

文章编号 1004-924X(2016)增-0175-08

## 长春站高重复频率空间碎片激光测距技术

宋清丽\*, 梁智鹏, 董雪, 韩兴伟, 范存波

(中国科学院 国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 本文主要根据空间碎片运行速度快、预报精度差等特点, 论述了高重复频率空间碎片激光测距的关键技术, 通过采用高重复频率、高光束质量的激光器提高了激光输出功率密度。提出了回波指数概念, 建立空间碎片观测目标数据库。利用光学视位置偏差信息, 通过对数据实时拟合, 修正预报距离偏差的参考值, 提高探测成功率。在长春站 60 cm 激光测距系统上进行了可行性和有效性验证, 在 26 个试验观测日内获得了 233 个不同空间碎片目标的 466 圈有效数据。对这些数据进行统计得到, 观测目标距离在 400~1800 km, 其雷达散射截面(RCS)在 0.9~26.1 m<sup>2</sup>, 测距精度约为 1 m。该高重复频率空间碎片激光测距系统不仅可以获得有效的观测数据, 而且大大提高了观测的成功率, 观测数据可用于开展空间非合作目标测轨和定轨、精密编目以及其他科学应用研究。

**关键词:** 空间碎片; 激光测距; 高重复频率; 数据识别; 预报改进

**中图分类号:** P228.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0175

## High repetition rate laser ranging to space debris from Changchun Observatory

SONG Qing-li\*, LIANG Zhi-peng, DONG Xue, HAN Xing-wei, FAN Cun-bo

(Changchun Observatory, National Astronomical Observatories,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China)

\* Corresponding author, E-mail: songql@cho.ac.cn

**Abstract:** Based on the high running speed and poor forecast accuracy of space debris, the key technology for space debris laser ranging with high repetition rate was discussed, and the laser with high repetition rate and high beam quality was employed to improve the laser output power density. The concept of echo index was proposed and the observation target database of space debris was established. Then reference values of the forecast distance were corrected by fitting the data originated from the optical position deviation information, thus improving the success rate. The feasibility and effectiveness of such method were verified on the 60 cm laser ranging system in Changchun Railway Station. During the experimental observation period of 26 days, 466 circles of data for 233 different space debris targets have been obtained. The data statistic shows that the radar cross section (RCS) is 0.9 m<sup>2</sup>~26.1 m<sup>2</sup> when the observation distance from the target is 400 km~1 800 km, with a ranging precision of approximately 1 m. Such space debris laser ranging system with high repetition rate can not only help obtain effective observation data, but can also improve the observation success rate. In addition, the

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-13.

基金项目: 国家自然科学基金天文联合专项项目(No. U1431121); 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 11303063)

observation data can be used for orbit measurement and orbit determination of non-cooperative space target, precise cataloging and other scientific application researches.

**Key words:** space debris; laser ranging; high repetition rate; data identification; forecast improvement

## 1 引言

随着航空航天技术的飞速发展及全球对太空资源的持续开发与利用,空间人造目标逐渐增多,空间碎片的数量也在急剧增加。空间碎片会对在轨运行的航天器造成巨大威胁,与航天器的碰撞能直接改变航天器的表面性能,导致航天器系统故障,给航天器的正常运行带来极大危害。2009年,美俄卫星碰撞是人类有史以来首次近地轨道人造卫星碰撞事件,这预示着近地轨道空间碎片的存在将给航天活动造成巨大影响。目前,空间碎片的跟踪观测主要采用地基雷达和地基光学观测方法,地基雷达主要用于低轨道空间目标的跟踪观测,精度较差;而对高轨空间目标的观测,地基光学探测能力远高于雷达,可以实现地球同步轨道目标的跟踪。为了提高空间碎片的观测精度,世界各国在大力发展多种观测技术,以实现近对近地轨道空间碎片的有效监视和预警,并建立可跟踪的空间碎片动态数据库<sup>[1-2]</sup>。利用激光测距技术对空间碎片进行跟踪观测,测距精度可以达到分米量级,比雷达和光学观测的精度要高 2~3 个数量级,非常适合用于空间碎片的轨道监测和预警<sup>[3]</sup>。

由于空间碎片精密定轨、监测和预警的重要性,国内外十分重视空间碎片漫反射激光测距技术的研究。美国自 1994 年就已经开始了对空间碎片激光测距技术的研究。2000 年,EOS 公司在澳大利亚的 Mt. Stromlo 激光测距站进行空间碎片激光测距方面的研究,实现了高度为 1 250 km、尺寸为 10 cm 的空间碎片测距,目前主要利用口径为 1.8 m 的望远镜开展空间碎片激光测距研究。2015 年,奥地利 Graz 站实现了轨道高度为 3 000 km、最小 0.3 m<sup>2</sup> 空间碎片的激光测距<sup>[4-5]</sup>。我国在 2000 年启动了“空间碎片行动计划”,中科院上海天文台于 2008 年 7 月成功实现了 1 000 多公里的空间碎片的激光测距,测距精

度达 60~80 cm,2015 年又基于 1.56 m 和 60 cm 望远镜开展了一发多收空间碎片激光测距实验研究,为我国空间碎片观测提供了新的技术手段。此外,云南天文台于 2008 年开展了空间碎片激光测距的研究,并在 2010 年获得了火箭残骸的有效回波数据<sup>[6-8]</sup>。

目前,空间碎片激光测距技术主要采用低重复频率激光器,但该类激光器单脉冲能量大,接近光学器件的损伤阈值极限,激光器连续运行时间短。在高重复频率空间碎片激光测距中,采用的 LD 泵浦激光器重复频率高、单脉冲能量低,可以连续工作几个小时,另外它的光束质量高,在远距离、小尺寸空间碎片的测量方面有很大的优势<sup>[9]</sup>。因此,高重复频率空间碎片激光测距技术是未来的主要发展趋势。

目前,长春站 kHz 激光测距系统的测距能力可达到  $4 \times 10^4$  km,年观测数据超过 19 000 圈,观测数据量位居世界第二位,被公认为国际上性能最强的 4 个台站之一。本文开展了高重复频率空间碎片激光测距技术的研究,以拓展长春站激光测距系统的应用范围,为基于激光测距技术的空间非合作目标预警、监测和精密定轨等工作提供更多有价值的资料。

## 2 高重复频率空间碎片激光测距关键技术

利用激光测距技术跟踪观测的空间碎片主要是低轨道目标,运行速度快,初轨预报精度较差<sup>[10]</sup>,因此对观测条件也有一定的限制,要求观测站对目标的观测必须避开太阳背景,并且空间目标不在地影中,确保目标反射的太阳光线可以被观测站的监视系统获得,通常观测时间段为晨昏的 1.5 h 内。空间碎片激光测距的实际测距中,许多因素会影响到测距成功率。其中,激光器的功率、稳定性及光束质量是空间碎片激光测距

技术中的关键;空间碎片预报的精度,目标本身的反射特性、噪声干扰、望远镜跟踪指向误差、回波信号识别等将影响空间碎片激光测距的成功率。

## 2.1 激光发射系统

### 2.1.1 高重复频率激光器

在空间碎片激光测距中,激光脉冲经空间碎片表面的漫反射返回,由地面测站接收,然而仅有很少的回波光子能够返回到接收系统中。为了获得更多的回波光子,在激光器输出功率一定的情况下,激光器的光束质量对空间碎片漫反射回波探测是至关重要的,它影响了输出激光远场光斑的尺寸及远场功率密度的分布。光束质量越高,远场功率密度越集中<sup>[10]</sup>,对空间碎片漫反射测距越有利。

实验系统中采用了 LD 泵浦的 Nd:YAG 固体激光器,重复频率为 500 Hz,在电光调 Q 等作用下产生 10 ns 的 1 064 nm 基频光,经多级放大及光束整形后,产生单脉冲能量为 120 mJ 的 TEM<sub>00</sub> 模激光,经倍频晶体倍频输出单脉冲能量为 60 mJ 的 532 nm 激光。该激光器具有高重复频率和高光束质量的特点,光束质量因子  $M^2$  优于 1.5,由于重复频率高,单脉冲能量低,减小了对光学器件的损伤,使激光器的使用寿命和效率大大提高。表 1 是高重复频率激光器的主要技术参数。

表 1 高重复频率激光器的主要技术参数

Tab.1 Parameters of high repetition rate laser

参数	值
输出波长/nm	532
重复频率/Hz	1~500
输出能量/mJ	60@500 Hz
脉冲宽度/ns	10~12
发散角/mrad	0.4
光束质量( $M^2$ )	<1.5

采用高重复频率和高光束质量的激光器,不仅解决了空间碎片激光测距回波光子数少的问题,还有助于识别空间碎片目标的数据。

### 2.1.2 激光发射光路

实验系统中,空间碎片使用的高功率激光器

与卫星激光测距的皮秒激光器共用一套发射光路系统,可以利用皮秒激光器测量近地靶,完成高精度系统的延迟标校。两套系统的切换通过一块可快速调节的 45° 反射镜( $M_2$ ) 实时进行调整,其中  $M_1$  和  $M_2$  镀 532 nm 的抗高损伤反射膜层,防止高功率激光损伤镜片膜层。完成空间碎片激光测距试验时,将  $M_2$  快速切换到  $A_1$  位置,恢复常规卫星激光测距。图 1 是高功率激光器与皮秒激光器并行使用的简图。

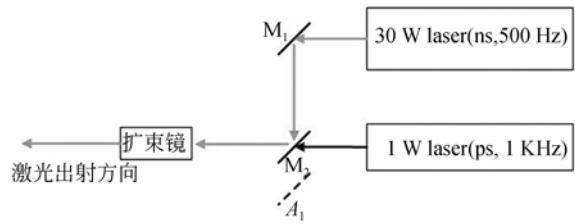


图 1 激光发射光路简图

Fig.1 Schematic diagram of optical path of laser transmission

输出的高功率激光经过  $M_1$  和  $M_2$  反射镜后,再经过三倍扩束镜对激光的发散角进行压缩,最后到达发射镜的光束又经过六倍压缩,发散角达到 22  $\mu$ rad 左右,直径 5 cm 左右,更好地压缩了激光的发散角,提高了激光光束远场的功率密度。

## 2.2 空间碎片观测目标数据库的建立

空间碎片激光测距回波探测概率通过单位时间内获得的回波光子数来描述,根据空间碎片激光测距系统参数以及所测量的空间碎片目标的主要参数,可得空间碎片的激光雷达方程为<sup>[6,11-12]</sup>:

$$n_0 = \frac{\lambda \eta_{q1}}{hc} \times \frac{E_t A_r \rho S \cos \theta}{\pi \theta^2 R^4} \times T^2 \times \eta_i \times \eta_r \times \alpha \quad (1)$$

利用激光能量、发散角、空间碎片大小、距离等,理论上可以得到回波光子数、探测概率及每秒探测的成功次数。根据空间碎片激光测距雷达方程,单脉冲获得的平均回波光子数与空间目标的有效反射面积  $S$  成正比,与空间碎片的轨道高度  $R$  的四次方成反比,即  $n_0 \sim S/R^4$ 。由此引入一个无量纲的量,定义为空间碎片的回波指数参考值  $I_{\text{rebound}}$ ,那么有:

$$I_{\text{rebound}} = \frac{S/S_0}{(R/R_0)^4}, \quad (2)$$

式中： $S_0=1\text{ m}^2$ ， $R_0=1\ 000\text{ km}$ 。回波指数用于空间碎片测距系统观测目标的选择依据，便于估算空间碎片观测的难易程度，不具备实际的物理意义。空间碎片在实际运行中，观测距离会随着测站仰角不断变化，回波指数也会随着仰角的变化而不断变化，对于同一观测目标，不同时刻的回波指数是不同的。图 2 是某空间碎片目标距离和回波指数随着测站仰角之间的变化关系。由图可知，距离随着仰角的升高不断降低；而回波指数则随着仰角的升高而增大。

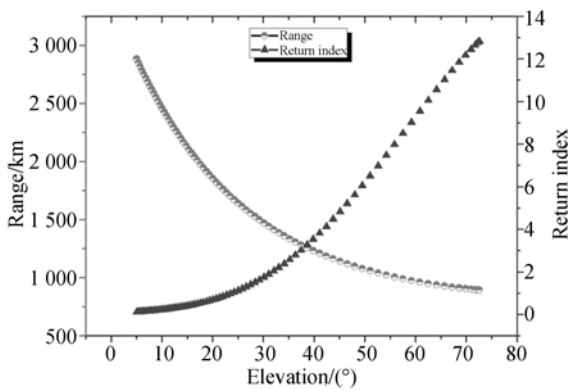


图 2 空间目标距离、回波指数与测站仰角之间的变化  
Fig. 2 Variations of space target range and return index with station elevation respectively

根据空间碎片回波指数以及其他轨道信息，建立空间碎片观测目标数据库，数据库提供所有空间碎片的基本信息，包括目标的轨道高度、尺寸(RCS)、偏心率等，并每天自动、实时更新所有空间碎片目标的轨道根数，以便于不同观测目标的下载和后期预报。

### 2.3 空间目标轨道预报实时改进

空间碎片激光测距主要采用两行根数(TLE)作为初轨预报。TLE 是基于一般摄动理论而产生的用于描述地球轨道飞行器的位置和速度的一组轨道根数，预报精度达到公里量级<sup>[13-14]</sup>。实验接收系统采用单光子探测器，受探测器本身噪声的限制，其距离门最大可以开到  $3\ \mu\text{s}(\pm 450\text{ m})$  左右，较大的距离偏差变化率会加大实时数据识别的难度。长春站通过对空间碎片目标的运动规律与 SGP4 运动方程的研究，建立了空间碎片运动模型，在国内首次提出了利用地面观测站获得

的空间碎片光学视位置偏差信息进行实时拟合，从而修正预报距离偏差值的方法，以提高空间碎片测距的成功率。

#### 2.3.1 空间碎片视位置获取与闭环跟踪

空间碎片由于预报精度较差无法进入到小视场 CCD 中，本文采用两级闭环跟踪的方式完成跟踪观测。首先利用大视场导星系统获取目标的位置信息，系统主要由 CCD 相机、图像采集卡、工控机和数字图像软件组成。图像采集卡采集图像，然后通过通讯协议发送给图像处理计算机；图像处理计算机获取观测目标位置，经图像处理得到目标位置与视场中心的偏差值，并反馈给控制计算机；控制计算机获取目标的新位置，送到伺服系统重新进行目标跟踪。目标视位置的偏差信息也通过大视场导星系统获取，观测目标在 CCD 屏幕上的实际位置与中心位置的偏差值经过图像处理自动采集。图 3 是空间碎片闭环跟踪的简单原理图。

表 2 大视场导星参数

Tab. 2 Specifications of large field optical telescope

参数	值
有效口径/mm	200
视场/(°)	1×1
主光谱长/nm	656.3
消色差波段/nm	450~900
探测星等	11
角分辨率	3"RMS

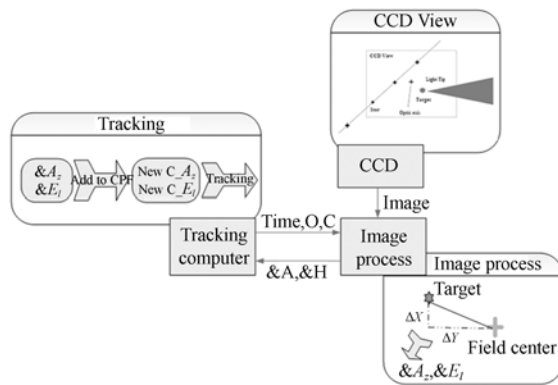


图 3 目标闭环跟踪原理图

Fig. 3 Schematic of optical close-loop tracking

### 2.3.2 距离偏差修正

空间碎片距离偏差的修正值主要基于对轨道动力学,利用空间目标的光学视位置偏差信息进行实时拟合解算获得的。图 4 是在实验中利用 Enviast 目标视位置解算的距离偏差值随时间的变化,其中平滑曲线是 TLE 相对于精密星历的距离预报偏差;粗糙曲线是程序使用 TLE 预报跟踪目标的过程中,利用图像处理进行实时解算获得的距离偏差。由图可以看出,估计值在开始的半分钟内呈现较大跳动,随后的 3 min 内逐渐收敛到真实值,稳态误差保持在 100 m 左右。

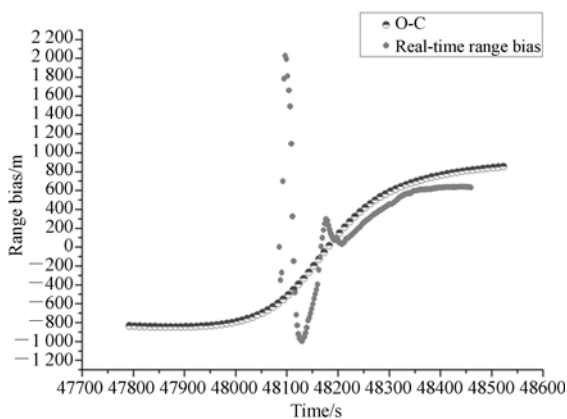


图 4 距离偏差解算的时间过程图

Fig. 4 Solution of range bias as a function of time

本文方法能够在三分钟内提供距离偏差的近似参考值,缩小距离门的搜索范围,解决了现有空间碎片激光测距系统中目标预报偏差大的问题。

### 2.4 噪声滤波技术

在高重复频率的空间碎片激光测距中,观测目标基本为近地轨道目标,目标较亮,虽然在太阳高度角小于 $-5^\circ$ 的时段进行观测,依然会有大量目标背景噪声返回到接收探测器中。为了提高激光回波信号,采用了滤波技术来降低噪声。实验系统中主要采用空间滤波与光谱滤波技术,空间滤波采用可变视场光阑来消除杂散光的干扰;光谱滤波采用中心波长为 532 nm,带宽为 $(0.15 \pm 0.05)$  nm,透过率大于 75% 的窄带滤光片,减小背景噪声对回波的干扰,提高测距的成功率。

### 2.5 实时数据识别技术

实时高重复频率的空间碎片激光测距过程中,接收系统接收到的回波数据点比较少,除了有效数据外还包括大量噪声,很难找到真实的数据点。实验系统通过修正时间偏差减小了距离偏差

的变化率,采用的数据识别方法是基于卫星激光测距的数据识别技术,使用滤波法对所获得的回波信号距离残差值(O-C)值进行比较,即有:

$$|\Delta R - \Delta R_J| < \delta, \quad (3)$$

其中: $\Delta R$ 和 $\Delta R_J$ 均为O-C值, $\Delta R$ 为当前获得的距离残差值, $\Delta R_J$ 为第J次获得的距离残差值, $\delta$ 为比较阈值<sup>[15]</sup>。与卫星激光测距相比,空间碎片激光测距的预报精度较差,回波数据点数较少,实时的数据识别中比较阈值设置为 100 cm,设定比较 1 000 个数据点中有 5 个有效的数据点,同时,采用多次滤波的方式完成了空间碎片的实时数据识别,为自动距离门实现奠定基础。图 5 是实际跟踪观测空间碎片过程中数据识别的截图。

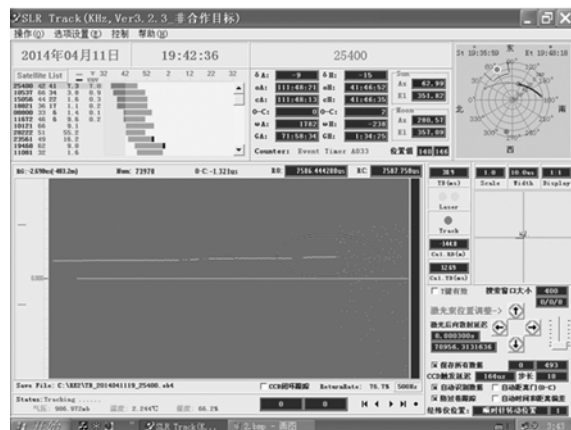


图 5 空间碎片数据识别的截图

Fig. 5 Screenshot during space debris data identification

## 3 实验数据结果

为了验证高重复频率空间碎片激光测距技术的可行性和有效性,在长春站 60 cm 激光测距系统上开展了试验,成功实现了空间碎片激光测距。在 26 个观测日内,获得 233 个观测目标的 466 圈有效数据,单日最多获得观测数据 68 圈,部分数据如表 3 所示。实现最低仰角 $20^\circ$ 的有效测距,在所有的观测数据中,其中有 26 圈观测数据延伸到晨昏时段(太阳高度角大于 $-5^\circ$ ),充分体现了长春站高重复频率激光测距系统的测距能力。

表 3 空间碎片部分观测数据结果

Tab. 3 Part of space debris observation data

序号	观测弧段/min	目标代号	回波点数	精度 RMS/cm	距离/km	RCS/m <sup>2</sup>
1	01:48	28059	1713	119.3	878-1112	6.2
2	03:13	11267	926	104.4	674~1082	4.4
3	01:09	39027	561	88.7	547~884	1.4
4	03:06	16409	311	84.2	1038~1316	5
5	01:05	25281	338	109.7	682~1031	1.4
6	01:27	6061	487	102.4	783~1041	4.7
7	01:05	2621	440	132.3	592~761	1.3
8	01:07	28059	851	130.4	926~1197	6.2
9	02:01	17291	831	86	965~1196	4.7
10	02:17	16615	1050	118.1	837~1398	7
11	01:06	15495	266	104	825~1050	3.6
12	03:49	33410	949	109.2	677~1190	4.5
13	01:01	39493	226	100.2	560~897	7.6
14	01:37	17567	927	71.2	692~1179	4.5
15	01:02	5118	1077	67.5	664~897	6.8

对获得的 466 圈数据进行统计分析,观测目标的最小 RCS 达到 0.9 m<sup>2</sup>,主要集中在 5 m<sup>2</sup>左右;观测距离为 400~1 800 km,单次测距精度约为 1 m。图 6 是所有观测目标 RCS 的统计结果,图 7 是所有观测目标观测距离的统计结果。

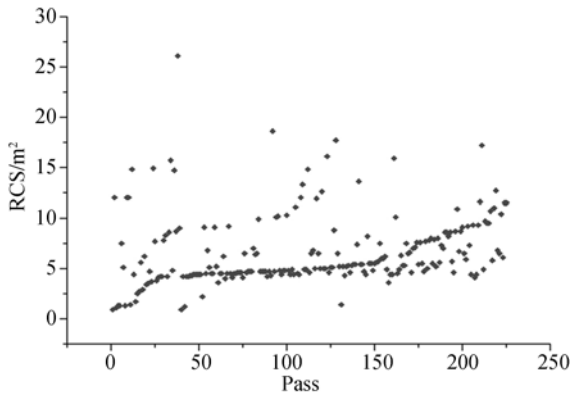


图 6 观测数据 RCS 的统计结果  
Fig. 6 Statistics of RCS for each pass

进一步分析所有的观测数据结果可知,观测目标的时间偏差在 100 ms 的比较多,这为观测过程中时间偏差的选择提供了一个经验值。图 8 为观测数据结果的时间偏差结果。

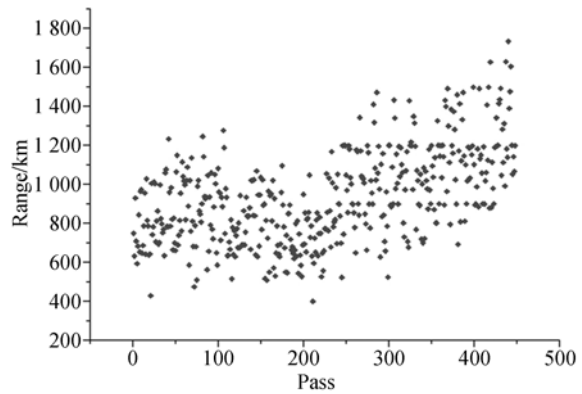


图 7 观测数据距离统计结果  
Fig. 7 Statistics of range for each pass

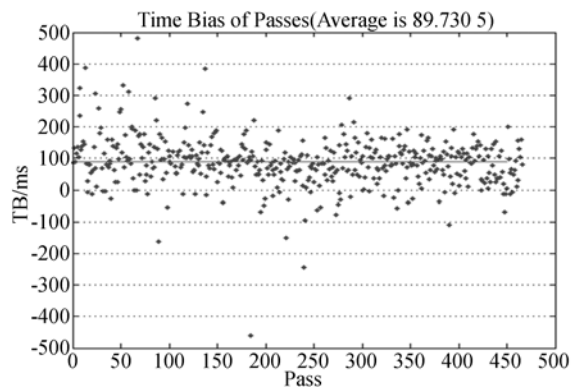


图 8 观测数据时间偏差统计结果  
Fig. 8 Statistics of time bias of passes

## 4 结 论

本文主要论述了长春站高重复频率空间碎片激光测距技术,并在 60 cm 激光测距系统上得到了有效的验证,共获取 466 圈数据,距离在 400~1 800 km,RCS 为 0.9~26.1 m<sup>2</sup>,测距精度约为 1 m 左右。为了进一步提高空间碎片激光测距的应用,计划利用观测数据开展空间碎片测轨和定轨、精密编目以及其他科学应用研究。联合光电

观测获取空间目标的位置信息,开展测角精度与误差分析的研究,提高单站测定轨能力。开展空间碎片精密跟踪与定轨理论研究,拓展空间碎片观测数据的应用。开展微弱信号探测技术的研究,降低器件的暗噪声、提高器件的灵敏度。在空间环境研究中,利用长期积累的空间碎片精密测量数据建立空间碎片精密轨道数据库,开展高层大气科学研究,包括高层大气短时标演化研究、特殊轨道大气阻力建模和高层大气密度模型精细化等。

## 参考文献:

- [1] 祁先锋,郑娟.空间碎片观测技术研究[J].空间电子技术,2006(增刊):5-8.  
QI X F, ZHENG J. Research on space debris observation technology [J]. *Space Electronic Technology*, 2006(Suppl.): 5-8. (in Chinese)
- [2] 龚自正,李明.美俄卫星太空碰撞事件及对航天活动的影响[J].航天器环境工程,2009,26(2):101-106.  
GONG Z ZH, LI M. The collision of US-Russian satellites in space and its effect on space activities [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(2): 101-106. (in Chinese)
- [3] 于欢欢,高鹏骐,沈鸣,等.空间碎片激光测距探测能力分析[J/OL].天文研究与技术,2016,http://www.cnki.net/kcms/detail/53.1189.P.20160315.1453.006.html.  
YU H H, GAO P Q, SHENG M, *et al.*. Detection Capability Analysis of Space Debris Laser Ranging [J/OL]. *Astronomical Research & Technology*, 2016, http://www.cnki.net/kcms/detail/53.1189.P.20160315.1453.006.html. (in Chinese)
- [4] GREENE B, GAO Y, MOORE C. Chris Moore. Laser tracking of space debris[C]. *13th International Laser Ranging Workshop, Washington, D. C, USA, 2002: 198-202.*
- [5] KIRCHNER G, KOIDL F. Laser ranging to space debris from graz laser station [J]. *Vermessung and Geoinformation*, 2015: 151-155.
- [6] ZHANG ZH P, YANG F M, ZHANG H F, *et al.*. The use of laser ranging to measure space debris[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(2): 212-218.
- [7] 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):1-7.  
ZHANG ZH P, ZHANG H F, DENG H R, *et al.*. Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 1-7. (in Chinese)
- [8] 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.  
LI Y Q, LI R W, LI ZH L, *et al.*. Application research on space debris laser ranging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3324-3329. (in Chinese)
- [9] 张忠萍,汤凯,吴志波,等.基于高重复频率激光器的空间碎片激光测距及其应用[J].空间碎片研究与应用,2014,14(1):1-5.  
ZHANG ZH P, TANG K, WU ZH B, *et al.*. Laser measurement to space debris based on high repetition rate laser and its application[J]. *Space Debris Research and Application*, 2014, 14(1): 1-5. (in Chinese)
- [10] 贺元兴.激光光束质量评价及测量方法研究[D].湖南:国防科学技术大学,2012.  
HE Y X. *Study of Evaluating and Measuring Laser Beam Quality* [D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [11] 吴志波,张忠萍,杨福民,等.卫星激光测距回波探测成功概率统计分析[J].测绘科学,2006,31(3):28-29.  
WU ZH B, ZHANG ZH P, YANG F M, *et al.*. The statistics analysis of satellite laser ranging echo detection success probability[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006,31(3):28-29. (in Chinese)

- [12] 李明, 薛莉, 黄晨, 等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(2): 260-266.  
LI M, XUE L, HUANG CH, *et al.*. Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 28-29. (in Chinese)
- [13] 杨维廉. 两行根数的精度评估[J]. 航天器工程, 2009, 18(3): 8-13.  
YANG W L. Accuracy evaluation of two line element [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(3): 8-13. (in Chinese)
- [14] 王诺璞, 张浚哲, 郑勇, 等. 基于 TLE 的空间目标碰撞预警计算[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(4): 269-275.  
WANG R P, ZHANG J ZH, ZHENG Y, *et al.*. Space objects collision prediction based on TLE [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2009, 26(4): 269-275. (in Chinese)
- [15] 秦思, 张忠萍, 张海峰, 等. 高重复率卫星激光测距中一种回波实时识别方法[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2008, 29(1): 67-73.  
QIN S, ZHANG ZH P, ZHANG H F, *et al.*. A method of real time return detection index satellite laser ranging at high repetition rate [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 2008, 29(1): 67-73. (in Chinese)

#### 作者简介:



宋清丽(1984—),女,吉林长春人,硕士,工程师,2008年于长春理工大学获得学士学位,2012年于中国科学院研究生院获得理学硕士学位,现为中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站工作,主要从事激光测距技术及应用方面的研究。E-mail: songql@cho.ac.cn