

## 53 cm 双筒望远镜高重频空间碎片激光测距系统

李祝莲, 张海涛, 李语强, 伏红林, 翟东升

(中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216)

**摘要:**空间碎片的存在对在轨运行航天器的安全构成严重的威胁,同时空间碎片的不断产生对有限的轨道资源也将构成严重威胁。采用激光测距技术可实现空间碎片的实时高精度定轨,从而可有效规避其对航天器的撞击。为了开展高精度小尺寸空间碎片激光测距,研制了可快速平稳跟踪 400 km 以上空间目标的 53 cm 双筒望远镜,然后结合低功率高重频亚纳秒激光器和单光子探测技术,在该望远镜上研究和实现了空间碎片激光测距技术。结合激光测距方程,分析研究系统的空间碎片探测能力,当碎片距离为 1 000 km 时,能探测到回波光子的碎片最小尺寸约为 478.5 cm。实际观测表明:该激光测距系统具有探测米级空间碎片(约 1 000 km 远)的能力。

**关键词:** 测量与计量; 激光测距; 空间碎片激光测距; 高重频激光测距

**中图分类号:** P171.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0729001

## 53 cm binocular telescope high repetition frequency space debris laser ranging system

Li Zhulian, Zhang Haitao, Li Yuqiang, Fu Honglin, Zhai Dongsheng

(Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China)

**Abstract:** The existence of space debris has been causing great threats to the security of spacecraft in orbit. Space debris will occupy the limited and precious orbit capacities, so more and more debris generated in the space will also be a huge threat. The real-time high precision orbit determination of debris based on laser ranging technology can effectively avoid the collision between the debris and the spacecraft. In order to make high precision laser ranging to small size space debris, the 53 cm diameter binocular was developed here, which was capable of fast and steady tracking space targets of 400 km above the ground. Combined with low-power high-repetition-rate sub-nanosecond laser generator and single photon detecting technology, the space debris laser ranging technique was implemented on this binocular telescope. According to the laser ranging formulas, the detecting capability of this space debris laser ranging system was researched and analyzed. When the space debris was 1 000 km away from the ground station, the minimum size of the echo photon which can be detected is about 478.5 cm. This space debris laser ranging system has been putting into observation, and the practical observation results indicate this system has the capability to detect meter level debris in ca. 1 000 km distance.

**Key words:** measurement and metrology; laser ranging; space debris laser ranging; high repetition frequency laser ranging

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(U1431116); 国家自然科学基金青年科学基金(11403102); 中国科学院重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

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

通讯作者: 翟东升(1984-), 男, 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: zdsxy@ynao.ac.cn

## 0 引言

空间碎片是指宇宙空间中除正常工作的航天器外的所有在轨人造物体,包括完成任务的卫星本体和火箭箭体、火箭喷射物、航天任务执行过程中的抛弃物、空间物体碰撞产生的碎片等<sup>[1-2]</sup>。空间碎片的存在对在轨运行航天器的安全构成严重的威胁,同时空间碎片的不断产生对有限的轨道资源也将构成严重威胁。为了航天活动的安全,持续地开发和利用空间资源,就必须不断发展和提高对空间碎片的跟踪监视技术,增强对空间碎片环境分析预测能力,同时寻求有效的控制空间碎片的措施<sup>[3-4]</sup>。因此,发展高精度的空间碎片目标测量技术对航天器的安全运行将具有十分重要的意义。

卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR)是卫星观测中测量精度最高的技术,它通过精确测定激光脉冲信号从地面观测站到卫星的往返飞行时间,从而获得地面观测站到卫星的距离<sup>[5-6]</sup>。将该技术应用于空间碎片测量,是激光测距技术的一个重要发展方向且对空间碎片精密定轨意义重大。近几年来,国内外均在大力发展空间碎片激光测距技术,并取得了大量空间碎片激光测距数据。由于空间碎片不携带角反射器,反射率低且入射到其表面的激光束被漫反射,所以返回到地面观测站的回波信号极其微弱。因此,大口径望远镜,高效率的光学系统,高稳定性、高功率、高光束质量的激光器系统<sup>[7-8]</sup>以及高灵敏度的回波光子探测器对于漫反射激光测距系统来说是非常必要的<sup>[9-11]</sup>。如此才有可能探测到微弱的回波信号,有利于进行空间碎片探测。

基于 1.2 m 望远镜以及高功率激光器等设备,中国科学院云南天文台建立了 10 Hz 漫反射激光测距试验平台,并于 2010 年 6 月 7 日正式测到了火箭残骸的回波信号<sup>[3]</sup>。在云南天文台 1.2 m 望远镜测距系统成功探测到空间碎片的实践经验指导下,研制了 53 cm 双筒望远镜高重频亚纳秒漫反射激光测距系统,包括望远镜、激光器、单光子探测器以及测距控制系统等,实现了空间碎片的探测,探测碎片能力为米(m)级。系统进行再优化使性能稳定后,可开展空间碎片常规激光测距工作,为空间碎片的精密定轨和预警提供极大支持以及可在实现航天活动合

理、安全、持续地发展等方面起到积极的作用。

## 1 光路系统

### 1.1 53 cm 双筒望远镜

53 cm 双筒望远镜采用地平式机架结构<sup>[12-13]</sup>,其机械部分主要由激光发射镜筒 (transmitting aperture)、接收镜筒 (receiving aperture)、中间连接块 (middle connect block) 及方位底座 (elevation axis support)等组成,如图 1 所示。中间块用于连接两个镜筒、主镜室及高度轴系,高强度的中间块使两个镜筒的指向具有较高的一致性。

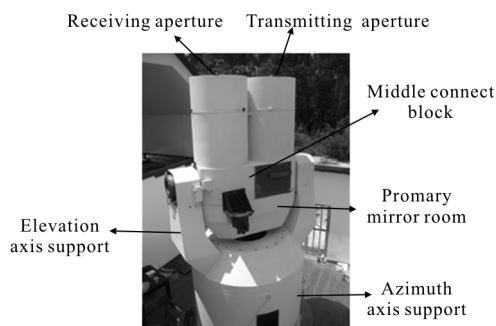


图 1 53 cm 双筒望远镜

Fig.1 53 cm binocular telescope

望远镜部分参数见表 1。激光发射望远镜的主、副镜面型均为旋转抛物面,主镜有效通光口径为  $\Phi 510$  mm,焦距为 1 078 mm,副镜有效通光口径为  $\Phi 48$  mm,焦距为 93 mm,整个系统的中心遮拦比小于 4.4%,主镜和副镜构成无焦系统,倍率为 11.5 $\times$ ,其面形精度优于  $\lambda/12$ ;接收望远镜采用 RC 光学系统,其主镜焦距为 1 400 mm,有效通光口径为  $\phi 510$ ,副镜焦距为 650 mm,接收望远镜遮拦比约为 17%。

表 1 望远镜部分参数表

Tab.1 Part parameters of the telescopes

Parameters	Transmitting aperture	Receiving aperture
Primary mirror effective diameter/mm	510	510
Focal length of primary mirror/mm	1 078	1 400
Secondary mirror effective diameter/mm	48	48
Focal length of secondary mirror/mm	93	650
Shielded ratio	<4.4%	17%

### 1.2 发射/接收光路

图 2 所示为 53 cm 双筒望远镜分光路激光测距收/发光路图。测距时:激光器输出的激光通过 1 级扩束系统后,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 2 级扩束后飞向空间目标;被空间目标反射回地面观测站的少部分光子信号进入 53 cm 双筒望远镜的接收主副镜,然后被副镜反射至分光镜、反射镜(图 2 中的 spectroscop、reflector)以及缩束系统后进入单光子回波探测器(图 2 中的 C-SPAD)。

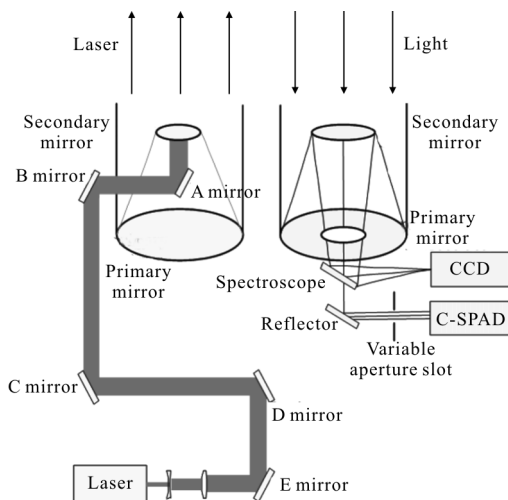


图 2 53 cm 双筒望远镜激光发射/接收光路

Fig.2 53 cm binocular telescope laser ranging transmitting and receiving optical path

按每块镜子将损失 10%的能量计算,发射光学系统的激光传输效率约为 0.39,接收光学系统的激光传输效率约为 0.66。

## 2 计算机控制与数据采集

53 cm 双筒望远镜激光测距计算机控制系统如图 3 所示,图中加阴影的单元完成 53 cm 双筒望远镜伺服控制,可进行 400 km 以上空间碎片快速平稳跟踪,跟踪精度优于 5"(RMS 值小于 3"),其实现原理如图 4 所示。

激光测距时,望远镜按轨道预报跟踪空间碎片,激光器按内系统触发方式出光;PIN 主波探测器将探测到每次发射的激光信号并输出主波脉冲(laser pulse)送事件计时器(ET)和测距控制计算机;一旦接收到主波信号,控制计算机就根据观测目标轨道距

离预报信息计算回波到达时刻送距离门发生器(range gate generator),由它在回波快到达时刻送门控信号给 C-SPAD 单光子探测器;C-SPAD 探测到回波信号后送事件计时器记录回波时刻;控制计算机采集事件计时器测量数据并进行信号实时识别与显示。

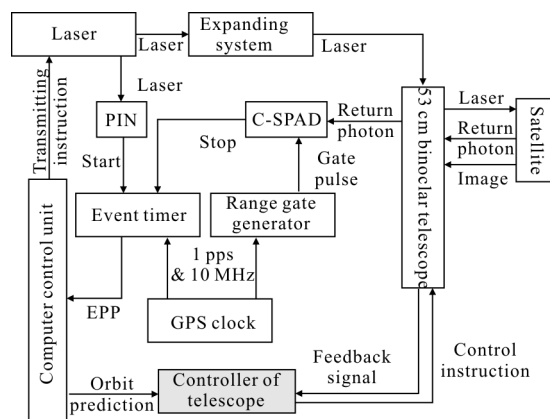


图 3 计算机控制系统框图

Fig.3 Block diagram of computer control system

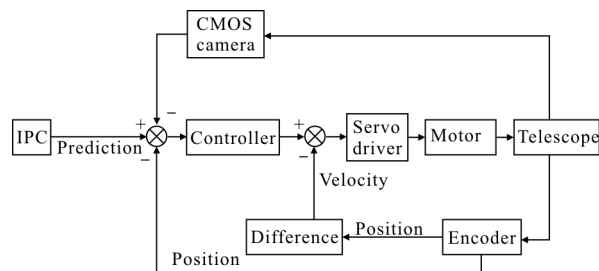


图 4 望远镜伺服控制框图

Fig.4 Block diagram of telescope servo control

## 3 测距能力分析

53 cm 双筒望远镜空间碎片测距系统激光器频率为 1 kHz,脉冲宽度为 750 ps,激光波长为 532 nm。每个激光脉冲能量为  $E_0(35 \text{ mJ})$ ,每焦耳激光光子数为  $N$ ,发射系统光路的透过率为  $T_e(0.39)$ ,则从地面测距系统出去的每个激光脉冲的光子数为  $E_0NT_e$ ;记测距系统发散角为  $\theta_e(3'')$ ,观测站到空间碎片的距离为  $R$ ,大气的透过率为  $T_a(0.92)$ ,激光脉冲到达空间目标时形成  $\pi\left(\frac{\theta_e}{2}R + \frac{D}{2}\right)^2$  的光斑 ( $D$  为激光在发射处的光束直径,510 mm),到达空间碎片面积为  $A_m$  上的光子数为  $E_0NT_e \frac{A_m}{\pi\left(\frac{\theta_e}{2}R + \frac{D}{2}\right)^2}$ ;若目标以反射率  $\rho$

(0.16)在  $2\pi$  立体角内发生漫反射,接收镜面有效面积为  $A_r$ ,接收光路的光学效率为  $T_r$ (0.66),接收器件的量子效率为  $\eta$ (0.2),考虑大气湍流对激光光束长期项扩展  $\sqrt{\langle \rho_L^2 \rangle}$ ,望远镜的跟踪偏差  $T_p$ (3"),则在接收器件光敏面上产生的平均光电子数  $N_r$  为<sup>[14-15]</sup>:

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

结合上式,利用 Matlab 软件对空间碎片的激光测距回波光子数进行了计算分析,结果见图 5 和图 6。

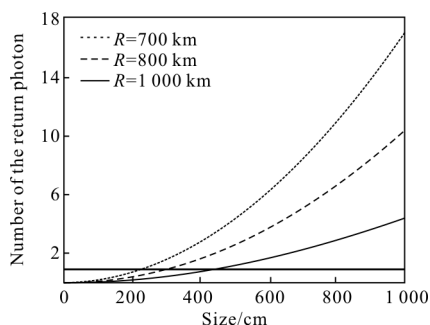


图 5 测距系统回波光子数估算(@35 mJ)

Fig.5 Reflected photon calculation of ranging system(@35 mJ)

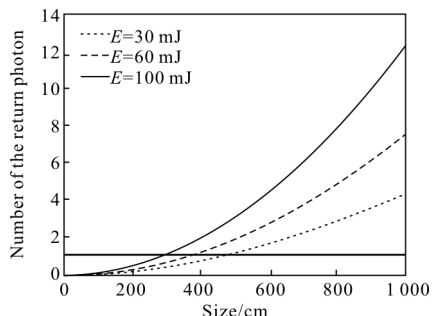


图 6 测距系统回波光子数估算(@1 000 km)

Fig.6 Reflected photon calculation of ranging system(@1 000 km)

由图可知:相同大小尺寸下,碎片目标的距离越远或激光脉冲能量越低,探测器探测到的平均回波光子数越少;相同距离下,随着碎片尺寸的增大或激光脉冲能量的增加,探测到的回波光子数也会随之增多。在单光子探测技术下,当碎片距离分别为 700、800、1 000 km 时,能探测到回波光子的碎片最小尺寸约为 241、311.5、478.5 cm;当激光发射能量分别为 35、60、100 mJ 时,对 1 000 km 远碎片进行测距,能探测到回波光子的碎片最小尺寸约为 478.5、365.8、283.3 cm。

### 4 观测试验

2016 年初使用 53 cm 双筒望远镜测距系统进行空间碎片激光测距试验,图 7 为 5 月 31 日测到的一颗空间碎片(代号:20466)的跟踪界面截图,该目标的雷达散射截面(RCS)约为 4.5 m<sup>2</sup>。由图可见信噪比高,获得了较多的测量数据量。

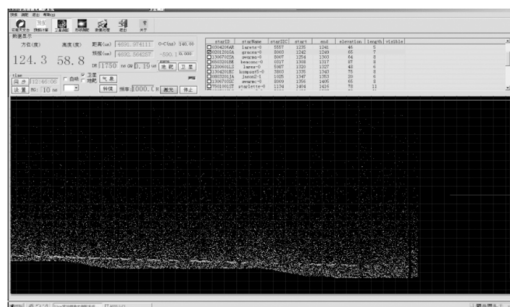


图 7 空间碎片测距跟踪界面截图

Fig.7 Interface of space debris laser ranging measurement

进行观测试验时,首先从 heaven-above 网站下载碎片的双行根数,获取碎片的轨道信息;然后从双行根数预报目标距离信息用于测距跟踪。表 2 为试验中获得回波信号的部分碎片。

表 2 获得回波信号的部分碎片

Tab.2 Partial debris of the reflected signal

Code	Perogee/km	Apogee/km	Period/min	RCS/m <sup>2</sup>	TB/ms
19 046	544	594	96.06	6.599 3	88
20 466	612	639	97.22	4.521	140
13 028	752	779	100.15	4.402	160
13 068	539	571	95.75	4.919 6	164
13 121	531	474	95.7	5.699 2	116
15 370	606	634	97.1	4.155 5	160

由于双行根数预报精度不高,因此测距过程中需要通过改变距离偏差(Range Bias, RB)和时间偏差(Time Bias, TB)来搜索回波信号。在观测试验中,主要进行了时间偏差改正,改正值均在 100 ms 左右。

### 5 结论

高精度的空间碎片激光测距技术在空间碎片的精密定轨和监视预警方面发挥着重要作用。针对空间

碎片激光测距需要高精度跟踪望远镜,研制了可快速平稳跟踪 400 km 以上空间目标的 53 cm 双筒望远镜(跟踪精度优于 5",峰峰值),再结合低功率高重频亚纳秒激光器和单光子探测技术,在该望远镜上实现了千赫兹空间碎片激光测距系统。分析计算得到该系统具有探测米级空间碎片的能力,并通过实际空间碎片观测试验获得验证。目前系统仍处于试验观测阶段,进行再优化使性能稳定后,可开展空间碎片常规激光测距工作,为空间碎片的精密定轨和预警提供极大支持以及可在实现航天活动合理、安全、持续地发展等方面起到积极的作用。

从空间碎片测距试验结果可见,高重频测距技术有利于空间碎片探测,窄脉冲激光器有利于提高空间碎片距离测量精度。

#### 参考文献:

- [1] Du Heng, Liu Jing. Manned spaceflight and space debris[J]. *Aerospace China*, 2002(2): 18–23.  
都亨,刘静.载人航天和空间碎片[J].中国航天,2002(2): 18–23.
- [2] Liu Jing, Wang Ronglan, Zhang Hongbo, et al. Space debris collision prediction research [J]. *Chineses Journal of Space Science*, 2004, 24(6): 462–469. (in Chinese)  
刘静,王荣兰,张宏博,等.空间碎片碰撞预警研究[J].空间科学学报,2004,24(6): 462–469.
- [3] Li Yuqiang, Li Zhulian, Fu Honglin, et al. The experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 154–158. (in Chinese)  
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):154–158.
- [4] Li Zhenwei, Zhang Tao, Sun Mingguo. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (2): 589–599. (in Chinese)  
李振伟,张涛,孙明国.星空背景下空间目标的快速识别与精密定位[J].光学精密工程,2015,23(2): 589–599.
- [5] Ye Shuhua, Huang Cheng. *Astrogeodynamics* [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House, 2000: 91–118. (in Chinese)  
叶叔华,黄城.天文地球动力学 [M]. 济南:山东科学技术出版社,2000: 91–118.
- [6] Ji Rongyi, Zhao Changming, Ren Xuecheng. High precision and high frequency pulse laser ranging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1461–1464. (in Chinese)  
纪荣祎,赵长明,任学成.高精度高重频脉冲激光测距系统[J].红外与激光工程,2011,40(8): 1461–1464.
- [7] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, et al. Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state laser system at 200 HZ repetition rate [J]. *Chineses Journal of Lasers*, 2014, 41(s1): 108005. (in Chinese)  
张忠萍,张海峰,吴志波,等.基于200 Hz重复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(s1): 108005.
- [8] Dai W, Song Y, Xu B, et al. High-power sub-picosecond all-fiber laser source at 1.56  $\mu\text{m}$  [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 53–55.
- [9] Li Yuqiang, Li Rongwang, Li Zhulian, et al. Application research on space debris laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3324–3329. (in Chinese)  
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.
- [10] Kirchner G, Koidl F, Friederich F, et al. Laser measurements to space debris from Graz SLR station [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 21–24.
- [11] Li Bin, Sang Jizhang, Ning Jinsheng. Analysis of accuracy in orbit predictions for space debris using semianalytic theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3310–3316. (in Chinese)  
李彬,桑吉章,宁津生.空间碎片半解析法轨道预报精度性能分析[J].红外与激光工程,2015,44(11): 3310–3316.
- [12] Wang Huai, Dai Shuang, Zhang Jingxu. Azimuth shafting bearing structure in a large Alt-azimuth telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1509–1516. (in Chinese)  
王槐,代霜,张景旭.大型地平式望远镜的方位轴系支撑结构[J].光学精密工程,2012,20(7): 1509–1516.
- [13] Huang Tao, Li Zhulian, Zhang Haitao, et al. Design and implementation for control system of 53 cm binocular laser ranging telescope [J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, 37(16): 1–7. (in Chinese)  
黄涛,李祝莲,张海涛,等.53 cm双筒激光测距望远镜控制系统的设计与实现[J].现代电子技术,2014,37(16): 1–7.
- [14] John J Degnan. Theoretical performance of NASA's SGSLR system ranging to GNSS Satellites [C]// Sigma Space Corporation ILRS Technical Workshop, 2015: 26–30.
- [15] Zhou P, Liu Z, Xu X, et al. Influence of turbulent atmosphere on the far-field coherent combined beam quality [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(9): 625–627.