

双望远镜的空间碎片激光测距试验研究

张忠萍^{1,2}, 张海峰^{1,2}, 邓华荣¹, 程志恩¹, 李朴¹, 曹建军¹, 慎露润¹

- (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, 江苏 南京 210008)

摘要: 大口径望远镜有助于提升空间碎片目标测量能力。根据激光测距雷达方程应用多台相对较小口径望远镜同时接收激光回波信号, 可等效实现单台大口径望远镜激光信号接收能力, 弥补大口径望远镜在目标快速跟踪、系统运行维护等方面不足, 并可兼顾测距系统测量能力和效率。基于中国科学院上海天文台相距约 55 m 的 1.56 m 和 60 cm 口径望远镜系统, 研究了双接收望远镜测距技术, 在国内首次开展双望远镜空间碎片激光观测试验, 验证了多望远镜同时接收碎片目标激光信号测量技术。测量数据结果表明: 1.56 m 口径望远镜激光回波接收能力是 60 cm 口径望远镜的约 3~4 倍, 双望远镜可等效于一台约 1.65 m 口径望远镜的激光接收能力, 在远距离、小尺寸空间碎片目标高精度激光观测中将发挥重要作用。

关键词: 空间碎片; 激光测距; 双接收望远镜; 测量试验

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0102002

Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes

Zhang Zhongping^{1,2}, Zhang Haifeng^{1,2}, Deng Huarong¹, Cheng Zhien¹, Li Pu¹, Cao Jianjun¹, Shen Lurun¹

- (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)

Abstract: For laser measurement to space debris adopting large aperture telescope will help to increase the ability of detecting laser echoes. According to laser link equation adopting multi-relative-small aperture telescopes could achieve the ability of receiving the laser echoes from one large aperture telescopes and the disadvantages for the large telescope, such as fast tracking ability, system running maintenance and so on could be offset and with the measuring ability and efficiency. Based on the 1.56 m aperture of astronomical telescope about 55 m far from the 60 cm telescope at Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, the method of laser measurement with two receiving telescopes have been investigated and the observing experiments of space debris for the first time in China are also performed to validate the feasibility of synchronously receiving laser echoes by multi-receiving telescopes. It is indicated from the measuring results that the receiving ability for 1.56 m telescope is approximate three or four times higher than that of 60 cm telescope and the equivalent

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(11303074, 11503068); 测绘地理信息公益性行业科研专项经费项目(201412001);
中国科学院国防创新基金(CXJJ-14-S108)

作者简介: 张忠萍(1960-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间目标激光测距技术及应用方面的研究。Email: zzp@shao.ac.cn

receiving aperture of 1.65 m telescope can be derived, which will play an important role in high precision laser ranging to far-distance and small-size space debris in future.

Key words: space debris; laser ranging; two receiving telescopes; measuring experiments

0 引言

随着世界各国航天技术的发展以及航天器发射的增多,地球空间中在轨运行的失效目标越来越多,比如废弃卫星、航天器残骸、火箭体及其解体碎片等,严重影响在轨航天器安全,对这些目标高精度监测、精密定位和编目是各国航天技术发展中一个重要方面^[1-3]。激光测距技术高精度特性,应用于空间目标监测,对提升目标轨道测定精度、预报能力、编目精度、预警能力等具有重要作用^[4-5]。澳大利亚、奥地利和中国等国家均开展了非合作空间目标高精度激光测距技术^[6-8],主要服务于空间目标高精度监测、预警等航天活动。

对于空间碎片目标,对入射激光束进行表面漫反射,返回激光信号弱,地面系统对激光回波接收能力与望远镜接收面积成正比,采用大口径望远镜系统有利于微弱激光回波接收。对于光学望远镜,接收口径提升需要大口径光学镜磨制技术、大规模支承结构及驱动装置支撑,因其实现难度大,且系统复杂、快速响应能力较低等特点,严重限制了大口径望远镜系统研制与应用,尤其是在对低轨快速运动碎片目标测量应用中。

文中提出采用多个较小口径望远镜同时接收激光信号测距的方法,以其实现单台大口径望远镜等效接收能力,可以增强测量系统快速响应性、可维护性和扩展性,从而达到发展空间目标激光测距的新技术。基于上海天文台 1.56 m 和 60 cm 口径望远镜系统,其中 60 cm 口径望远镜系统具备激光发射和接收功能,通过开展空间碎片的激光观测试验,研究双接收望远镜测距技术,验证了多望远镜同时接收碎片目标激光信号的测距技术优势。

1 测量技术原理

激光测距雷达方程是评估地面激光测距系统对空间目标测量能力的基础。根据激光测距雷达方程、

激光测距系统参数和空间目标截面大小等,可计算所获得的平均光子数^[9]。

$$n_0 = \frac{\eta_r}{h\nu} \times \frac{EA_r\sigma}{4\pi\theta_t^2 R^4} \times T^2 \times T_i \times T_r \times \alpha \quad (1)$$

地面激光接收系统中的光子探测器所产生光电子数服从泊松分布,如下:

$$P(n, n_0) = \frac{n_0^n}{n!} e^{-n_0} \quad (2)$$

对于单光子探测器,则产生一个光电子数的概率 $P(1)$ 为:

$$P(1) = 1 - e^{-n_0} \quad (3)$$

地面激光测距系统可接收到的激光回波数:

$$N = P(1) \times f \quad (4)$$

式中: f 为激光重复频率或探测次数。

为增加地面观测站激光回波数,可通过提高激光回波光子数 n_0 ,增加探测概率;也可增加激光回波信号探测次数。在激光器输出能量、重复频率、望远镜接收面积等系统参数一定的情况下,通过增加激光回波信号探测次数,实现增加激光回波光子数目的,进而提升目标测量能力。

空间目标反射的激光信号在达到地面站时可覆盖一定区域,望远镜接收面积越大,越有利于激光回波探测。如在激光束覆盖区域内设置多台接收望远镜,具有独立激光信号接收探测和计时系统,可实现对单次发射激光脉冲信号进行多次回波探测,增加地面站激光回波数,以此等效实现单台大口径望远镜对激光回波信号接收能力。根据上述激光测距雷达方程,理论上使用 N 个口径为 d 的望远镜同时接收激光回波信号,可实现单台口径为 $\sqrt{N} \cdot d$ 望远镜等效接收效果^[10]。

多接收望远镜激光测距系统示意图如图 1 所示,位于中间望远镜具有激光发射、目标跟踪和激光接收功能,其余望远镜仅具有目标跟踪和激光接收功能,并将接收的激光数据实时传输到中间望远镜进行处理,以此增加中间望远镜测量系统激光回波

数,实现对空间目标测量能力提升。

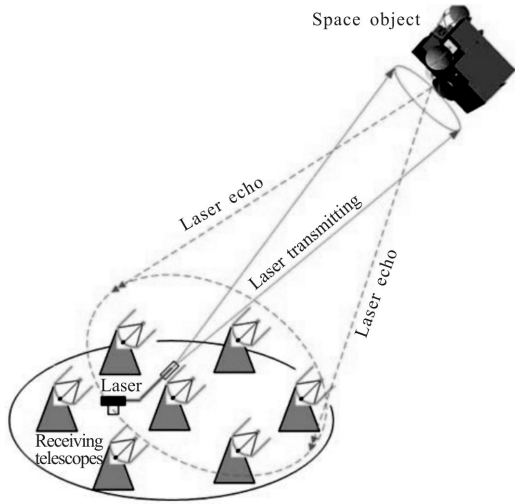


图 1 多接收望远镜空间目标激光测距示意图

Fig.1 Sketch map of laser ranging to space objects with multi-receiving telescopes

空间目标反射激光回波信号的覆盖范围与目标距离及目标反射类型有关。表 1 给出了不同距离的带有激光反射器空间目标的激光回波信号覆盖范围,分布在百米到公里范围内。对于空间碎片目标,由于目标激光反射类型为表面反射,回波信号方向不定,分布范围可达数百公里或更远。

表 1 不同距离的带有激光反射器空间目标的激光回波覆盖范围

Tab.1 Coverage of laser echoes from the space targets equipped with laser retroreflector at the different distance and laser divergence

	Distance/km	Laser divergence/(")	Diameter of footprint of laser echoes/m
LEO	600-1 500	18-24	<174
MEO	19 000-22 000	10-12	<1 279
GEO	36 000-38 000	6-8	<1 473
Moon	~380 000	3-4	<7 369

2 双望远镜空间碎片激光测距试验系统

空间碎片激光测距系统主要由高功率激光器、计算机控制系统、时间精密计时、激光回波探测、伺服控制系统及望远镜等组成,如图 2 所示,其中高光束质

量、高功率激光器系统,高效率光子探测系统,及高精度跟瞄性能望远镜系统是空间碎片激光观测关键。

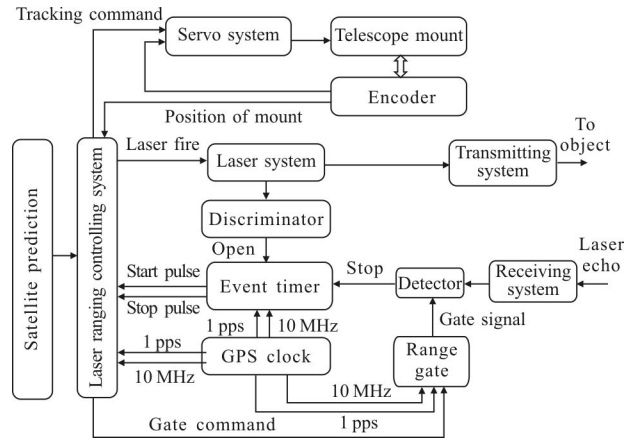


图 2 空间碎片激光测距系统组成框图

Fig.2 Structure of space debris laser ranging system

2.1 1.56 m/60 cm 双望远镜激光测距试验系统

上海天文台拥有 1.56 m 口径天文观测望远镜和 60 cm 口径激光测距望远镜,两者相距约 55 m,如图 3 所示,基于两台望远镜建立测量试验系统,开展多接收望远镜空间碎片激光测距试验研究。



(a) Relative position of two telescopes



(b) 1.56 m aperture telescope



(c) 60 cm aperture telescope

图 3 上海天文台 1.56 m 和 60 cm 口径望远镜系统

Fig.3 Aperture of 1.56 m and 60 cm telescopes at Shanghai Astronomical Observatory

其中,60 cm 口径激光测距望远镜系统为国际激光测距观测网台站之一,参与国际卫星激光联测。在空间碎片激光测距方面,通过关键技术研究,该望远镜测量系统基于 200 Hz 重复率激光器、高效率光子探测器及滤波器等取得了良好观测效果^[11]。1.56 m

口径望远镜是 20 世纪 80 年代中国自行设计、制造的第一架大型光学天文望远镜，是当时世界最大口径的天体测量望远镜，在天体物理和天体测量等研究领域，为国内外天文学家提供了第一手珍贵观测资料^[12]。由于该天文望远镜观测对象为恒星或运行速度慢高轨卫星，用于天文光学观测，不满足碎片激光测距要求。

对 1.56 m 口径望远镜快速目标跟踪性能、激光接收终端、激光测距控制、光学接收效率等进行升级改造。图 4 给出 1.56 m 天文观测望远镜系统在更新伺服控制系统后对空间碎片跟踪效果，对低轨快速碎片目标跟踪精度(RMS)优于 2"。

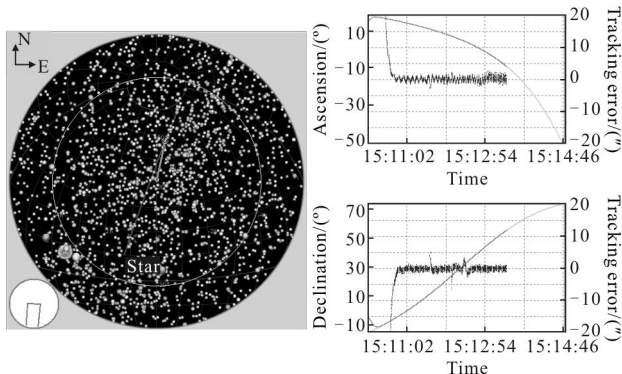


图 4 1.56 m 口径天文光学望远镜对碎片目标跟踪结果

Fig.4 Performance of 1.56 m telescope for tracking space debris

为了增加 1.56 m 口径望远镜导星 CCD 和激光回波探测的接收视场，对接收光学系统的组合焦距进行 2 倍缩焦($f/10 \sim f/5$),使导星相机接收视场由原来 1.28' 增加到 2.56'; 光子探测器接收视场由原来 45" 增加到 90", 缩焦后较大接收视场增强了对碎片目标跟踪捕获能力。

2.2 1.56 m/60 cm 双望远镜激光回波光子数估计

根据空间碎片激光测距雷达方程(公式(1)),和表 2 中所列的双望远镜系统参数,及大气透过率(双程)取 0.16,大气衰减因子 0.02,则对于距离 1000 km、截面积 4 m² 碎片目标,每 10 s 双望远镜系统可接收到的激光回波光子数(来自公式(4))分别为 160.6 个和 31.2 个。考虑到望远镜跟踪误差对激光回波数的影响 $1/(1+\sigma_p^2/\sigma_t^2)$ ^[13], σ_p 为跟踪误差 2" @1.56 m, 1" @60 cm, σ_t 为激光发散角 4"(半角),激光回波数分别降低到 138.5 个和 29.9, 则 1.56m 口径望远镜接收的回波数是 60 cm 口径望远镜约 4.6 倍。通过对双望远镜的数据融合处理,可显著增加目标激光回波数,

可等效于一台接收口径约 1.65 m 望远镜系统接收能力,其中副镜口径取 0.55 m、光学接收效率取 0.65、跟踪精度为 2"。

表 2 1.56 m 和 60 cm 口径望远镜系统主要参数
Tab.2 Major specifications of the aperture of 1.56 m and 60 cm telescopes system

Items	1.56 m telescope system	60 cm telescope system
Optical mode	R-C system	R-C system
Tracking mount	Equatorial	Altazimuth
Focus length	7.8 m	5.2 m
Diameter of secondary mirror	0.55 m	0.2 m
Efficiency of receiving optical system	~60% @532nm	~75% @532 nm
Efficiency of laser detector	C-APD,40% @532 nm	APD,40% @532 nm
FOV of detection	~90"	~135"
Tracking precision (RMS)	≤ 2"	≤ 1"
Timing system	A033 event timer	A033 event timer
Efficiency of laser transmitting system	-	~60% @532nm
Laser system	-	60 W @200 Hz
Diameter of laser transmitting telescope	-	21 cm
Divergence of laser signal	-	~10"

3 双望远镜空间碎片激光测距及分析

3.1 双望远镜空间碎片激光测距结果

利用建立的 1.56 m/60 cm 双望远镜激光测距,由 60 cm 口径望远镜系统采用高功率脉冲激光器系统(激光系统参数如表 2 所示)向空间碎片目标发射激光脉冲,1.56 m/60 cm 同时跟踪同一颗目标开展单端发射、两端接收的空间碎片激光测距试验。在 2014 年 12 月 5 日、12 月 22 日成功对空间多颗火箭体残骸碎片目标进行了激光测量,为国内首次开展双望远镜空间碎片激光观测试验。图 5(a)给出了 2014 年 12 月 22 日由 1.56 m 口径望远镜获得的一颗火箭残

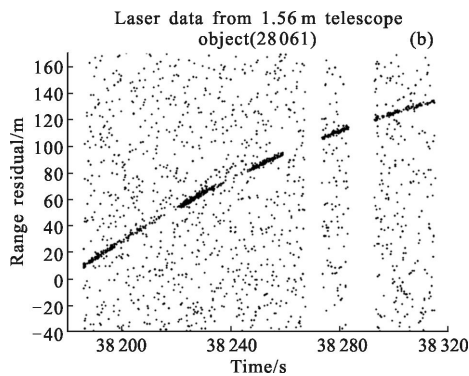
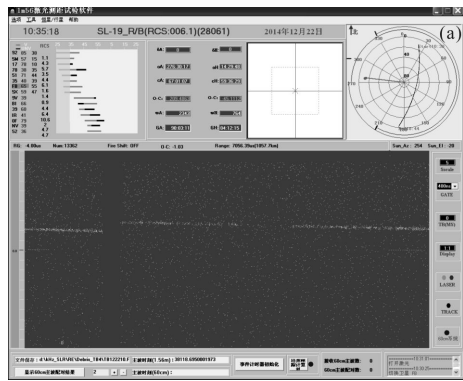


图 5 1.56 m 口径望远镜接收激光回波信号及配对后的距离残差
Fig.5 Real-time control interface of receiving laser echoes from space debris by 1.56 m telescope

骸目标的激光回波信号实时测量界面, 所测量的目标代号为 2 8061, 目标雷达截面积(RCS)为 6.1 m², 测量距离约 1 057 km, 中间密集点为有效激光回波数据, 其余点为噪声数据。通过对 1.56 m 口径望远镜记录的激光回波时刻与 60 cm 望远镜系统记录的激光发射时刻进行匹配处理, 获取了激光信号从 60 cm 望远镜→空间目标→1.56 m 望远镜的传输时间, 并与目标轨道预报值作比较, 计算目标距离残差值, 如图 5(b)所示, 经过数据预处理过程, 剔除噪声数据, 提取有效测距数据, 激光测量精度(内符 RMS)约 92 cm。

表 3 列出了 1.56 m 口径望远镜所获得的碎片激光回波数据统计, 目标轨道高度从 780~1 530 km、目标雷达截面积从 1.6~6.48 m², 目标类型为火箭体残骸, 目标测距精度(内符 RMS)优于 1 m。

上述双望远镜测量试验系统中采用了独立的时间频率基准, 各自时钟频率稳定度达 10⁻¹², 对于碎片目标测量, 观测弧长通常不超过 5 min, 对测距精度影响不超过 500 ps, 即厘米级。另外, 不同望远镜系统间的时钟钟差直接影响目标距离测量值误差, 但此误差为系统误差, 不影响目标距离值测量精度(内符 RMS)。根据表 3 中给出 1.56 m 望远镜测量数据

表 3 1.56 m 口径望远镜接收空间碎片激光回波测量统计

Tab.3 Results of laser measurement to space debris from 1.56 m telescope

Date	NORAD ID	RCS/m ²	Orbit height/km	Start time (UTC)	Length of pass /min	Points	Precision/cm
2014/12/05	24969	3.9	780	10:07:55	0.79	380	81.1
2014/12/05	32957	6.5	1 500	10:51:58	0.81	153	55.4
2014/12/05	16511	4.3	990	11:26:52	2.4	1 078	92.1
2014/12/22	28061	6.1	1 010	10:34:08	4.44	3 441	91.6
2014/12/22	21090	4.7	990	10:53:20	2.45	251	131.9
2014/12/22	02940	1.6	860	11:02:32	1.3	471	48.9
2014/12/22	21734	7.2	1 530	11:31:00	3.01	161	70.4

精度可知, 其与 60 cm 单台望远镜激光测距系统测量数据精度相当^[11]。

3.2 激光测距结果分析

为比较分析 1.56 m/60 cm 双望远镜系统对碎片目标测量能力, 对两望远镜同时段内所获得的激光回

波数及信噪比进行了统计。图 6 给出了 2014 年 12 月 05 日测量的两颗碎片目标 (对应表 3 中目标代号 16511 和 24969, RCS 分别为 4.3 m² 和 3.9 m²) 在同一观测时段内每 10 s 内 1.56 m 和 60 cm 望远镜激光回波数统计, 其平均回波数分别为 75、18 和 76、24 个。

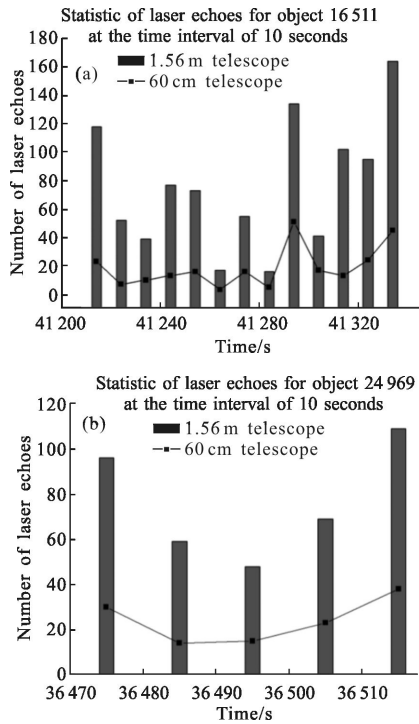


图 6 1.56 m/60 cm 望远镜同时段内每 10 s 激光回波光子数统计
Fig.6 Statistic of laser echoes per 10 seconds at the same time for 1.56/60 cm telescopes

通过对表 3 中其他目标激光回波光子统计, 每 10 s 内 1.56 m 望远镜激光回波数是 60 cm 望远镜约 3~4 倍, 与第 3.2 节由激光测距雷达方程分析结果基本符合, 可实现单台大口径等效接收能力, 可应用于对远距离、小尺寸目标激光测量。

图 7 给出了图 6 中两个碎片目标的 1.56 m 和 60 cm 双望远镜激光回波信号与噪声数的比较情况, 即信噪比。根据两颗目标(代号 16511 和 24969)实际测量时的距离门设置情况, 信噪比统计时距离门宽分别取为 667 m 和 242 m, 统计时间间隔为 5 s, 即分别统计此时间间隔内的回波数和噪声数, 计算信噪比, 不同距离门宽其信噪比有一定差异。图中每 3 个柱状图统计为一组结果, 其中第 1 个为 60 cm 望远镜结果, 第 2 个为 1.56 m 望远镜结果, 第 3 个为双望远镜数据融合后的结果。

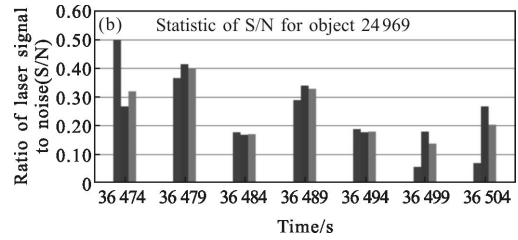
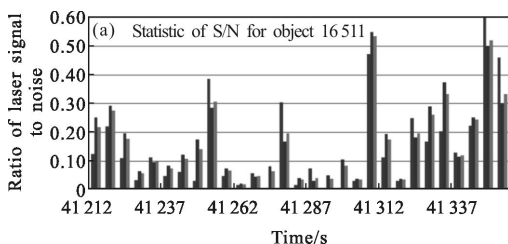


图 7 1.56 m/60 cm 望远镜同时段内每 5 s 激光回波信号的信噪比统计

Fig.7 Statistic of ratio of laser signal to noise per 5 seconds at the same time for 1.56/60 cm telescopes

由于 1.56 m 望远镜大接收口径, 在增加激光回波信号同时, 其噪声数也将增加。同时 1.56 m 望远镜接收视场要小于 60 cm 望远镜系统(见表 2 参数), 在一定程度上降低了背景噪声数, 使得激光测量数据的信噪比与 60 cm 望远镜数据相差不大。根据双望远镜数据融合后信噪比统计结果, 采用多个独立光子探测的多接收望远镜系统观测对激光数据信噪比影响不大。从目标激光数据分布角度分析, 噪声数据为随机分布, 多望远镜噪声数据融合后仍为随机分布, 而有效激光回波信号为有规律分布, 扣除各望远镜系统时延量后, 进行数据融合, 可显著增加单位时间内的有效激光回波数据量, 十分有利于提升对激光回波信号的识别能力及对空间目标的测量能力。

4 结 论

高精度空间碎片激光测距技术在空间碎片轨道精密测定中将发挥重要作用。针对空间碎片激光测量需要大口径接收望远镜, 但大口径望远镜具有研制技术难度大、系统维护复杂、碎片目标快速跟踪性能差等特点, 为此提出了采用多个相对较小口径望远镜同时接收激光回波信号的测距方法, 以实现单台大口径望远镜的等效接收能力。从理论上对此测距模式的可行性进行了分析, 以上海天文台 1.56 m 和 60 cm 双望远镜系统, 建立了用于验证多接收望远镜激光测距技术的试验系统。在国内首次实现了双望远镜系统对空间碎片激光测距试验, 验证了多接收望远镜在提升目标激光回波探测能力的技术优势, 是实现远距离、小尺寸碎片目标激光观测的有效技术途径, 为空间目标监测预警提供高精度测量数据。

基于该测距技术, 在多接收望远镜相距数百千

米或更远时,同时接收目标回波数据,可实现多台站同时测量目标的目的,相比于单台测量系统,有助于提升目标测定轨精度,具有较好的研究价值和应用前景。

参考文献:

- [1] Qi Xianfeng. Review of space debris observation[J]. *Erospace China*, 2005(7): 24–26. (in Chinese)
祁先锋. 空间碎片观测综述[J]. 中国航天, 2005(7): 24–26.
- [2] Gao Wen, Zhu Ming, He Baigen, et al. Overview of target tracking technology[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 365–374. (in Chinese)
高文, 朱明, 贺柏根, 等. 目标跟踪技术综述[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 365–374.
- [3] 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.
- [4] Zhu Feihu, Wang Li, Guo Shaogang et al. Large dynamic range laser ranging system for non-cooperative target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 8–12. (in Chinese)
朱飞虎, 王立, 郭绍刚, 等. 面向非合作目标的大动态范围激光测距系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 8–12.
- [5] Tao Huirong, Zhang Fumin, Qu Xinghua. Experimental study of backscattering signals from rough targets in non-cooperative laser measurement system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 95–100. (in Chinese)
陶会荣, 张福民, 曲兴华. 无合作目标测量中目标表面后向散射特性的实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 95–100.
- [6] Greene B, Gao Y, Moore C, et al. Laser tracking of space debris [C]//Proceedings of 13th Laser Ranging Workshop, 2002.
- [7] Georg Kirchner, Franz Koidl, Fabian Friederich, et al. Laser measurements to space debris from Graz station[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 21–24.
- [8] Zhang Zhongping, Yang Fumin, Zhang Haifeng, et al. The use of laser ranging to measure space debris [J]. *Research in Astron and Astrophys*, 2012, 12(2): 212–218.
- [9] John J Degian. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review, contributions of space geodynamics technology [D]. US: AGU, 1993, 25: 133–162.
- [10] Vilrotter J V, Lau C W, Srinivasan M, et al. An optical array receiver for deep-space communication through atmospheric turbulence[D]. US: JPL Publication, 2003, 42–154.
- [11] Zhang Haifeng, Meng Wending, Cheng Zhien, et al. Development of laser measurement to space debris with high power laser system in Shanghai Astronomical Observatory[J]. *Space Debris Research*, 2013(S): 1–6.
- [12] Zhu Nenghong, Wang Lanjuan, Yang Zhenhua, et al. The design of the 1.56 m astrometric telescope [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinic*, 1981, 3: 225–237. (in Chinese)
朱能鸿, 王兰娟, 杨振华, 等. 1.56 m 天体测量望远镜设计 [J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1981, 3: 225–237.
- [13] Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Yang Fumin, et al. Statistical analysis of successful detection probability of the returns in satellite laser ranging [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(3): 28–29. (in Chinese)
吴志波, 张忠萍, 杨福民, 等. 卫星激光测距回波探测成功率统计分析[J]. 测绘科学, 2006, 31(3): 28–29.