

空间碎片激光测距应用研究

李语强¹, 李荣旺¹, 李祝莲¹, 翟东升^{1,2}, 伏红林¹, 熊耀恒¹

(1. 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 空间碎片的存在使空间环境日益恶化, 已影响到空间活动的安全。国际上很多国家开展了空间碎片探测技术的研究, 空间碎片激光测距技术成为一种新的探测手段。首先, 概述了国内外空间碎片激光测距技术的发展趋势和现状。其次, 在成功获得空间碎片激光测距回波的基础上, 研究了激光测距数据联合测角数据单站定轨的方法, 仿真计算结果表明, 该方法的定轨精度优于单纯光学测角数据定轨的精度。最后, 提出一种利用空间碎片激光测距误差来初步测定空间碎片尺度的方法, 并分别通过地面靶激光测距实验和空间碎片激光测距实验验证了该方法的可行性, 为空间碎片尺度测定提供了一种参考依据。

关键词: 空间碎片; 卫星激光测距; 轨道确定

中图分类号: P228.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3324-06

Application research on space debris laser ranging

Li Yuqiang¹, Li Rongwang¹, Li Zhulian¹, Zhai Dongsheng^{1,2}, Fu Honglin¹, Xiong Yaoheng¹

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Because of the existence of space debris, the space environment is getting worse, and the space activities safety is affected by space debris. Many countries have developed detection technique for space debris, and the space debris laser ranging is a new technology. Firstly, the development and the status of space debris in the domestic and overseas were summarized in this paper. Secondly, space debris laser ranging echo was received successfully at Yunnan Observatories and the method of orbit determination with laser ranging date and angle date at single station was researched. The results of simulation calculation show that the precision of orbit determination by this method is better than that of by optical angle measurement. Finally, a method of space debris scale preliminary determination using the space debris laser ranging error was provided, and the feasibility of this method was verified by the experiments of ground target laser ranging and space debris laser ranging respectively, and this method is useful for further development of space debris scale determination.

Key words: space debris; satellite laser ranging; orbit determination

收稿日期: 2015-03-10; 修订日期: 2015-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(10803019, 11403102); 中国科学院重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

作者简介: 李语强(1978-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事空间目标光电探测与精密定轨等方面的研究。

Email: lyq@ynao.ac.cn

0 引言

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^[1-2]。空间碎片的存在严重地威胁着在轨运行航天器的安全,同时空间碎片的不断产生对有限的轨道资源也构成了严重的威胁^[3]。中国是空间大国,今后的空间活动将越来越多,特别是国内要发展载人航天和天基信息网,为了航天活动的安全和持续地开发利用空间资源,就必须不断发展对空间碎片的跟踪监视的新技术,增强对空间碎片环境的分析预警能力^[4]。

空间碎片探测最主要的目的是碰撞预警,而碰撞预警的基础就是高精度的空间碎片轨道数据。轨道精度越高,碰撞预警的置信度越高,规避方案越合理,因此,高精度的轨道数据是航天器规避空间碎片的保障,随着对碰撞概率研究的深入,高精度轨道数据显得越来越重要。美国的科研人员曾提出^[5],如果没有“激光测距精度水平”的轨道精度,航天器对空间碎片的规避机动是不精确的,即不能显著减少碰撞的概率。高精度的激光测距数据,将有力提高碰撞风险评估和预警发布的准确性。

卫星激光测距通过精确测量激光信号从地面站到卫星的往返飞行时间,获得星地间精密距离^[6]。是卫星观测中测量精度最高的技术,单次测量精度已提高到亚厘米级,目前正向毫米级发展^[7-8]。但常规激光测距是指对合作目标(装有角反射器的空间目标,如 Ajisai、Lageos 卫星等)进行卫星激光测距,而空间碎片以及大部分人造卫星或航天器不携带角反射器(均属于非合作目标),只能采用漫反射激光测距技术进行测距^[4]。漫反射激光测距与常规卫星激光测距的原理基本相同,区别在于合作目标的反射器将绝大部分入射激光按原路反射回去,而空间碎片对入射的激光束仅靠其表面漫反射,能够返回到地面观测站的激光光子比例远比常规测距的少。所以对于漫反射激光测距系统来说,大口径、高效率的接收系统,稳定性好、高功率激光器及高灵敏度光子探测器是必要的,这样才有可能使观测站收到足够的回波信号,进行有效测距。漫反射激光测距技术可以获得

空间碎片高精度的距离,同时漫反射激光测距技术比单纯的光电探测手段测量速度快,在观测时段上也具有优势,可为空间碎片的精密定轨与碰撞预警提供有利支持。所以,空间碎片激光测距将在空间碎片监测系统中发挥重要作用。

1 空间碎片激光测距国内外发展现状

近年来,空间碎片激光测距技术得到世界上很多国家的重视,并得到很好的发展。1994年,R. Fugate 在堪培拉第 9 届国际激光测距会议上报告可对 1 000 km 的空间碎片进行激光测距。2000 年澳大利亚 EOS 公司开始在澳大利亚堪培拉的 Stromlo 激光测距站进行了这方面研究工作。2002 年 10 月,该公司的 Ben Greene 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^[9]。他们利用 Stromlo 激光测距站口径 76 cm 的望远镜和高能量激光器,实现了对 1 250 km 远的大小为 15 cm 的空间碎片的激光测距。该站于 2003 年 1 月由于森林火灾付之一炬。2004 年重建后的空间碎片测距望远镜口径为 1.8 m。激光器从氙灯泵浦改进为半导体激光泵浦的 Nd:YAG 器件,重复频率 50 Hz,功率 100 W,光束质量为 1.2 倍衍射极限。2010 年该站系统升级改造^[10],采用重复频率为 100 Hz,功率 250 W、脉宽 5 ns 的高功率激光器,在空间碎片激光测距中得到很好的测量效果,测量的目标最小尺寸达 5 cm,代表了国际空间碎片激光测距技术最高水平。奥地利 Graz 激光站在 2011 年 11 月采用重频频率 1 kHz、功率 25 W、脉宽 10 ns、激光波长 532 nm、光束质量 M^2 优于 2 的激光器,实现了空间碎片激光测距^[11],测距距离范围从 600~2 500 km,测距精度大约为 0.7 m (RMS),RCS(雷达散射截面)范围从 0.3~15 m²。

国内,上海天文台佘山观测站建立了大能量高功率的 Nd:YAG 测距试验系统,开始非合作目标卫星和空间碎片的激光跟踪和测距试验,其中激光器脉冲能量为 2 J,波长为 532 nm,重复频率为 20 Hz。于 2008 年 7 月份获得了 3 个火箭残骸的漫反射激光测距数据^[12]。2013 年 3 月上海天文台与中国工程物理研究院应用光电子研究所合作升级了空间碎片激光测距系统^[10],激光器脉冲能量约为 250 mJ,重复频率为 200 Hz,波长为 532 nm,激光发散角约为

0.5 mrad, 光束质量 M^2 约为 5, 光斑直径约 10 mm, 获得多圈空间碎片激光测距回波数据, 最小碎片 RCS 为 0.5 m^2 。云南天文台从 2008 年 1 月开始积极开展空间碎片激光测距研究, 配置了高能量激光器, 其中激光器脉冲能量为 4.5 J, 重复频率为 10 Hz, 波长为 532 nm。2010 年 6 月 7 日在空间碎片激光测距实验中收到火箭残骸的回波, 后期实测获得了数十圈空间碎片激光测距回波数据。2013 年末, 长春人造卫星观测站完成了空间碎片激光测距系统安装与调试, 其中激光器脉冲能量 60 mJ, 重复频率 500 Hz, 波长为 532 nm, 光束质量 $M^2 < 1.5$, 2014 年初长春人造卫星观测站也获得了空间碎片激光测距回波。

2 空间碎片激光测距数据定轨应用

空间碎片激光测距数据最主要作用之一, 对空间碎片进行精密定轨, 为空间碎片碰撞预警提供有力支持。利用多种观测技术对空间碎片进行跟踪观测, 可以获得几种不同类型的观测数据。一般来说, 如果每种技术对应的都是全球的观测网, 并且都能够获得足够多的高精度数据, 那么即使利用单一技术的观测数据, 同样能够获得高精度的定轨结果。而实际情况并非如此, 虽然空间碎片激光测距技术具有很高的观测精度, 但由于天气、测站布局等原因, 使得空间碎片激光测距观测数据相对较少。如何利用较少的激光测距数据对空间碎片进行精密定轨, 成为一个研究热点。上海天文台、云南天文台、长春人造卫星观测站等单位相继开展了空间碎片激光测距数据定轨研究^[13], 澳大利亚 EOS Space Systems 公司利用空间碎片激光测距数据定轨精度达到几米量级^[14], 24 h 预报精度为 100~200 m。

云南天文台开发了精密定轨软件系统 PORED Y (Precision Orbit Estimate Determination of Yunnan Observatories)。严格单站的激光测距数据是无法进行精密定轨的, 而测角数据是可以定轨的。综合利用这两种数据进行定轨, 既能发挥激光测距数据的高精度性, 又能很好地利用测角数据的可观测性。对于实际的测站, 由于地球自转, 单站测距较长弧段或多圈数据也可定轨, 但当需要空间碎片准实时精确轨道时, 研究单站快速定轨有很好的应用价值。

目前云南天文台 1.2 m 望远镜在空间碎片激光测距过程中无法给出测角数据, 对其升级改造后, 可

以给出较为精确的测角数据, 在此情况下, 利用 PORED Y 定轨软件对空间碎片激光测距数据及测角数据进行了仿真计算^[13]。仿真计算过程如下: (1) 利用全球的 SLR 数据进行精密定轨, 将其结果视为“真实”轨道; (2) 选取某个测站的一圈 SLR 数据, 以“真实”轨道为初值, 仿真生成与 SLR 数据在时间上对应的测角数据, 并对数据加高斯白噪声; (3) 利用单站仿真测角数据进行定轨, 其结果标记为“AE”; (4) 利用实测的 SLR 数据和仿真的测角数据组成观测矢量进行联合定轨, 定轨结果标记为“LR-AE”; (5) 考虑激光测距的高精度性, 利用测距数据与上一步中的观测矢量再次进行联合定轨, 定轨结果标记为“LR+AE”。

以 Ajisai 卫星轨道为参考进行仿真计算, 选取了云南天文台 2009 年 1 月 22 日 11:13:28.9 到 11:25:32.9(UTC) 单圈观测数据, 约 12 min (26 个标准点) 的弧段, 考虑的摄动模型有: 非球形引力、第三体引力、太阳光压、地球反照和红外辐射、地球形变(海潮、固体潮、自转形变)、大气阻力。Ajisai 卫星属于低轨道卫星, 测角数据精度较低, 仿真生成的测角数据标准差为 5"。仿真生成的“真实”轨道参数^[13]如表 1 所示, 其中历元时刻为 2009 年 1 月 22 日 0 时(UTC)。

表 1 仿真生成的“真实”轨道参数

Tab.1 Simulation of the "real" orbit parameters

Orbit parameters	Symbol	Value
Semi-major axts/m	a	7 871 412.436
Eccentricity	e	0.001 666 6
Orbit inclination/(°)	i	49.975 1
Argument of perigee/(°)	ω	173.687 5
Longitude of ascending code/(°)	Ω	248.357 8
Mean anomaly/(°)	M	11.098 3
Period/s	P	6 950.083

精密定轨有较强的初值依赖性, 但只要迭代过程不分散, 结果最终收敛到观测数据确定的“最佳”估值轨道。为了方便评估, 以真实轨道作为初值, 最终的状态量“改进量”即可代表相应的定轨精度。表 2 给出了 Ajisai 卫星单站单圈观测数据轨道改进结果。通过计算结果可以看出, 综合两种观测数据进行

单站轨道改进是可行的,充分利用了激光测距数据的高精度性,其定轨精度虽然不能同利用多站激光测距数据定轨结果相媲美,但如果多站激光数据难以获得或需要准实时精确轨道的情况下,该方法也是一种很有效的计算方法。

表 2 单站仿真观测数据定轨结果

Tab.2 Results of orbit determination

	AE	LR-AE	LR+AE
$\delta R/m$	-52.83	-12.16	2.19
$\delta T/m$	-5226.03	-418.44	260.11
$\delta N/m$	15.37	12.18	-2.58
$\delta a/m$	-98.21	-7.47	4.55
δe	-6.88×10^{-6}	0.10×10^{-6}	0.33×10^{-6}
$\delta i(^{\circ})$	-0.32	-0.42	-0.08
$\delta \omega(^{\circ})$	1 247.27	311.03	-10.21
$\delta \Omega(^{\circ})$	0.49	0.37	-0.10
$\delta M(^{\circ})$	-1379.7	-321.21	17.02

由表 2 可以看出,单站单圈测角资料(AE)定轨结果较差,尤其在沿迹方向,利用跟踪矢量(LR-AE)定轨结果明显变好,但沿迹偏差仍然较大,当采用单站测距数据与跟踪矢量联合处理时,定轨结果最好。由于在此采用了仿真数据,虽然不能完全反映真实轨道情况,但是可以说明采用这种方法可以实现单站定轨,且定轨精度优于利用测角资料定轨的结果。

3 空间碎片尺度初步确定方法

卫星激光测距技术测量精度在厘米量级,甚至到毫米量级,国内外几家实现空间碎片激光测距的台站,空间碎片测距的精度范围在 50~250 cm^[4,10-12],与常规卫星激光测距精度相差甚远。这里一个原因是所用的激光器脉宽不同,但这不足以导致空间碎片激光测距精度变得如此差。另一个原因也是非常重要的原因,常规卫星激光测距是靠卫星上的极小的角反射器对激光进行反射,角反射器对激光脉冲展宽作用小,所以测量精度相对高。而空间碎片激光

测距是由空间碎片整个截面对激光进行漫反射,对激光脉冲展宽作用较大,即空间碎片不同位置的回波形成不同的距离值而导致测距误差偏大,即测距误差包含了空间碎片几何尺度的信息。

为了验证激光测距技术对空间碎片尺度测定的可行性,利用四块地面靶板模拟空间碎片有 4 个不同深度的横截面(如图 1 所示,因为拍摄角度原因,最前面的靶板没有出现在照片中),进行空间碎片不同截面深度信息的测量实验。



图 1 地面靶板实物图

Fig.1 Target plate on the ground

实验中所用激光器脉冲宽度为 35 ps,脉冲能量 0.08~1.35 mJ 可调,重复频率 1 kHz。地面靶板的距离望远镜约 200 m,每块靶板面积约为 0.1 m²,实验过程中,将每块靶板错开一部分,保证每块靶板都被激光照射到。为了验证激光探测的灵敏度,将第 2 块靶板进行前后移动,测距回波截图如图 2 所示。

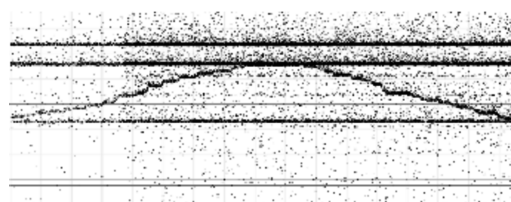


图 2 地面靶板测距回波

Fig.2 Ranging echo of ground target

图 2 中 3 条信号点组成的直线表示 3 块未动的地面靶板回波,信号点组成的曲线表示前后移动的靶板回波,其余点为噪声,测距精度约 2 cm。由此可以看出,在激光器脉宽足够窄的条件下,利用激光测距技术可以识别被测目标不同位置反射的回波信号,并且目标表面的位置变化也可以被探测到。进一步实验中,制作了梯形地面靶板,梯形地面靶板设计图如图 3 所示,实物图如图 4 所示。

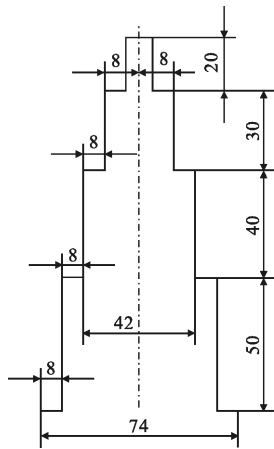


图 3 梯形地面靶设计图

Fig.3 Design of trapezoid ground target



图 4 梯形地面靶实物图

Fig.4 Trapezoid ground target

图 5 是梯形地面靶板的测距回波，测距精度约为 2 cm,5 条明显回波信号线代表有 5 个不同距离的光学散射截面。实验再次证明,在激光器脉宽足够窄的条件下,激光测距技术可以很好地识别被测目标不同深度的光学散射截面。

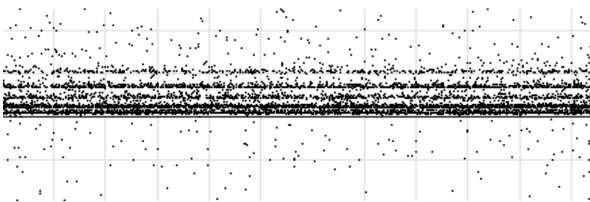


图 5 梯形地面靶测距回波

Fig.5 Ranging echo of trapezoid ground target

激光测距回波光子数与距离的四次方成反比,而空间碎片距离较远,属于远程激光测距,回波光子数极少,所以采用高功率激光器进行测量,云南天文台采用功率为 45 W、脉冲宽度为 10 ns 的激光器对低轨空间碎片进行激光测距实验,获得多个空间碎

片(火箭残骸)回波数据。

通过分析回波数据误差与空间碎片尺度、截面的关系,可以发现空间碎片尺度或光学散射截面越大,测距误差也越大。图 6 展示了空间碎片光学散射截面积与误差的关系,图 7 展示了空间碎片尺度与误差的关系。这里的尺度主要是火箭残骸(空间碎片)的长度,而光学散射截面是指火箭残骸长度与直径的乘积。空间碎片的姿态也会影响到测距误差与光学散射截面以及尺度的关系,如果有准确的姿态信息,那么空间碎片测距信息将会很好地反演出其空间尺度。因此,在大多数精度要求不高的情况下,对于尺度未知的空间碎片,可以通过测距误差来初步判定空间碎片的尺度。

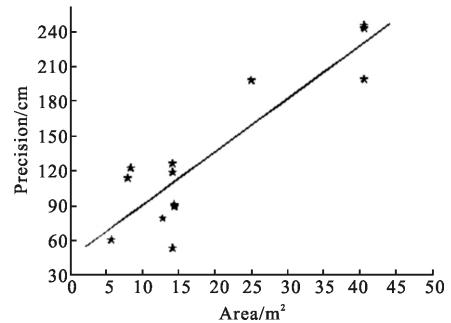


图 6 空间碎片光学散射截面与误差的关系

Fig.6 Relationship between space debris optical cross section and the error

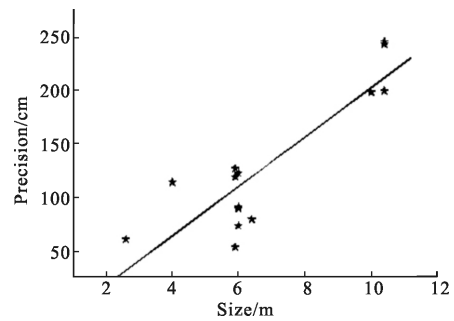


图 7 空间碎片尺度与误差的关系

Fig.7 Relationship between space debris scale and the error

4 结论

空间碎片激光测距技术作为一种高精度测量手段,已经得到很好的发展。如何利用好空间碎片激光测距数据成为当前一个重要的研究课题。文中提到的空间碎片单站激光数据精密定轨仅是在理论上一个方法研究,该方法的可行性还有待于利用实测数

据进行验证。目前,国内已经有 3 个台站实现了空间碎片激光测距,在此基础上,提出切实可行的方案,进一步发展国内空间碎片激光测距网,为空间碎片精密探测提供一种有效的技术手段。

利用激光测距误差初步判定空间碎片尺度的方法属于一种探索研究。测距误差主要是空间碎片不同位置对激光进行反射,导致回波波束被展宽而造成的。空间碎片不同位置的相对深度决定了测量误差的大小,即空间碎片姿态对测量误差有很大影响。由于空间碎片处在失控状态,运行过程中会有一些的旋转,因此在以后的实测中对同一个空间碎片进行多圈次测量,可以较为准确地测定其尺度。

参考文献:

- [1] Liu Jing, Wang Ronglan, Zhang Hongbo, et al. Space debris collision prediction research [J]. *Chinses 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.
- [2] Du Heng, Liu Jing. Manned spaceflight and space debris[J]. *Aerospace China*, 2002, (2): 18-23. (in Chinese)
都亨, 刘静. 载人航天和空间碎片 [J]. 中国航天, 2002, (2): 18-23.
- [3] Qi Xianfeng. The observation summarize of space debris[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 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): 0908001-1-0908001-5. (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): 0908001-1-0908001-5.
- [5] Robert G Gottlieb, Steven J Sponagle, David E Gaylor. Orbit determination accuracy requirements for collision avoidance [C]//Proceeding of the 11th annual AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2001, 2: 1105-1121.
- [6] Ji Rongyi, Zhao Changing, 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] 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概率统计分析[J]. 测绘科学, 2006, 31(3): 28-29.
- [8] Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrodynamics [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.
- [9] Ben Greene. Laser Tracking of Space Debris [R]. Proc. of 13th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2002.
- [10] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, 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): s108005-1-s108005-7. (in Chinese)
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): s108005-1-s108005-7.
- [11] Georg Kirchner, Franz Koidl, Fabian Friederich, et al. Laser measurements to space debris from Graz SLR station [J]. *Advance in Space Research*, 2013, 51(1): 21-24.
- [12] Yang Fumin, Zhang Zhongping, Chen Juping, et al. Preliminary results of laser ranging to un-cooperative targets at shanghai SLR station [R]. Proc of 16th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2008: 695-699.
- [13] Li Rongwang. A Study on precision orbit determination based on SLR [D]. Kuming: Yunnan Observatories, CAS, 2010. (in Chinese)
李荣旺. 基于激光测距的人造卫星精密定轨研究 [D]. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2010.
- [14] Sang J, Smith C. An analysis of observations from EOS space debris tracking system [C]//Australian Space Science Conference, 2011.