

## 地基激光测距系统观测空间碎片及其探测能力研究

张忠萍<sup>1,3</sup>,程志恩<sup>1</sup>,张海峰<sup>1,3</sup>,邓华荣<sup>1</sup>,江海<sup>2</sup>

(1. 中国科学院上海天文台,上海 200030; 2. 中国科学院国家天文台,北京 100012;  
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)

**摘要:** 空间碎片高精度测量是提升碎片目标精密监测与预警的重要途径。作为空间碎片地基光电探测技术,激光测距具有高精度测量特性。根据空间碎片激光测距特点以及瞄准国际技术发展,研制高性能高功率激光器、突破高效率激光信号探测等,国内首先建立了 60 cm 口径空间碎片激光测距系统,实现了碎片目标测量距离从 500~2 600 km,目标截面积从小于 0.5 m<sup>2</sup> 到大于 10 m<sup>2</sup>,具备了空间碎片常规测量能力。根据空间碎片激光测距方程,结合实际激光回波数据,综合考虑空间碎片过境时段等,构建了地基激光测距系统探测仿真模型,研究了 60 cm 口径空间碎片激光测距系统探测能力,可对距离 1 000 km、直径大于 50 cm 碎片目标进行观测,与实际测量结果相符,验证了仿真模型的合理性,为未来地基激光测距系统高效运行及测量装备建设与探测效能评估奠定了基础。

**关键词:** 空间碎片; 激光测距; 测量系统; 探测模型; 效能评估

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0329001

## Observation of space debris by ground-based laser ranging system and research on detecting ability

Zhang Zhongping<sup>1,3</sup>, Cheng Zhien<sup>1</sup>, Zhang Haifeng<sup>1,3</sup>, Deng Huarong<sup>1</sup>, Jiang Hai<sup>2</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;  
2. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;  
3. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** High precise measurement of space debris is an important way to improve the precise surveillance and collision prediction for space debris. As one of space debris measuring technology based on the ground-based electro-optic telescopes, laser ranging is the most accurate. According to characteristic of laser ranging to space debris and aiming at the international technical development, through the development of high power laser system and the breakthrough of high efficiency laser signal detection, the space debris laser ranging system with the aperture of 60 cm telescope was set up as the pioneer in the development of laser measurement to space debris in China. The routine laser measurement of space debris were implemented with the measured distance from 500 km to 2 600 km, cross section from less than 0.5 m<sup>2</sup> to more than 10 m<sup>2</sup>. According to the laser ranging link equation of space debris, combining with the statistic of laser echoes, and considering the sunlight arcs of space debris orbit when

收稿日期: 2016-07-09; 修订日期: 2016-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(11303074, 11503068, U1631240); 中国科学院国防创新基金(CXJJ-14-S108);  
中国科学院重大装备项目(2920100701); 国防科工局空间碎片“十二五”预研项目(K0103110)

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

passing through the ground station, the detection simulation model of ground-based laser ranging system were constructed. The evaluation of detected ability of space debris laser ranging system with 60 cm aperture telescope was also performed with the capability of measuring debris at the distance of 1 000 km and diameter of more than 50 cm which accorded with the actual measurement results. The simulation models of laser ranging to space debris will lay the foundation for the ground-based laser ranging system with high efficient running and development of observation equipment and evaluation of detection efficiency in future.

**Key words:** space debris; laser ranging; observing system; detection model; efficiency evaluation

## 0 引言

空间已成为未来国际航天大国发展的战略核心。随着全球空间技术发展,越来越多的飞行器被发射到地球外围空间,使得环绕地球运行的火箭体、失效卫星、飞行器碰撞而产生的碎片也随之越来越多。空间碎片已成为严重威胁在轨工作航天器安全的重要因素,也是国际航天大国所必须关注的问题。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<sup>[1-4]</sup>。地基激光测距技术的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<sup>[5-7]</sup>。美国、澳大利亚、奥地利和中国等均发展了非合作空间目标(包含空间碎片)高精度激光测距技术<sup>[8-10]</sup>,并加强多方技术交流协作,提供一种可靠的、高精度空间碎片测量技术,服务于空间碎片高精度监测、预警等航天活动,以增强空间目标的预警能力及空间态势感知能力。

激光测距技术是通过测量激光脉冲往返于地面站与空间目标飞行时间获取目标高精度距离信息。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,测量难度大<sup>[11]</sup>。为此,提升地面站激光发射功率、弱信号激光探测能力是激光测距技术实现空间碎片观测与应用的重要途径。近些年,中国科学院上海天文台通过对空间碎片激光测距系统升级改造<sup>[10-12]</sup>,引进吸收国外先进技术,系统测量能力也在不断提升。在高性能激光器系统、弱回波信号探测技术等方面取得了重大突破,实现了对空间碎片激光测距常规化观测,推动了我国空间碎片激光测距技术发

展,为空间碎片高精度监测打下技术基础。

为进一步促进激光测距技术在空间碎片监测预警中的应用效能,有必要对激光测距系统设备探测性能进行分析<sup>[13]</sup>。文中通过空间碎片激光测距方程,结合激光回波数据,综合考虑空间碎片过境时段,构建了地基激光测距系统测量模型,开展地基激光测距系统对碎片探测能力分析,为指导激光测量系统观测策略制定、系统升级改造等提供仿真分析依据。

## 1 空间碎片激光测距的关键

不同于带激光反射器的合作卫星或空间飞行器,空间碎片目标对地面站发射的激光信号进行漫反射,地面站可接收到的激光回波信号微弱,因此高功率、高光束质量、窄发散角激光器系统,以及高效率激光回波信号探测是提升空间碎片测量能力的关键,尤其是对远距离、小尺寸碎片目标观测。

### 1.1 200 Hz 重复率高功率激光器系统

上海天文台在空间碎片激光测距的初期<sup>[10]</sup>,采用低重复频率(20 Hz 以下)灯泵浦模式大能量激光器。限于激光器工作模式,高功率输出状态下,其内部光学器件易受损,使得输出功率难以有较大提升,且光束质量难以保证。根据国外空间碎片激光测距发展经验<sup>[8-9]</sup>,实现高功率、高性能激光器系统,最佳方式是提高激光器工作频率,降低单脉冲能量,改善内部光学器件工作性能。激光器工作频率增加,固然可提高激光输出功率,但光子探测器暗噪声数随重复频率增加而增加<sup>[14]</sup>,不利于对激光回波光子探测。

根据空间碎片激光探测特点,与国内知名高功率激光器研究所合作,设计研制了重复频率 200 Hz、

输出功率 60 W 激光器系统(光学系统原理如图 1 所示)。应用主振荡功率放大技术 (Major Oscillation Power Amplification, MOPA), 实现短脉冲高光束质量的激光输出。采用了单一的凸柱面镜进行热效应补偿, 及半导体器件使 KTP 晶体工作在恒温状态, 倍频效率可达 50%。

其主要性能参数:(1) 输出功率  $\geq 60$  W;(2) 激光波长 532 nm;(3) 激光脉宽  $\leq 8$  ns;(4) 光束指向稳定性  $\leq 50$   $\mu$ rad;(5) 光束质量( $M^2$ )  $\leq 3.5$ 。

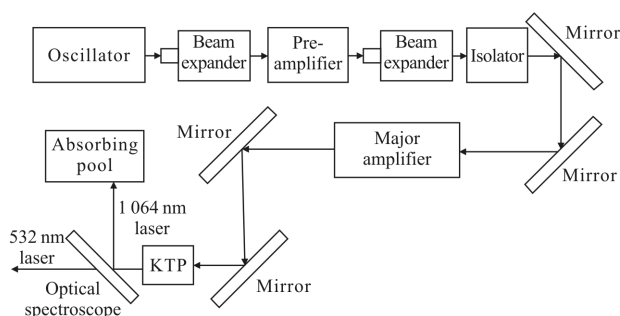


图 1 200 Hz 重复率高功率激光器光学系统原理

Fig.1 Optical principle of high power laser system with 200 Hz

### 1.2 高效率激光回波探测

对于空间碎片激光测距, 由于目标轨道预报误差大, 需在径向方向设置较大的距离偏差修正量, 即增加距离门宽设置范围, 但系统探测的背景噪声数也相应增加, 影响了激光回波信噪比和信号识别能力。增强激光回波信号探测能力是空间碎片激光测距的基础。

降低激光探测中噪声数, 有助于扩大距离门控设置范围, 以弥补目标轨道预报误差; 提高光子探测器的探测效率, 可增加对远距离、小尺寸目标弱回波信号的探测能力。卫星激光测距中所采用的光子探测器, 高重复率时暗噪声数很大, 不利于碎片目标激光信号高效探测<sup>[14]</sup>。根据空间碎片激光信号特点, 采用了低噪声高效率 APD 光子探测技术, 应用时间滤波技术来降低系统噪声; 设置高速甄别比较电路, 加快响应速度, 减小探测死时间增加探测概率; 选用了盖格(Gaige)模式探测芯片, 实现单光子探测的灵敏度; 同时, 应用恒温制冷技术, 最大程度降低探测暗噪声。

主要性能参数如下:

(1) 探测芯片尺寸为 500  $\mu$ m;(2) 暗噪声数为

18 kHz@200 Hz;(3) 探测效率  $\geq 40\%$ @532 nm。

图 2 给出了所研制的 APD 光子探测器探测效率与激光波长关系, 对于 532 nm 激光, 探测效率约 60%。

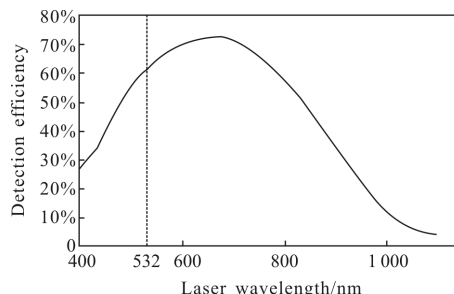


图 2 APD 光子探测器的探测效率曲线

Fig.2 Detecting efficiency curve of APD detector

低噪声高效率 APD 探测器解决了在高重复率工作模式下的低暗噪声数和对回波信号高探测能力。而来自天空背景和背景亮度噪声, 尤其是大尺寸目标, 本体亮度高于 6 星等, 这对激光回波信号探测产生很大干扰。系统接收到的噪声强度水平与滤波片的带宽成正比, 为此采用了光谱滤波技术(中心波长 532 nm、带宽 2 nm、透过率 90% 以上), 降低了测量系统背景噪声数量级, 减少了对光子探测器影响, 提高了碎片目标激光信号探测能力。

## 2 空间碎片高重复率激光测距观测结果与分析

### 2.1 空间碎片高重复率激光测距观测

所采用的 200 Hz、60 W 激光器系统提供了高性能激光源, 低噪声高效率 APD 探测器和窄带光谱滤波器解决了高信噪比探测关键问题。基于上海天文台已有对空间碎片跟踪精度 1" 的 60 cm 口径激光测距系统, 利用两行根数作为碎片目标引导数据, 开展了空间碎片激光测距观测活动, 以验证上述激光器、光子探测器、光谱滤波器等在解决空间碎片激光测距关键技术的应用效果。

观测期间所跟踪和测量的碎片目标轨道高度从 500~2 000 km, 获得了超过 200 颗目标(火箭体、雷达标校星、碎片目标)、400 圈次的激光观测数据。图 3 给出了一颗长征火箭体碎片目标 (NORAD 20853, RCS 0.6 m<sup>2</sup>) 激光数据距离残差图, 其中有规律点为激光回波数据, 弥散点为噪声数据, 测量距离 1 050~1 230 km, 测距精度约 65 cm。

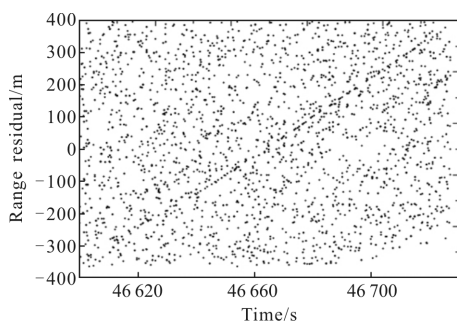


图 3 CZ-4 火箭体碎片目标激光数据距离残差

Fig.3 Range residual of laser data from the debris separated from CZ-4 rocket

图 4 给出了上海天文台 60 cm 口径望远镜系统碎片观测统计,其中横坐标为测量距离,纵坐标为观测仰角,不同斜线代表不同目标截面积。所观测的空间碎片中,测量距离 500~2 600 km,截面积 0.3~20 m<sup>2</sup>。测量结果表明,上海天文台空间碎片激光测距系统在夜间天气条件良好情况下可进行常规测量,用于空间碎片监测,并提供高精测量数据。

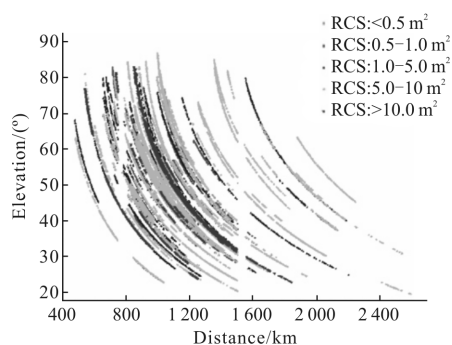


图 4 60 m 口径激光测距望远镜系统空间碎片观测统计

Fig.4 Statistic of laser ranging to space debris by the 60 cm telescopes system

## 2.2 空间碎片激光观测成功率分析

为评估分析碎片目标激光测距成功率的影响因素,对观测期间有多次跟踪的碎片目标的圈次测量成功率进行了统计(具有回波数据的圈次/跟踪的总圈次),如图 5 所示。对于截面积 1~5 m<sup>2</sup> 碎片目标的圈次测量成功率在 60%~85%;对于截面积 5~20 m<sup>2</sup> 碎片目标的圈次测量成功率接近 100%,即对于大尺寸碎片目标测量基本上每圈次即可成功测量。

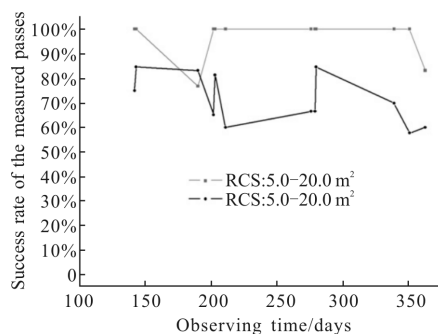


图 5 不同截面积空间碎片观测圈次成功率统计

Fig.5 Success rate of measured passes of space debris with different cross section

在观测期间,也出现部分例外的碎片目标,其截面积、轨道高度均在所选择目标目录内,但出现圈次测量成功率较低,甚至多次未获得激光回波数据的情况,如表 1 所示。

由表 1 中所列的目标信息可知,对于编号 8744 (截面积 2.9 m<sup>2</sup>)目标,按照目标反射光强与截面积成正比及目标亮度相差一个星等其光强相差约 2.5 倍的关系,该目标亮度偏低,说明其反照率偏低,同时由于该目标为椭圆轨道,近地点高度为 368 km,轨道

表 1 空间碎片目标激光观测成功率分析

Tab.1 Analysis of the success rate of laser measurement to space debris

NORAD ID	Name of targets	Orbit perigee x apogee/km	RCS/m <sup>2</sup>	Brightness @ 1000 km, 50% illuminated	Total tracking passes	Successful passes
8744	Cosmos 807	368×1 207	2.9	7.0	4	0
16910	EGP H1 rocket	1 482×1 596	11.5	5.0	7	1
20150	Cosmos 2034 rocket	955×997	4.5	5.0	3	1
20528	Cosmos 2061 rocket	964×1 009	5.5	5.0	3	0
20805	Cosmos 2100 rocket	954×997	5.0	5.0	7	1
21090	Cosmos 2123 rocket	959×988	4.8	5.0	3	1
38041	Globalstar 80	1 413×1 415	4.9	7.5	4	1
38042	Globalstar 82	1 414×1 414	5.2	7.5	3	1
38043	Globalstar 92	1 413×1 415	5.4	7.5	4	0

预报误差较大,导致 4 次跟踪测量中,均未获得有效数据。对于截面积为 11 m<sup>2</sup> 的 16910 目标,在相同距离情况下,目标的亮度与目标相当,说明该目标对可见光反照率明显偏低,导致在 7 次跟踪测量中,仅成功测到一次。多颗 Cosmos 火箭体,测量成功率较低,但图 5 中圈次测量成功率较高的目标中也有多颗 Cosmos 火箭体目标,这可能与目标在轨道姿态状态有关,导致激光反射方向不朝向地面站。对于 Globalstar 卫星,在图 5 统计中有一颗 Globalstar6 卫星,轨道高度 1 875 km,目标截面积 2.6 m<sup>2</sup>,目标亮度 5.5 星等,共跟踪测量了 3 次,均获得有效激光数据,但对比表 1 中 Globalstar 卫星,它们的亮度偏低,说明表 1 中 Globalstar 卫星反照率低于 Globalstar6 卫星,且轨道高度 1 400 km,激光回波弱,测量难度大。

由上述分析可知,对于近地点低的椭圆轨道目标,预报误差大,测量难度大;即使同一类目标,其在轨道运行姿态不确定、目标表面反照率不同等,对目标激光观测成功率有较大影响。

### 3 激光测距系统空间碎片探测能力

#### 3.1 空间碎片激光回波分析

空间碎片激光回波接收强度直接决定着回波信号识别能力和碎片目标测量能力。对上海天文台 60 cm 口径空间碎片激光测距系统测量的碎片目标激光回波数进行了统计,如图 6 所示。其中横坐标为目标 NORAD 代号,左纵坐标为每秒钟回波数(方点表示),右纵坐标为目标截面积(圆点表示)。由此可看出,对于大尺寸目标激光回波率最高达 50%;小尺寸目标回波数相对较低,激光回波率 1% 左右。接收到的激光回波数除与目标截面积有关外,与观测时的天气透明度、目标激光反射能力等不确定的因素有关。

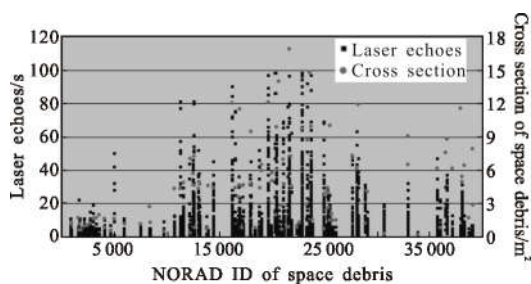


图 6 空间碎片每秒钟激光回波数统计

Fig.6 Statics of laser echoes from space debris per one second

#### 3.2 空间碎片激光探测能力分析

空间碎片激光测距方程是评估地面系统测量能力的基本依据,结合地面测量系统最低激光回波探测阈值,可分析激光测距系统对观测范围的碎片目标观测效能,为激光测距系统科学运行方案制定提供依据。漫反射激光测距方程如下<sup>[15]</sup>:

$$n_0 = \frac{\eta_a}{h\nu} \times \frac{E_r A_r \sigma}{4\pi \theta_i^2 R^4} \times T^2 \times T_r \times T_a \times \alpha \quad (1)$$

式中: $n_0$  为发射单次激光脉冲后地面测距系统接收到平均光电子数。光电子接收器光敏面产生光电子应服从泊松分布。按照泊松分布,对于单光子探测,平均光电子数为  $n_0$  时,产生 1 个及以上光电子数的概率:

$$P(1) = 1 - e^{-n_0} \quad (2)$$

当激光发射频率为  $f$ ,则每秒钟激光回波数: $N = P(1) \times f$ 。根据空间碎片激光回波数统计,及回波信号识别能力,确定了每秒钟达 5 个及以上即认为成功观测到目标,即目标测量成功的判断阈值。

基于上述激光回波数探测阈值、激光测距方程,并考虑空间碎片目标轨道、目标截面积、目标光学可见期等因素,建立了空间碎片目标探测仿真模型,表 2 给出了 2014 年 10 月 4 日、6 日、7 日,12 月 17 日、29 日和 2015 年 1 月 1 日 6 天内实测的碎片目标与其模拟仿真的对比结果。

表 2 6 天内实测空间碎片数与模拟仿真的对比结果  
Tab.2 Number of laser ranging to space debris vs the simulated results in the six days

Date	Number of measured space debris	Number of simulated space debris	Accordant ratio
2014-10-04	20	19	95%
2014-10-06	40	36	90%
2014-10-07	27	24	89%
2014-12-17	32	29	90%
2014-12-29	21	17	81%
2015-01-01	24	21	88%

通过对 6 天实测数据分析,得到上述设备仿真模型的综合正确率大于 89%,基本证明仿真模型的可靠性。仿真过程中一些测量参数设为定值,而实际

探测过程中会发生较大的变化,如随天气变化,大气透过率、大气衰减等参数会有较大变化,目标的运动、自旋等会对散射截面造成较大起伏,这些变化会对探测结果造成较大的影响,是造成仿真与实测存在差距的主要原因。

基于上述仿真模型,对上海天文台 60 cm 口径空间碎片激光测距系统对空间碎片目标探测效能进行评估,其中评估结果主要包括系统的探测目标数量、尺寸等参数。通过对 NASA 空间目标编目中低轨碎片目标的计算仿真,给出了上述测量设备系统在 6 天 24 h 内的碎片目标探测仿真结果(如表 3 所示),其中考虑了激光测距系统同时段内只能观测 1 个目标,每次观测跟踪弧长必须大于 5 min,包括目标的搜索和测量时间。

表 3 60 cm 口径空间碎片激光测距系统碎片目标探测仿真结果

Tab.3 Simulated results of detected space debris by laser ranging system with the aperture of 60 cm

Date	Total number	Detected passes	Detected number
2014-10-04	15 060	151	143
2014-10-06	15 057	153	142
2014-10-07	15 067	156	148
2014-12-17	15 065	166	145
2014-12-29	15 101	175	160
2015-01-01	15 108	167	145

从上表可以看出,上海天文台 60 cm 口径空间碎片激光测距系统大约每天能看 150~170 个弧段,140 多个目标,为该探测系统在今后空间目标观测计划制定提供依据。

由于在光学探测区,目标截面积与目标尺寸平方成正比。根据激光测距方程,可以看出可探测目标的截面积与距离四次方成正比,可得出激光测距系统可探测的目标尺寸与距离的平方成正比。使用 2015 年 3 月 21 日、6 月 22 日、9 月 23 日和 12 月 22 日 TLE 轨道数据分别进行仿真计算,上海天文台 60 cm 口径空间碎片激光测距系统的探测目标尺寸统计如

图 7 所示。

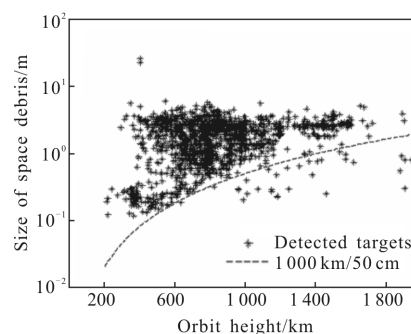


图 7 60 cm 口径空间碎片激光测距系统探测能力

Fig.7 Space debris detection ability by laser ranging system with the aperture of 60 cm telescope

从图中可知,对于距离 1 000 km、直径大于 50 cm 目标占总目标数的 90%,可得出上海天文台 60 cm 口径空间碎片激光测距系统探测能力近似为 1 000 km、直径 50 cm 以上目标。根据上海天文台空间碎片激光测距系统实际测量情况,目标截面积最小 0.3 m<sup>2</sup>,等效直径约 60 cm,与仿真结果接近,进一步验证了系统探测能力仿真模型的合理性。基于建立的空间碎片激光测距系统探测模型,可为未来空间碎片激光测距系统的观测策略制定及系统性能升级改造、测量装置研制等提供了仿真分析依据。

#### 4 结束语

高性能高功率激光器和高效率激光探测是空间碎片激光测距中的关键。基于上海天文台已有的空间碎片激光测距基础及观测系统,解决了空间碎片激光测距中激光源和激光回波探测的关键问题,目标测量距离从 500~2 600 km,截面积从小于 0.5 m<sup>2</sup>到大于 10 m<sup>2</sup>,对大尺寸目标,测量成功率达 95%以上,具备了空间碎片常规化测量能力,可作为空间碎片精密监测技术提供高精度激光观测数据。

根据上海天文台 60 cm 口径空间碎片激光测距系统观测结果统计分析,以及空间碎片激光测距方程等,建立了激光探测仿真模型,与实际测量结果比对,仿真模型综合正确率大于 89%,基本验证仿真模型的可靠性。通过对该测距设备系统仿真模拟统计,系统探测能力对可 1 000 km 处、直径 50 cm 以上目标进行探测,每天大约能观测 150~170 个弧段、140 多个目标。根据目前实际测量情况,上海天文台空间碎

片激光测距系统探测能力还有提升的空间,为后续目标观测规划制定提供了依据。文中所建立的激光测距系统探测仿真模型,为今后空间碎片测量系统的观测策略制定、测量装备研制及其探测性能评估等奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] Jiang Huilin, Fu Qiang, Zhang Yalin, et al. Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0401001. (in Chinese)  
姜会林, 付强, 张雅琳, 等. 空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0401001.
- [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] Deng Xianfeng. Review of space debris observation [J]. *Aerospace 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.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] Shen Shanshan, Chen Qian, He Weiji, et al. Research and realization on performance of single photon counting ranging system optimizing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0217001. (in Chinese)  
沈姗姗, 陈钱, 何伟基, 等. 单光子测距系统性能优化研究和实现[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0217001.
- [8] Greene B, Gao Y, Moore C, et al. Laser tracking of space debris [C]//Proceedings of 13th Laser Ranging Workshop, 2002.
- [9] 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.
- [10] Zhang Zhongping, Yang Fumin, Zhang Haifeng, et al. The use of laser ranging to measure space debris[J]. *Research in Astron Astrophys*, 2012, 12(2): 212–218.
- [11] Craig H Smith, Ben Greene. The EOS space debris tracking system[C]//The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2006.
- [12] 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]. *Chinese Journal of Laser*, 2014, 41(s1): s108005. (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): s108005.
- [13] Liu Jing, Zhang Yao, Du Heng. Evaluation and optimization of space debris surveillance network [C]//The Sixth National Space Debris Workshop. Chengdu: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, 2011. (in Chinese)  
刘静, 张耀, 都亨. 空间碎片监测网的评价和优化[C]//第六届全国空间碎片会议. 成都: 国家国防科技工业局, 2011.
- [14] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, et al. kHz repetition Satellite Laser Ranging system with high precision and measuring results [J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(15): 1177–1183. (in Chinese)  
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果 [J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1177–1183.
- [15] Degnan J J. Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review [M]//Contributions of Space Geodynamics Technology. Esmith D E, Turcotte D L, ed. US: AGU Geodynamics Series, 1993, 25: 133–162.