W功率激光器升级至30 W,并对测距系统进行了完善,实现了最远距离达1 800 km、雷达散射截面(Radar Cross Section,RCS)为3.4 m<sup>2</sup>空间碎片的测量,探测成功率大于50%<sup>[8]</sup>.2011年,中科院云南天文台利用1.2 m激光测距系统,应用10 Hz、4.5 J单脉冲能量,成功实现了空间碎片激光测距试验,获得了有效回波数据<sup>[9]</sup>.

由式(8)可得,在激光回波探测数不变的情况下,提高测距的重复频率可以有效降低激光脉冲能量.2013~2015年上海天文台通过合作研制了重复频率为200 Hz、单脉冲能量为300 mJ、输出功率为60 W的高功率激光器系统,激光结构如图2所示,在国内首次将高功率、高重复率脉冲激光器用于空间碎片激光测量,实现了空间碎片激光测距常规化,系统测量性能得到显著提升,突破空间碎片激光测距关键技术.图3给出了上海天文台空间碎片激光测距系统观测结果,最远测量距离达3 000 km<sup>[10]</sup>.

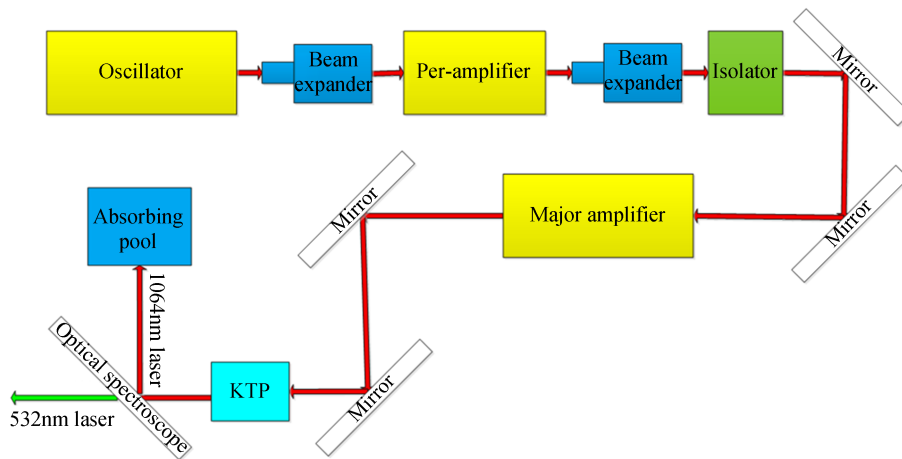


图2 200 Hz重复率高功率全固态激光器光学系统原理

Fig.2 The schematic of optical system for high power solid-state laser with 200Hz repetition rate

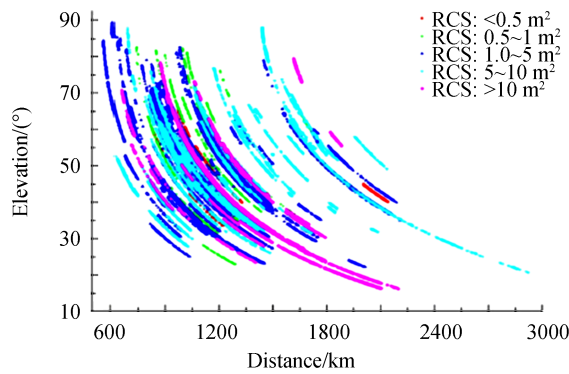


图3 上海激光测距站2013~2015年空间碎片激光观测结果

Fig.3 Laser ranging results of space debris at Shanghai Laser Ranging Station in 2013~2015 year

2015年,奥地利Graz站采用重复频率为1 kHz、脉宽为10 ns的532 nm激光,25 mJ的低脉冲能量,接收口径为50 cm的望远镜,实现了对轨道高度为3000 km、最小面积为0.3 m<sup>2</sup>的千赫兹空间碎片激光测距<sup>[11]</sup>.2019年上海天文台采用4.2 W双脉冲皮秒532 nm激光,2.1 mJ的单脉冲能量,接收口径为60 cm的望远镜,实现重复频率1 kHz的空间碎片测距,雷达散射截面RCS范围为2~12 m<sup>2</sup>,测距精度达到了亚分米级<sup>[12]</sup>.在对编号38346的碎片测距数据中,可以看出碎片姿态变化情况,如图4所示.2014年,中科院国家天文台长春人造卫星观测站利用60 cm卫星激光测距系统,应用500 Hz、输出功率为60 W、波长为532 nm的激光器系统,成功实现了空间碎片激光测距试验,获得了有效回波数据<sup>[13]</sup>.

高重复率激光测距,具有激光回波数据密度大、目标搜索快等特点,通过提高激光测距的重复频率,在较低激光能量下,可实现空间碎片激光测量.对于现有的望远镜测距系统,高重复率空间碎片测距是提高探测能力的重要技术途径,是未来技术发展的趋势.目前国外已经突破了100 kHz的超高重复频率(图5)的卫

星激光测距技术<sup>[14-18]</sup>,为超高重复频率 100 kHz~1 MHz 的空间碎片激光测距奠定了技术基础.

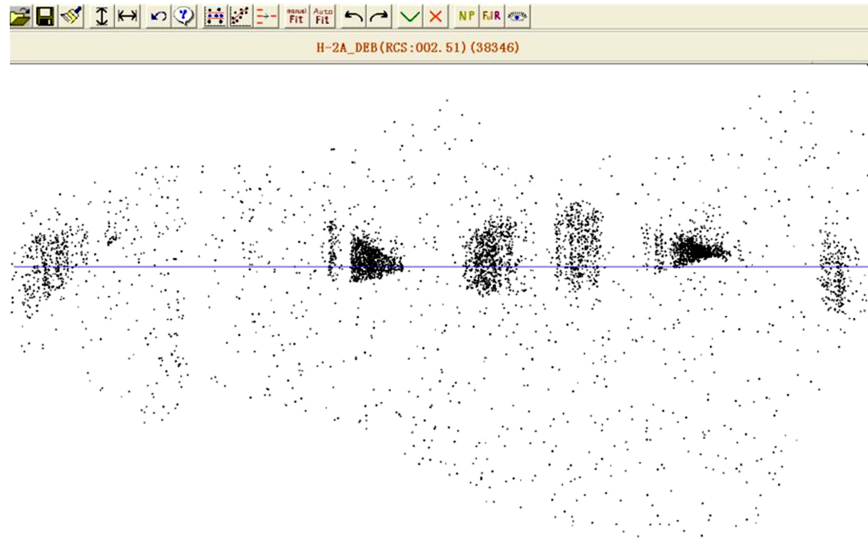


图4 ID为38346的空间碎片的千赫兹测距

Fig.4 Space debris with ID of 38346 laser ranging at repetition of 1 kHz

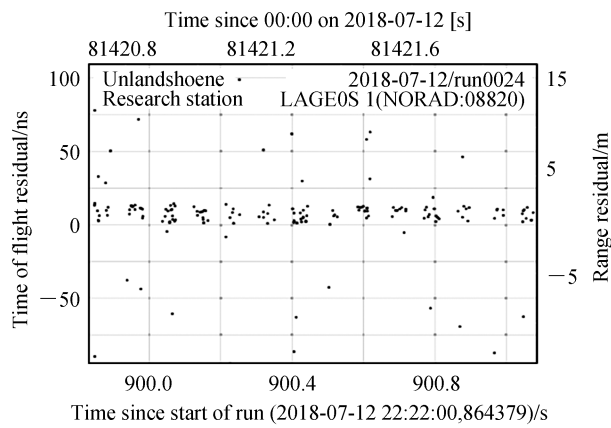


图5 超高重复频率为500 kHz 的卫星激光测距

Fig.5 Satellite laser ranging with ultra-high repetition rate of 500 kHz

超高重复频率测距过程中激光大气后向散射光强度远大于单光子水平,易造成单光子探测器损坏,且其与激光回波信号为同样的激光频率,光谱滤波法难以实现将其从激光回信号中滤除.采用一发一收的收发交替模式的脉冲群方式,在激光发射时,单光子探测器不工作,对后向散射光不响应,激光回波回来时,激光不发射.由于激光不发射,后向散射光基本没有,此时开启单光子探测器,可实现对激光回波的接收,从而达到从时间上将后向散射光与激光回波分开,避免后向散射光对激光回波的干扰,如图6所示.图6中,激光脉冲发射时,单光子探测器断开未工作,其中 $T_p$ 为激光脉冲发射周期,激光脉冲停止发射后,单光子探测器开始持续工作,即激光发射与单光子探测器接收激光回波一发一收,收发交替.HAMPF D等在100 kHz超高重复频率的SLR中使用单光子探测器的死区时间为10  $\mu$ s,对应单光子探测器连续工作重复频率为100 kHz<sup>[16-17]</sup>,其中激光发射时,无测量数据,单光子探测器工作接收回波时,有测量数据,由此循环往复,测量数据如图5所示.

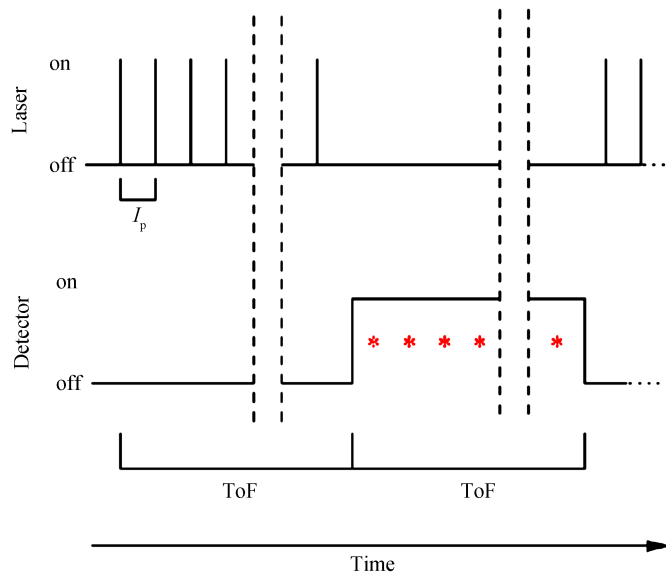


图6 后向散射避免的激光发射与单光子探测器接收的模式  
Fig. 6 Laser emission and single photon detector reception to avoid the laser back-scatter

## 2.2 大口径望远镜技术

望远镜口径越大接收的激光回波数越多,越容易实现空间碎片激光测距.空间碎片激光测距难度大,初期的空间碎片激光多采用大口径望远镜.1994年FUGATE R在堪培拉第九届国际激光测距会议上宣称,美国空军在新墨西哥州的Starfire口径为3.5 m的望远镜可对1 000 km的空间碎片进行测距.2004年澳大利亚EOS公司重建后的空间碎片测距望远镜口径为1.8 m,激光发散角仅为0.5",跟踪精度优于0.05",100 W激光器实现了距离为1 000 km、尺寸为10 cm空间碎片的测量,并可开展空间碎片目标的三维测量,实现碎片目标的高精度定位定轨,提高碎片目标的编目精度.2012法国Grasse站利用口径为1.56 m的望远镜实现轨道高度为1 700 km的空间碎片激光测距<sup>[19-20]</sup>.

中国科学院云南天文台从2008年起,基于1.2 m口径激光测距系统开展了空间碎片激光测距试验研究<sup>[8,21]</sup>.2010年采用输出功率为45 W、重复频率为10 Hz、波长为532 nm的大能量激光器系统,成功获得了多颗空间碎片目标有效激光回波数据<sup>[22]</sup>.为提高激光回波探测能力,发展了具有低噪声、高效率特性的超导单光子探测器,应用于空间目标激光回波信号探测,并于2017年实现了近红外波段(1 064 nm)的空间目标激光测距<sup>[23]</sup>.通过对测距系统性能的优化,应用超导单光子探测器获得了大量空间碎片目标激光观测数据.

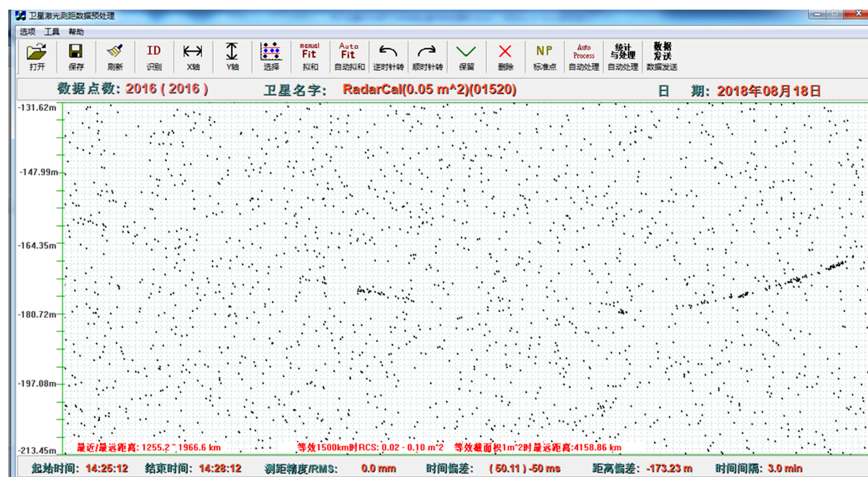


图7 RCS为0.05 m<sup>2</sup>的空间碎片激光观测(ID:01520)  
Fig.7 Space debris laser ranging with RCS of 0.05 m<sup>2</sup> (ID: 01520)

2018年度上海天文台利用合作方近2 m的大口径空间碎片激光测距系统,采用重复率为200 Hz、脉冲能量为300 mJ、波长为532 nm的激光器系统,对距离1 600 km、RCS为0.05 m<sup>2</sup>(ID: 01520)和距离6 700 km、RCS为13 m<sup>2</sup>(ID: 28118)的空间碎片目标激光测距,实现了小尺寸和远距离空间碎片目标激光测量,如图7和8.其中成功观测到6 700 km的空间碎片目标尚属国际首次,相比于激光能量提高,望远镜口径增加一倍对应接收面积增加四倍,为达到同样的效果,对应激光器能量需增大四倍,在碎片测量中激光能量较大,再成倍增加激光器能量,难度较大,同时更大能量的激光器稳定性与可靠性也较差.由此,大口径望远镜空间碎片激光测距具有明显优势,是提高空间碎片激光测距能力较为有效的方法.

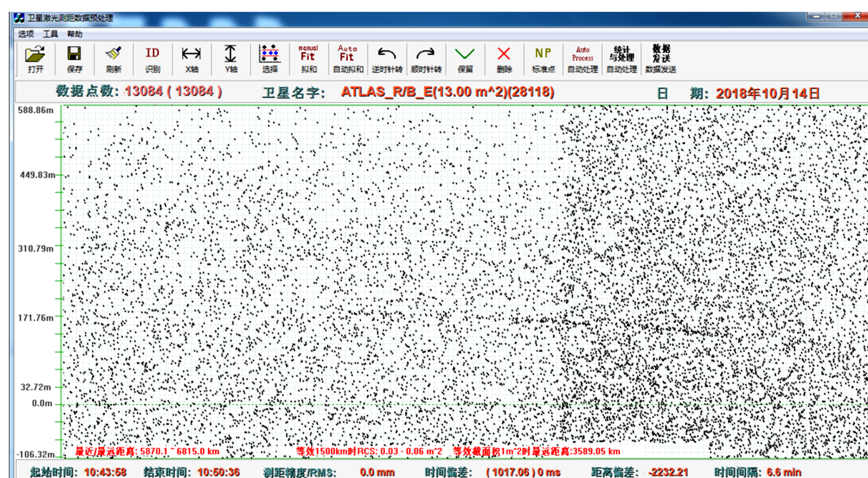


图8 距离6700 km的空间碎片激光观测(ID:28118)

Fig.8 Space debris laser ranging at a distance of more than 6 700 km (ID: 28118)

### 2.3 低噪声高效率信号探测技术

对于带有激光反射器合作目标的激光信号探测,国内外激光测距站广泛采用了单光子灵敏度、测时精度为30~50 ps、靶面直径为200 μm、量子探测效率为20%的雪崩二极管光子探测器(SPAD).该类型光子探测器暗噪声数较高,在高重复率工作模式下,暗噪声数可达约10 kHz,再加上背景噪声影响,探测器噪声数将达到百千赫兹量级,易造成信号误触发,导致测距失败.

针对空间碎片轨道预报精度不高、距离门控搜索范围大、回波光子数少等特点,发展了暗噪声低、效率高(大于40%)、灵敏度高的APD探测技术.为保证探测器有足够的光学接收视场,还需采用大靶面.该类型探测器基于盖革工作模式,使其工作在高于雪崩的电压下以获得足够的增益,光子被吸收后APD能够迅速雪崩输出,达到单光子探测要求,获得较高探测效率和灵敏度.

由于APD芯片性能参数受温度影响大,同时也为了降低探测器芯片和电路的暗噪声,提高探测器的灵敏度,采用恒温制冷设计技术,使探测器工作在优选的恒定低温环境中,既保证了APD芯片工作稳定度,又抑制了系统热噪声.此外,APD低噪声读出电路通常需要高输入阻抗,还增加了保护电路,转移过量输入电压,保证APD器件的正常工作.上海天文台与捷克技术大学合作,研制了适合于空间碎片激光信号探测的低噪声、高性能、大靶面单光子探测器,主要性能指标:光敏面直径为500 μm;暗噪声约<1 kHz@200 Hz;量子效率>40%@532 nm;探测精度约为500 ps<sup>[12]</sup>.在系统参数相同情况下,通过卫星测量对APD与SPAD探测器的激光回波信号和系统噪声数进行了比较,如表1所示,APD探测器在探测效率、系统噪声数方面的优势明显高于SPAD探测器,利于空间碎片微弱激光回波信号探测.

表1 APD与SPAD探测器卫星激光回波与噪声数统计结果

Table1 The statics of laser echoes and system noise from APD and SPAD detector

Type	Total points	Effective points	Echo signal ratio/%	System noise ratio/%
APD	892	781	19.74	12.44
SPAD	250	101	7.763	59.6



超导纳米线单光子探测器(Superconducting Nanowire Single-Photon Detector, SNSPD)技术成为近十年涌现的最有竞争力的探测器,拥有宽光谱响应范围、超高探测效率、极低暗计数率、较小时间抖动等卓越性能,将带来对空间目标探测能力的突破,并有助于提升对空间目标的搜索能力和捕获速度.2015年起上海天文台与上海微系统与信息技术研究所合作,率先研制了应用于高精度激光测距的光敏面直径为100 μm、探测效率大于60%、时间抖动为50~80 ps的超导纳米线单光子探测器,应用于空间目标厘米级精度激光测距,推进了超导探测器技术在空间目标激光测距的应用研究<sup>[24]</sup>.云南天文台2017年成功将阵列超导探测器和多通道事件计时器等阵列探测技术应用于激光测距试验系统中,实现空间碎片激光测距与月球激光测距.

#### 2.4 远距离多站同时测量技术

对于空间碎片激光测距,可采用多站望远镜对同一个空间目标进行共视漫反射激光观测,如图9所示,其中一个地面站(台站1)向目标主动发射激光信号(自身也可接收回波信号),其他台站(台站2/台站3)光学望远镜被动接收回波信号.各站点在激光器的能量、望远镜口径等方面并不一致,多站测量,使得大能量激光器、大口径望远镜在空间碎片共视范围内得到最优配置,提高对空间碎片的探测能力.该方法利用了失效卫星、火箭体或空间碎片等目标对地面站发射激光信号表面反射、回波信号分布广的特点,可使相距数百公里的光学望远镜接收激光回波信号,进而实现对目标的多站共视测量,可以充分利用各站点测距系统及地域优势,弥补各站点缺陷.

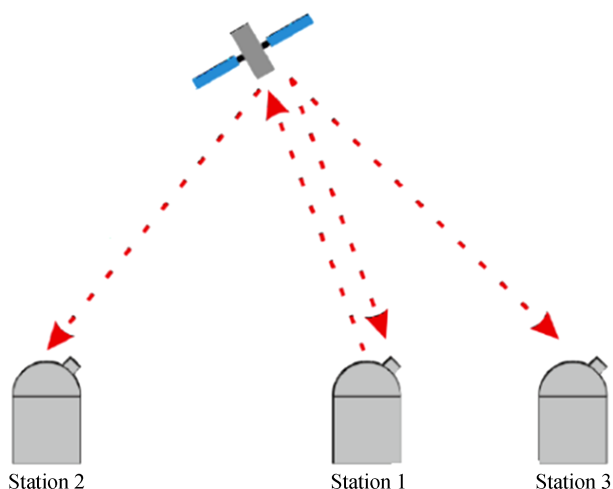


图9 单站激光发射和多站回波信号接收激光测距系统示意图

Fig.9 Laser ranging system for single-station laser emission and multi-station echo signal reception

如图10所示,奥地利Graz站发射强激光(能量为200 mJ@532 nm,脉宽为3 ns,重复频率为80 Hz)对空间碎片进行测量,欧洲Zimmerwal(位于瑞士,相距600 km),Wettzell(位于德国,相距400 km)以及



图10 欧洲多望远镜激光测距(Graz; Zimmerwald: 600 km; Wettzell: 400 km; Herstmonceux: 1 200 km)

Fig.10 European multi-telescope space debris laser ranging (Graz; Zimmerwald: 600 km; Wettzell: 400 km; Herstmonceux: 1 200 km)

Herstmonceux (位于英国,相距 1 200 km)作为接收端,接收到了激光回波信号,实现了多站接收探测<sup>[25-26]</sup>。

中国科学院上海天文台拥有相距约 2.5 km 的两台激光测距望远镜系统,接收口径均为 60 cm. 其中一台望远镜系统(主望远镜,位于佘山山顶)具有发射激光器,同时可接收回波信号;另外一台望远镜(从望远镜,位于科技园区)仅接收回波信号<sup>[27]</sup>。

采用 GPS 授时方法,解决两地望远镜系统时间同步;结合激光信号实际传输路径方法获取目标距离值预报,实现异地接收系统的距离门控精确控制. 国内首次实现 2.5 km 双望远镜空间碎片激光测距,为异地接收望远镜系统精确距离门同步控制提供了切实可行的方法,有利地促进远距离多站望远镜激光测距系统对空间碎片激光信号的探测,促进对空间碎片单站发射、多站信号接收的联合观测与应用。

## 2.5 阵列式望远镜接收

空间目标激光测距中,从目标返回的激光信号到达地面时可覆盖一定范围,这意味着在此范围内均可对回波信号进行接收和探测. 在该区域内,通过设置多台望远镜同时接收探测激光回波信号,可有效增加地面站系统单位时间内激光回波数,可等效实现单台大口径望远镜接收能力。

基于单台望远镜信号接收与探测原理,根据激光雷达测距方程及信号探测概率理论,对采用多望远镜信号接收的系统探测概率、等效口径接收能力进行了研究. 利用中国科学院上海天文台相距约 60 m、口径分别为 1.56 m 和 60 cm 的双望远镜系统,同时接收卫星的回波信号,研究了双望远镜信号接收系统探测能力. 其中 60 cm 口径的望远镜发射系统向空间碎片发射激光,双望远镜同时接收,有效增加了地面站测量的激光回波数<sup>[28]</sup>. 相比原 60 cm 口径的望远镜系统,单位时间内激光回波数增加了 4~5 倍. 考虑到 1.56 m 口径望远镜激光测量性能,双望远镜可等效于一台口径约为 1.61 m 的望远镜系统接收能力,验证了多望远镜信号接收的可行性和技术优势<sup>[29]</sup>。

## 2.6 白天测距技术

对于空间碎片目标激光测距,采用两行根数轨道预报,由于轨道预报精度差,目标测量时段被受限在夜晚光学可见的情况下,尚无法开展地影光学不可见或白天时段的激光测距,直接导致可观测时段短,阻碍了激光测距技术进一步应用. 为突破空间碎片激光测距观测时段限制,提高目标轨道预报精度与目标监测是关键. 在改进空间碎片目标轨道预报精度方面,SANG J 等利用 2 天内 2 次通过的碎片激光测距观测值进行定轨解算,通过固定碎片弹道系数,1~2 天短期预报精度在沿迹方向上优于 20",并证明该结论对于远离测站处(非跟踪站)的轨道预报精度同样适用<sup>[30]</sup>. BENNETT J 等将目标二行参数每间隔 10 min 计算获得的碎片轨道位置作为虚拟观测值,与目标激光测距数据联合定轨,显著改善了目标定轨收敛性并获得高精度的轨道预报结果<sup>[31]</sup>. 此外,该研究团队还研究了碎片激光测距数据与光学观测数据(三维观测数据)的精密轨道确定与预报,大大提高了定轨精度和 24 h 预报精度,其中,24 h 轨道预报精度均方根(值)(Root-Mean-Square, RMS)优于 100 m,显著提升碎片目标轨道预报精度,利于白天条件下开展空间碎片目标激光测距研究<sup>[32]</sup>。

中国科学院上海天文台在突破光学可见情况下空间碎片激光测距能力的基础上,采用自动搜索目标、光束指向锁定、低噪声高效率光子探测、回波信号快速识别等,初步开展了地影不可见空间碎片激光测距试验,取得了一定成效,为该技术的进一步发展奠定了基础<sup>[7,10,12,27-29]</sup>. 鉴于近红外波段背景噪声低的优势,国际上发展了近红外波段空间碎片白天激光测距技术. 通过应用空间目标白天光学监视技术,即选择合适的光谱滤波方法(通常用截止滤光片),滤除短波段白天天空背景,充分利用 600 nm 以上波段开展星体成像,显著提高星象与背景光的对比度,进而在白天强背景光情况下实现对空间目标的监视,保证对目标的精确跟瞄. 奥地利 Graz 测距站通过提高目标白天观察能力实现了白天的空间碎片激光测距<sup>[33]</sup>。

## 2.7 近红外波段激光测量技术

近红外波段(1 064 nm)相比较于 532 nm 波长的激光,其技术优势主要表现在以下方面:在光子数探测方面,相同单脉冲能量光子数提高两倍;根据大气散射和吸收理论,短波红外波段大气透过率比可见光高,特别是在低仰角时优势更为明显;在激光功率方面,对于同一台 532 nm 波长激光器,其 1 064 nm 波长的功率是 532 nm 波长的近 2 倍;在白天测距方面,1 064 nm 波段比 532 nm 波段的天空背景噪声强度低一个数量级,有利于回波信号探测。

鉴于1 064 nm波长激光的技术优势,国外部分台站开展了1 064 nm波长激光测距技术的研究与实现.澳大利亚Mt Stromlo激光测距站成功实现了1 064 nm激光对空间碎片的测距实验,取得了较好的实验结果;法国Grasse天文台于2016年对激光器进行改造升级,望远镜口径为1.5 m,重复频率为10 Hz,单脉冲能量为300 mJ,利用1 064 nm激光成功实现了激光测月,测量结果表明1 064 nm激光能够实现完整一个周期的测距,解决了常规532 nm激光测距不能在新月和满月时测距的缺陷,证明了1 064 nm激光测距具有背景噪声小的优势<sup>[34]</sup>.

上海天文台基于原有的532 nm波长、60 cm口径的卫星激光测距系统,提出了针对1 064 nm波长激光测距系统的改造方案,利用1 064 nm波长增强InGaAs探测器实现对空间目标的激光测距,证明了1 064 nm波长激光测距技术在系统噪声和测量效率等方面的优势,实现了该波长对1 500 km空间碎片目标的高精度激光测距试验<sup>[35]</sup>,为未来远距离微弱目标高精度近红外波段激光测距提供可行的技术途径.云南天文台成功将阵列超导探测器和多通道事件计时器等阵列探测技术应用于激光测距试验系统中,以53 cm双筒望远镜及1.2 m望远镜,共同构建异地收/发测距平台,重复频率为10 Hz、脉冲能量为3 J时实现月球激光测距<sup>[36]</sup>;重复频率为100 Hz、激光能量为700 mJ~1.5 J时,探测到的最小目标空间碎片的轨道高度约为1 000 km、RCS<0.05 m<sup>2</sup>;激光能量约为2 J时,探测到的最远目标空间碎片的斜距约为5 000 km、RCS为18.250 5 m<sup>2</sup><sup>[37]</sup>.在云南天文台援建下中山大学珠海台站于2019年成功实现对月球表面5个角反射器的激光测距.

### 3 空间碎片激光测距联合观测及应用

#### 3.1 国内多台站激光联合观测及应用

围绕多站空间碎片激光测距,上海天文台联合云南天文台激光观测望远镜、长春人卫站激光观测望远镜,选定了若干个碎片目标(如表2所示),开展了空间碎片联合激光观测试验,以评估空间目标定轨预报精度观测策略.

表2 国内多站激光测距观测空间碎片目标情况  
Table 2 Multi-station in China for space debris laser ranging

Name	ID	NORAD	Farther distance/km	Pass
SL-14 R/B	17567	1987-024B	631	2
SL-3 R/B	14208	1983-075B	566	2
DELTA 2 R/B	25637	1999-008D	840	6
ARIANE 40 R/B	25979	1999-064C	589	4
DNEPR 1 R/B	26550	2000-057F	1 364	1
PEGASUS R/B	39198	2013-033B	649	3

从2015年12月16日到2016年1月8日,共采集到6个目标18圈次激光观测数据.采用定轨预报方法对目标观测数据精度进行了分析.利用目标光学测角观测数据进行精密定轨作为参考轨道.采用激光测距和光学测角观测数据的不同组合,评估目标轨道预报精度.通过在观测数据中加入少量激光测距数据,目标轨道1天、3天的预报精度得到一定提高;在光学资料数据较少或分布不均的情况下,加入少量激光测距数据,实现了目标轨道预报精度的提高.

#### 3.2 中欧多台站激光联合观测及应用

通过国际激光测距网空间碎片工作组协调,2019年12月1日至2019年12月17日中国激光测距网台站(上海站、长春站、昆明站)与欧洲网台站(奥地利Graz站、瑞士Zimmerwald站、波兰Borowiec站等)开展了中欧多站空间碎片激光联合观测试验.期间对多颗空间碎片目标进行了联合观测测量,目标信息如表3所示.

所获得的空间碎片激光观测数据,均共享到公开的国际激光测距数据中心,供全球研究机构使用,为国际激光测距网空间碎片工作组加强开展激光测距技术在空间碎片的应用研究提供了重要观测资料.

表3 国际多站激光测距观测空间碎片目标情况  
Table 3 Multi-station in world for space debris laser ranging

Name	ID	NORAD	Farther distance (km)	Pass
SL-3 R/B	13121	1982-027B	574	2
SL-8 R/B	11327	1979-030B	995	2
SL-16 R/B	23088	1994-023B	845	4
CZ-2C R/B	28480	2004-046B	911	2
CZ-2C R/B	31114	2007-010B	872	10

### 3.3 激光观测数据在空间碎片姿态的应用研究

空间碎片姿态参数的精确测定与演化预估对目标主动移除、飞行器状态异常诊断等具有重要意义.高精度重频激光测距技术的应用为空间碎片旋转姿态参数测定提供了有效测量方法.2015年奥地利Graz激光测距站在激光测距接收光路中增加了分光镜和四单元阵列单光子探测器,采集目标反射的太阳光信号,同时进行目标光变测量数据采集与空间碎片激光测距,应用于空间目标自转参数测量<sup>[38]</sup>.2017年,云南天文台使用大功率激光器与超导单光子探测器,对空间碎片实现了近红外波段(1064 nm)激光测距和光变测量数据,初步实现了空间目标的距离数据与光变数据的同步测量,获得了目标自转参数<sup>[39]</sup>,其中CZ-4碎片目标(NORAD ID: 20853)的自转周期为0.29 Hz.2018年刘通等对德国Wettzell激光测距站测得ID为39679火箭残骸Soyuz火箭末级残骸的漫反射激光观测数据进行了分析,得到观测周期约为11.3 s,估算出了火箭残骸的真实长度为10.5 m、目标质心位置距离一端约为3.72 m,距离另一端约为6.78m<sup>[40]</sup>.2019年北京空间机电研究所的赵思思等与奥地利Graz站研究人员合作,利用该站测量的光变数据与测距数据解算了长征3B火箭体的姿态参数<sup>[41]</sup>.2019年上海天文台采用4.2 W双脉冲皮秒532 nm激光,单脉冲能量为2.1 mJ,实现了对碎片目标反射形状的姿态测量,如图4所示,图中观测数据表现出了反射表面的明显形状效应,这归功于皮秒激光高精度测量技术的应用.上述研究工作的开展,推进了激光测距技术在空间碎片测量中的应用,为空间碎片模型研究提供了高精度测量技术.

## 4 结论

根据空间碎片激光测距探测理论,分析了空间碎片目标探测能力,在相同反射截面的情况下空间碎片目标回波信号是合作目标 $10^{-10}$ ~ $10^{-11}$ 倍,给出了空间碎片激光测量能力提升的技术发展重点.通过增大激光测距频率,降低背景光噪声与探测器的暗噪声,增大测距系统中的有效接收面积和激光单脉冲能量,能够有效增大单位时间内的回波平均点数,提高空间碎片的探测能力.介绍了空间碎片激光测距技术的研究现状,描述了国内外相关技术研究是实现情况,并介绍了空间碎片激光联合测量和应用,以推进国内空间碎片激光测距技术的发展进程.结合国外已经实现的超高重复频率卫星激光测距,对正在发展的千赫兹重复率脉冲串模式、百千赫兹脉冲群收发交替模式的空间碎片激光测距技术特点,以及空间碎片白天激光测量技术进行阐述,为空间碎片激光测距能力的进一步提高提供了新的方法,这些技术是未来空间碎片激光测距的新趋势.

### 参考文献

- [1] SMITH C H, GREENE B. The EOS space debris tracking system [C]. The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Wailea, Maui, Hawaii, 2006.
- [2] SUN Hao, ZHANG Hai-feng, ZHANG Zhong-ping, *et al.* Experiment on diffuse reflection laser ranging to space debris and data analysis[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, **15** (6):909-917.
- [3] KELLY P W, BEVILACQUA R, MAZAL L. TugSat: removing space debris from geostationary orbits using solar sails [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2018, **55**(2): 437-450.
- [4] [EB/OL].[2020-08-31].<http://www.sastind.gov.cn/n127/n199/c335412/content.html>.
- [5] ZHANG Hai-feng, DENG hua-rong, WU Zhi-bo, *et al.* Observations of space debris by ground-based laser ranging system [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2016, **33**(5):457-462.  
张海峰, 邓华荣, 吴志波, 等. 地基激光测距系统观测空间碎片进展[J]. *航天器环境工程*, 2016, **33**(5):457-462.
- [6] MEN Tao, SHEN Zhao, XU rong, *et al.* Development status and tendency of space target laser ranging technique [J]. *Larsar & Infrared*, 2018, **42**(12): 1451-1457.

- 门涛, 谌钊, 徐蓉, 等. 空间目标激光测距技术发展现状及趋势[J]. 激光与红外, 2018, **42**(12):1451-1457.
- [7] ZHANG Zhong-ping, YANG Fu-min, WU Zhi-bo, *et al.* Preliminary results of laser ranging to uncooperative targets at shanghai SLR station[C]. Proceeding of 16th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2008: 695-699.
- [8] LI Yu-qiang, LI Zhu-lian, FU Hong-lin, *et al.* Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(9):160-164.  
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):160-164.
- [9] ZHANG Zhong-ping, YANG Fu-min, ZHANG Hai-feng, *et al.* The use of laser ranging to measure space debris[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, **12**(2):212-218.
- [10] ZHANG Zhong-ping, ZHANG Hai-feng, WU Zhi-bo, *et al.* Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state laser system at 200Hz repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(7): s108005.  
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 基于 200 Hz 重复频率高功率全固态激光器空间碎片激光测距试验[J]. 中国激光, 2014, **41**(7): s108005.
- [11] KIRCHNER G, KOIDL F, FRIEDERICH F, *et al.* Laser measurements to space debris from Graz SLR station[J]. *Advances in Space Research*, 2013, **51**: 21-24.
- [12] 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.
- [13] DONG Xue, HAN Xing-wei, SONG Qing-li, *et al.* Research of space debris laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(S2):1-6.  
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):1-6.
- [14] WANG Pei-yuan, KOIDL F, KIRCHNER G, *et al.* Contributions to sub-MHz SLR in Graz[C]. ILRS Technical Workshop Stuttgart, 2019.
- [15] COURDE C, MARIEY H, CHABÉ J, *et al.* High repetition rate SLR at GRSM[C]. ILRS Technical Workshop Stuttgart, 2019.
- [16] SCHAFER D, SPROLL E, SPROLL F, *et al.* Satellite laser ranging at 100 kHz pulse repetition rate[J]. *CEAS Space Journal*, 2019, **11**:363-370.
- [17] HAMPF D, WAGNER P, SCHAFER E, *et al.* Concept for a new minimal SLR system[C]. 21st International Laser Ranging Workshop, 2018.
- [18] HAMPF D, RIEDE W, STÖCKLE G, *et al.* Ground-based optical position measurements of space debris in low earth orbits[C]. Deutsche Luft- und Raumfahrtkongress, 2013.
- [19] LAAS-BOUREZ M, WAILLIEZ S, DELEFLIE F, *et al.* First astrometric observations of space debris with the MEO telescope[J]. *Advances in Space Research*, 2011, **49**(3): 603-611.
- [20] SANG J, SMITH C, ZHANG K. Towards accurate atmospheric mass density determination using precise positional information of space objects[J]. *Advances Space Research*, 2012, **49**(6): 1088-1096.
- [21] LI yu-qiang, LI Rong-wang, LI Zhu-lian, *et al.* Application research on space debris laser ranging, infrared and laser engineering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(11):3324-3329.  
李语强, 李荣旺, 李祝莲, 等. 空间碎片激光测距应用研究[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(11):3324-3329.
- [22] LI Zhu-lian, LI Yu-qiang, FU Hong-lin, *et al.* Design and realization of a 10Hz diffuse-reflection laser ranging control system[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2012, **3**(9):302-307.  
李祝莲, 李语强, 伏红林, 等. 10 赫兹漫反射激光测距控制系统的设计与实现[J]. 天文研究与技术, 2012, **3**(9):302-307.
- [23] LI Zhu-lian, ZHANG Hai-tao, LI Yu-qiang, *et al.* 53 cm binocular telescope high repetition frequency space debris laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(7):0729001.  
李祝莲, 张海涛, 李语强, 等. 53 cm 双筒望远镜高重频空间碎片激光测距系统[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(7): 0729001.
- [24] LI Hao, CHEN Si-jing, YOU Li-xing, *et al.* Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(4):3535-3542.
- [25] KIRCHNER G, KOIDL F. Multistatic laser ranging to space debris[EB/OL][2020-08-31]. <https://cdsis.nasa.gov/lw18/docs/papers/Session4/13-02-13-Kirchner.pdf>.
- [26] STEINDORFER M A, KIRCHNER G, KOIDL F, *et al.* Space debris science at the satellite laser ranging station Graz[C]. 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), IEEE, 2017.
- [27] LONG Ming-liang, ZHANG Hai-feng, DENG Hua-rong, *et al.* Laser ranging for space debris using double telescopes with kilometer level distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(2):0228002.  
龙明亮, 张海峰, 邓华荣, 等. 距离千米级双望远镜的空间碎片激光测距[J]. 光学学报, 2020, **40**(2):0228002.
- [28] ZHANG Zhong-ping, ZHANG Hai-feng, DENG Hua-rong, *et al.* Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(1): 0102002.

- 张忠萍,张海峰,邓华荣,等.双望远镜的空间碎片激光测距试验研究[J].红外与激光工程,2016,**45**(1):0102002.
- [29] ZHANG Hai-feng, LONG Ming-liang, DENG Hua-rong, *et al.* Detection ability of laser ranging system based on multi-telescope to receive echo signal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(9):100-106.  
张海峰,龙明亮,邓华荣,等.多望远镜信号接收的激光测距系统探测能力[J].红外与激光工程,2018, **47**(9):100-106.
- [30] SANG J, BENNETT J C, SMITH C H. Estimation of ballistic coefficients of low altitude debris objects from historical two line elements[J]. *Advances in Space Research*, 2013, **52**(1):117 - 124.
- [31] BENNETT J, SANG J, SMITH C, *et al.* Improving low-earth orbit predictions using two-line element data with bias correction[C]. Advanced Maui Optical & Space Surveillance Technologies Conference, 2012.
- [32] KIM S, LIM H C, BENNETT J C, *et al.* Analysis of space debris orbit prediction using angle and laser ranging data from two tracking sites under limited observation environment[J]. *Sensors*, 2020, **20**(7):1950.
- [33] STEINDORFER M A, KIRCHNER G, KOIDL F, *et al.* Daylight space debris laser ranging [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**:3735.
- [34] COURDE C, TORRE J M, SAMAIN E, *et al.* Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, **602**:A90.
- [35] MENG Wen-dong, ZHANG Hai-feng, DENG Hua-rong, *et al.* 1.06  $\mu\text{m}$  wavelength based high accuracy satellite laser ranging and space debris detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, **69**(1):019502.  
孟文东,张海峰,邓华荣,等.基于1.06  $\mu\text{m}$ 波长的空间合作目标及碎片高精度激光测距试验[J].物理学报,2020,**69**(1):019502.
- [36] LI Yu-qiang, FU Hong-lin, Li Rong-wang, *et al.* Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan Observatories[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, **46**(1):0104004.  
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.
- [37] ZHANG Hai-tao, LI Zhu-lian, TANG Ru-feng, *et al.* Application of array detection technology in laser ranging[J/OL]. *Infrared and Laser Engineering*[2020-08-31].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20200824.1708.019.html>.  
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[2020-08-31].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20200824.1708.019.html>.
- [38] STEINDORFER M A, KIRCHNER G, KOIDL F, *et al.* Space debris science at the satellite laser ranging station Graz [C]. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), IEEE, 2017.
- [39] TANG R, LI Z, LI Y, *et al.* Light curve measurements with a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(21):5488-5491.
- [40] LIU Tong, SHEN ming, GAO Peng-qi, *et al.* Tumbling motion estimation of Rocket body based on diffuse reflection laser ranging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, **46**(1):219-226.  
刘通,沈鸣,高鹏骐,等.基于漫反射激光测距的火箭残骸翻滚姿态估算[J].中国激光,2019, **46**(1):219-226.
- [41] ZHAO Si-si, STEINDORFER M, KIRCHNER G, *et al.* Attitude analysis of space debris using SLR and light curve data measured with single-photon detector[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **65**(5):1518-1527.