

空间目标的激光和光学两种观测技术联合定位

孙明国^{1,2,3} 高鹏骐¹ 沈 鸣¹ 李振伟² 杨大陶¹ 郭效忠¹ 于欢欢^{1,3} 周威萍^{1,3} 赵 有¹

¹中国科学院国家天文台, 北京 100012

²中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用卫星激光测距(SLR)技术对空间非合作目标进行跟踪观测现在处于发展阶段, 存在预报不够准确以及单站少量观测数据不能定轨等困难。因此提出联合非合作目标的单站 SLR 数据和光学观测数据进行综合定轨, 从而得到非合作目标的精密轨道。利用 Ajisai 卫星和 Jason-1 卫星的单站激光测距数据和光学观测数据的试验结果证明, 综合定轨精度比光学定轨精度有一个量级的提高。进而可以得到高精度轨道预报, 这有利于非合作目标的激光测距进入一个良性的常规运行状态。

关键词 测量; 空间目标; 卫星激光测距; 光学观测

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071203

Combined Tracking and Orbit Determination for Space Objects Using Laser and Optics Measurements

Sun Mingguo^{1,2,3} Gao Pengqi¹ Shen Ming¹ Li Zhenwei² Yang Datao¹ Guo Xiaozhong¹
Yu Huanhuan^{1,3} Zhou Weiping^{1,3} Zhao You¹

¹National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

²Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130117, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The non-cooperative object using satellite laser ranging (SLR) is in developing period and the orbit predictions are not precise enough. The effective data are not enough to determine a precise orbit. Therefore, it is proposed that precise orbit determination of non-cooperative objects can be achieved by combining the SLR range data with optical observation data. The results of the experiment using single station SLR data of Ajisai and Jason-1 satellite prove that the precision of combined orbit determination increases one order of magnitude than the optical orbit determination, and then the orbit prediction with high precision for non-cooperative objects can be achieved. The result has significant value for promoting the laser range of non-cooperative objects to reach a well conventional operation state.

Key words measurement; space objects; satellite laser ranging; optical survey

OCIS codes 120.4640; 120.4820; 140.3295

1 引言

根据美国空间监测网(SSN)和天基探测统计数据,截至2014年10月1日,尺寸在10 cm以上的编目空间物体有16994个,而其中有效载荷为3857个(含未工作目标),火箭箭体和空间碎片为13137个。这对已经在轨运行或今后将发射的航天器产生了日益严重的影响。因此,许多国家都在大力发展和研发多种技术对空

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-01; 网络出版日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(U1231114)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

作者简介: 孙明国(1977—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事卫星激光测距和卫星精密定轨等方面的研究。

E-mail: sunmg@bao.ac.cn

导师简介: 赵 有(1964—),男,博士,研究员,主要从事卫星激光测距和天文仪器等方面的研究。

E-mail: youzhao@bao.ac.cn(通信联系人)

间目标进行跟踪监测,以提高空间碎片的预警预报能力^[1-4]。

对空间目标监视和监测通常采用地基光学和雷达观测^[5-7]。地基雷达由于自身功率和工作波长的限制且受地面杂波和大气损耗的影响较大,一般很难实现对中高轨小型天体的探测。光学测量是利用光电望远镜探测设备来实现空间目标探测的方法,该方法能实现对中高轨空间碎片的探测,弥补了雷达观测的局限性。自20世纪90年代起,一批高性能空间碎片望远镜相继落成并投入观测,比如:美国NASA的CCD Debris Telescope (CDT), Michigan Orbital Debris Survey Telescope (MODEST), 欧洲的TAROT Telescope, ESA Space Debris Telescope, 俄罗斯的International Scientific Optical Network (ISON)网内多台设备以及国内的多台设备等。空间目标只要有足够的星等,即可被光学设备跟踪定位,光学资料非常丰富,然而光学定轨精度不高,一般在百米的量级^[8]。

卫星激光测距(SLR)是目前空间目标观测手段中精度最高的一种,均方根值(RMS)可达亚厘米量级,已在卫星精密定轨和空间大地测量中得到广泛应用^[9-14]。高精度轨道是航天器规避空间碎片的重要保障,国内外对空间碎片激光测距技术的研究十分重视。2002年10月,澳大利亚的Ben Greene在华盛顿召开的第十三届国际激光测距会议上发表了题为“Laser Tracking of Space Debris(空间碎片的激光跟踪)”的报告,报告称位于堪培拉的Stromlo激光测距站已实现对1250公里、大小为15 cm的空间碎片进行测距。在国内,中国科学院上海天文台于2008年,中国科学院云南天文台于2010年,中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站于2014年相继获得空间碎片的漫反射回波。空间碎片以及军用航天器等不能提供有效合作信息的空间目标统称为空间非合作目标^[15]。目前,非合作目标的激光测距资料一般为单站数据,数据量较少,难以进行精密定轨。综合定轨就是利用各种观测技术所获得的观测数据,并加入相应权重,一起参与精密定轨的方法^[16-18]。本文以Ajisai卫星和Jason-1卫星为例,利用单站SLR数据和光学观测数据进行综合定轨。数据分析结果发现,综合定轨的定轨精度有了显著提高,验证了该方法的可行性和实用性。

2 空间目标的光学和SLR观测

在空间目标监视领域,许多国家或组织建立了由光学观测和雷达设备组成的空间目标监视系统,如美国的空间监视网、俄罗斯的空间监视系统(SSS)等。各个监测网相对独立,都有对目标进行监视、跟踪、定轨和编目的能力。雷达设备一般兼有对弹道导弹的预警任务^[19],所以数据是非开放的。单站的光学望远镜即可对目标进行跟踪定轨,而单站的激光测距数据定轨困难,因此多数卫星激光测距站都加入了全球卫星激光测距服务系统网(ILRS),观测数据和轨道预报都是开放式的^[20]。参与全球联测的空间目标为合作目标,目前非合作目标的激光测距正处于起步阶段,一般为单站数据。

2.1 光学观测

空间目标自身不发光,但其反射的太阳光可以被光学设备所接收,这使得光学观测成为空间目标探测的主要手段之一。光电望远镜的工作过程大致为,望远镜提前指向预报位置,等待目标出现,目标进入望远镜视场后,跟踪程序引导驱动系统跟踪目标,并采集CCD图像,码盘数据直接给出轴系定位结果[方位角和高度角(A, h)或者水平经纬度(L, B);对于天文定位,计算机还要计算定标星(背景恒星)的位置,通过星点提取和星图匹配,得到目标的赤经赤纬(α, δ)]。光学观测数据的定轨精度一般在百米的量级。

以中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站40 cm空间碎片望远镜所观测的Ajisai卫星为例,样本取2012年5月5日至9日共9个弧段(pass)的数据,进行精密定轨,定轨轨道和理论轨道的偏差如图1所示(本文中,理论轨道为利用全球卫星激光测距服务系统中的标准点数据所定出的精密轨道)。从图1可以看出,轨道的 x, y, z 三分量的偏差和位置偏差幅度在200 m之内。光学观测的轨道预报一般来源于两行根数(TLE)。两行根数是北美防空司令部(NORAD)基于一般摄动理论(SGP)产生的一组用于地球轨道飞行器预报的轨道根数。SGP模型系列中最常用的为SGP4版本,其摄动因素包括地球引力函数 $J_1 \sim J_6$ 项、日月摄动以及大气阻力^[21-22]。空间碎片望远镜一般具有视场大、光力强等特点,TLE根数和SGP4模型做出的预报能够满足光学观测设备的引导需求。

2.2 激光测距

激光测距是通过测量激光信号从地面站到空间目标的往返时间,获得空间目标的距离信息。对于带有角反射器的激光卫星单次测量精度可达毫米,定轨精度可达到亚厘米量级。然而,由于非合作目标表面没

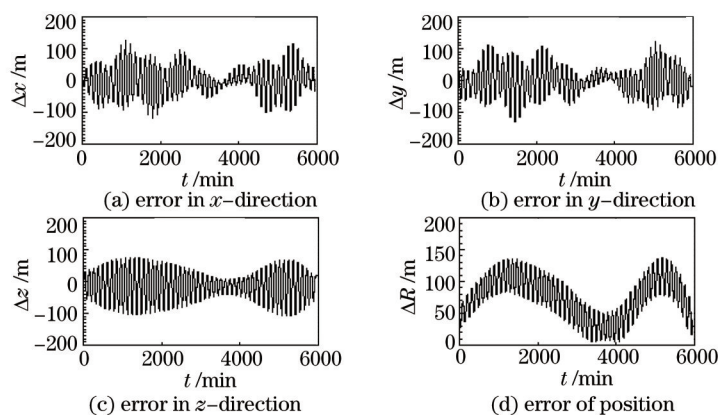


图1 Ajisai卫星的光学观测数据定轨精度

Fig.1 Orbit precision of Ajisai computed with optical survey data

有角反射器,仅有极少部分的激光信号靠表面漫反射返回地面,成功接收回波信号对观测技术和预报都提出了很高的要求。在自主发射激光的同时,激光测距系统也拥有一套完整的光学观测系统。接收的光信号一部分用于成像跟踪目标,一部分提供给单光子雪崩二极管(C-SPAD),用于确定回波时间。距离门控制技术是目前激光测距中使用最广泛的抑制背景噪声的方法,C-SPAD要求门控信号和有效光子的间隔大于50 ns。高精度的轨道预报有利于减少距离门调整范围,提高成功探测率。从2006年8月起,国际激光测距网开始使用综合预测格式(CPF)星历预报。CPF预报给出目标在地固坐标系中的位置量,对于非球型卫星三天弧长预报,距离误差一般优于10 m。利用激光测距技术观测非合作目标处于起步阶段,预报只能通过两行根数来获取。两行根数的轨道预报距离误差近千米,精度远远低于ILRS提供的CPF预报,这给距离门的设置带来了困难。而且用于激光测距的望远镜一般为能量汇聚型,视场较小,方位偏差太大则目标不能进入视场。非合作目标没有角反射器,回波信号很弱,测距的单次成功率很低。同时由于空间非合作目标的旋转,有时收到回波,有时不能收到回波,所以观测量较少。仅利用单站激光测距数据进行精密定轨,利用迭代方法求解轨道的程序往往不能收敛。

3 两种观测技术综合定轨

由获得的观测数据来确定空间目标的轨道即轨道确定。轨道确定一般有两种概念:初轨计算和轨道改进。轨道改进是利用大量的观测数据,通过考虑各种摄动力的二体问题来确定目标的精密轨道。轨道改进可以在定轨的同时解算某些参数,也称为精密定轨。综合定轨就是在精密定轨的过程中同时应用两种或更多不同类型的观测数据,对不同类型数据赋予不同权重,从而实现理想的精密定轨。

3.1 综合定轨原理

用于定轨的观测数据有激光测距资料 ρ 和光学测角资料 α 、 δ 等。利用状态量的测量方程和运动方程,由加权最小二乘估计求解,得到状态量的修正值。详细过程可以查阅参考文献[23-24]。对于单站的激光测距短弧数据,轨道改进的系数矩阵 \mathbf{B} 接近秩亏,条件方程不可解。对于长弧数据,数据量太少,定轨程序一般难以收敛。对于单站光学观测,一次采样相当于二维数据,则不存在秩亏的情况。两种观测技术综合定轨就是同时利用测距和测角两种资料的统计信息,使轨道优化顺利进行,并达到提高轨道精度的目的。

定轨采用的力学模型:1)地球非球形摄动(JGM3地球引力场模型,取 70×70 阶);2)日月引力潮汐[采用行星/月球星历表(DE405/LE405)太阳和月球位置];3)固体潮汐摄动[国际地球自转参数服务系统(IERS1996)规范,Wahr模型];4)海潮摄动(CSR3.0模型);5)太阳光压和地球辐射压摄动;6)大气阻力和类阻力摄动;7)相对论摄动;8)地球自转形变摄动;9)经验的RTN摄动;10) n 体摄动(太阳和月球)。测量模型:1)Marini-Murray大气折射;2)Jason1卫星的归心修正(1.125 m);3)固体潮引起的台站位移;4)永久潮汐项对台站的影响;5)海潮负荷对台站的影响;6)地球自转形变对台站的影响。参考系:1)J2000.0平赤道平春分点地心惯性系;2)测站坐标为国际地球参考框架(ITRF97);3)板块模型为ITRF97;4)国际天文学联合会(IAU2000)岁差;5)IERS章动改正;6)DE405/LE405行星历表。

3.2 综合定轨精度

以球型 Ajisai 卫星为例进行综合定轨, 样本取中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 60 cm 卫星激光测距望远镜 2012 年 5 月 9 日共 2 个弧段的 SLR 数据, 联合中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 40 cm 空间碎片望远镜 2012 年 5 月 5 日至 9 日共 9 个弧段观测数据(图 1 中定轨所用数据), 激光测距数据和天文定位数据的相对权重取经验值 100:1, 定轨结果见图 2。图 2 中横坐标为时间, 起始时间为协调世界时(UTC)2012 年 5 月 5 日 13 点 38 分整, 时间间隔为 1 min。纵坐标分别表示卫星在地固坐标系中 x 、 y 、 z 坐标三分量及位置量 R 与理论值的偏差。其中理论值来源于全球激光观测数据所获得的精密轨道, 精度在 3~5 cm。

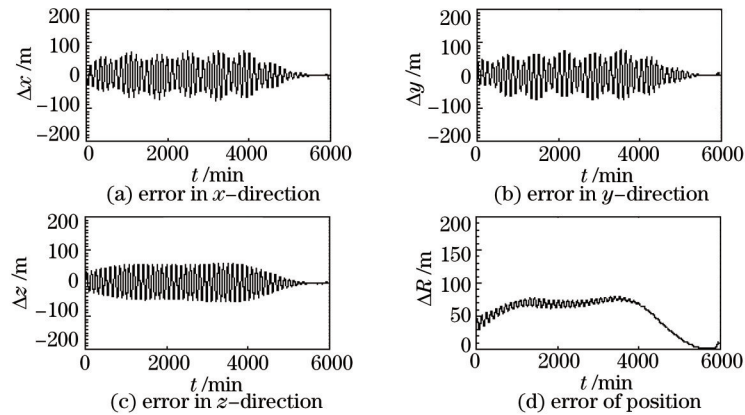


图 2 Ajisai 卫星激光测距和光学数据综合定轨精度

Fig.2 Orbit precision of Ajisai obtained by optical survey and SLR data

比较图 1 和图 2, 可以看出, 由于只有最后一天有激光测距数据, 综合定轨前面大部分弧段的精度改变并不明显, 与光学定轨精度相当。但是对有关激光测距数据对应的弧段, 由于激光测距数据有较高的权重, 定轨精度有明显的提高, 偏差由百米量级减小到十米量级。

同 Ajisai 卫星一样, 又以非球形 Jason-1 卫星为例, 进行综合定轨。样本取中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 60 cm 卫星激光测距望远镜 2012 年 1 月 15 日至 16 日共 3 个弧段的 SLR 数据, 联合 40 cm 空间碎片望远镜 2012 年 1 月 13 日至 15 日共 5 个弧段的观测数据。有激光测距数据对应弧段的轨道偏差一般在 10~20 m, 而单纯光学数据定轨精度在百米量级, 定轨精度明显提高。另外, 有观测数据对应的弧段定轨精度较高, 联合两种观测技术综合定轨的明显优点就是增加了有效弧长。

3.3 综合定轨预报精度

综合定轨可以使轨道精度大幅提高, 进而可以利用精密轨道根数做轨道预报。以 Ajisai 卫星为例, 取综合定轨的根数, 做 5 天的轨道预报, 预报偏差如图 3 所示。从图 3 可以看出, 由综合定轨精密轨道根数做外推, 5 天的预报距离偏差好于百米, 而两行根数预报精度为千米的量级。新的轨道预报精度有较大幅度的提高, 这为激光测距中距离门的设置带来方便。这种方法对于提高非合作目标的轨道预报也是可行的。由于

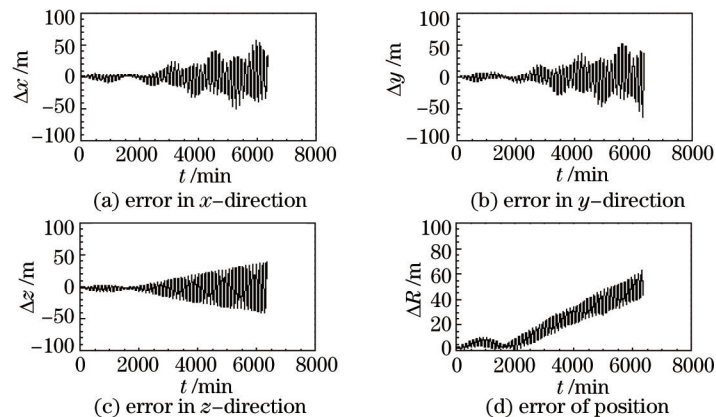


图 3 Ajisai 卫星综合定轨预报精度

Fig.3 Prediction orbit precision of Ajisai obtained by accurate elements

联合定轨和轨道预报运算过程在几分钟内即可完成,而空间目标的下一圈,至少要几十分钟后才能来到,所以利用此方法提高下一圈或第二天激光测距的轨道预报具有现实意义。高精度的预报可以得到更多的激光测距数据,进而得到更加稳定精确的轨道,从而使非合作目标的激光测距形成一个良性的常规运行过程。

4 结 论

综合光学观测数据和单站激光测距数据对空间目标进行精密定轨有以下几个优点:

1) 解决了单站激光测距不能定轨的困难,使高精度的测距数据得以充分利用,有激光测距数据对应的弧段定轨精度比单纯光学数据定轨有了一个量级的提高;

2) 一般情况下,观测数据越多,弧段分布越均匀,定轨精度也越高,联合两种观测数据综合定轨,明显增加了有效弧长;

3) 利用综合定轨得到的精密轨道根数可以推出精确的轨道预报,从而可以提高激光测距的成功捕获率,越多的激光测距数据得到越精确的轨道,这有利于非合作目标的激光测距形成一个良性的常规运行过程。

综合定轨方法对雷达数据是兼容的,多种类型的数据可以一起统计分析,只要加入合理的权重,就能实现理想的精密定轨。此方法对联合各种观测设备和技术,提高空间碎片的预警预报准确率有一定的帮助。

参 考 文 献

- 1 Thomas Schildknecht. Optical surveys for space debris[J]. *Astron Astrophys Rev*, 2007, 14(1): 41-111.
- 2 Schildknecht T, Flohrer T, Musci R, *et al.* Statistical analysis of the ESA optical space debris surveys[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63: 119-127.
- 3 Beutler G, Hugentobler U, Ploner M, *et al.* Determining the orbits of EGNOS satellites based on optical or microwave observations[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(3): 392-401.
- 4 Schildknecht T, Ploner M, Hugentobler U. The search for debris in GE0[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 28(9): 1291-1299.
- 5 Jin Wang, Wu Zhensen, Wu Jian, *et al.* Space debris experimentation study using incoherent scatter radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(5): 956-960.
金 旺, 吴振森, 吴 健, 等. 非相干散射雷达探测空间碎片实验研究[J]. *电波科学学报*, 2011, 26(5): 956-960.
- 6 Jin Wang, Wu Jian, Wu Zhensen, *et al.* Observation of OSCAR-3 satellite radar cross section using the tristatic radar[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, 33(4): 453-457.
金 旺, 吴 健, 吴振森, 等. 三站雷达测量 OSCAR-3 卫星散射截面[J]. *空间科学学报*, 2013, 33(4): 453-457.
- 7 Wang Ruijun, Wang Hongqiang, Zhuang Zhaowen, *et al.* Research progress of terahertz radar technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040001.
王瑞君, 王宏强, 庄判文, 等. 太赫兹雷达技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040001.
- 8 Sun Mingguo, Liu Chenzhi, Fan Cunbo, *et al.* Analysis on the accuracy of celestial positioning based on the SLR precise orbit[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, 53(2): 153-160.
孙明国, 刘承志, 范存波, 等. 基于 SLR 精密轨道的天文定位精度分析[J]. *天文学报*, 2012, 53(2): 153-160
- 9 Liu Chengzhi, Zhao You, Fan Cunbo, *et al.* Performance and observation summary of changchun satellite laser ranging station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(6): 406-408.
刘承志, 赵 有, 范存波, 等. 长春卫星激光测距站的性能和观测概况[J]. *科学通报*, 2002, 47(6): 406-408.
- 10 Liu Chengzhi, Zhao You, Fan Cunbo, *et al.* Performance and observation summary of changchun satellite laser ranging station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(13): 1070-1072.
- 11 Feng Chugang, Zhu Yuanlan, Zhang Feipeng. Determination of LAGEOS satellite' orbits and residual analysis[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2003, 44(1): 55-64.
冯初刚, 朱元兰, 张飞鹏. LAGEOS 卫星精密定轨及残差分析[J]. *天文学报*, 2003, 44(1): 55-64.
- 12 Zhang Haifeng, Meng Wendong, Wu Zhibo, *et al.* One way laser ranging and its measuring experiment[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0308005.
张海峰, 孟文东, 吴志波, 等. 单向激光测距及其测量试验[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308005.
- 13 Chen Jingyuan, Chang Xiang, Zhou Yu, *et al.* Statistical analysis of received photons for lunar laser ranging system with adaptive optics[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0313001.

- 陈京元, 常翔, 周钰, 等. 月球激光测距自适应光学系统回波统计分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0313001.
- 14 Li Xi, Tang Rufeng, Li Zhulian, *et al.*. Laser ranging data processing based on the analysis of the binary image[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208005.
- 李熙, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 基于二值图像的卫星激光测距数据处理[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208005.
- 15 Hao Gangtao, Du Xiaoping. Advances in optical measurement of position and pose for space non-cooperative target[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080028.
- 郝刚涛, 杜小平. 空间非合作目标位姿光学测量研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080028.
- 16 Zhang Qiang, Liao Xinhao, Huang Cheng. An investigation of the precise orbit determination by combination of two kinds of measurements[J]. Acta Astronomica Sinica, 2000, 41(4): 347-354.
- 张强, 廖新浩, 黄诚. 两种观测技术综合精密定轨的探讨[J]. 天文学报, 2000, 41(4): 347-354.
- 17 Qin Xianping, Yang Yuanxi, Jiao Wenhai, *et al.*. Combined determination of satellite orbit using SLR and pseudorange data[J]. Geomatics and Information of Wuhan University, 2003, 28(6): 745-748.
- 秦显平, 杨元喜, 焦文海, 等. 利用SLR与伪距资料综合定轨[J]. 武汉大学学报, 2003, 28(6): 745-748.
- 18 Sun Mingguo, Liu Chengzhi, Li Zhenwei, *et al.*. Orbit determination using single station SLR data assisted by telescope pointing data[C]. SPIE, 2011. 8201-8201B.
- 19 Yang Pengcui, Shi Huli, Li Shengming. The review of space debris detection by the ground based radar[J]. Astronomical Research & Technology, 2007, 4(4): 320-326.
- 杨朋翠, 施浒立, 李圣明. 空间碎片地基雷达探测综述[J]. 天文研究与技术(国家天文台台刊), 2007, 4(4): 230-326.
- 20 Pearlman M R, Degnan J J, Bosworth J M. The international laser ranging service[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(2): 135-143.
- 21 Hoots F R, Roehrich R L. Models for Propagation of NORAD Element Sets[R]. Spacetrack Report No.3, Colorado Springs CO: US Air Force Aerospace Defence Command, 1980: 1-3.
- 22 Levit C, Marshall W. Improved orbit predictions using two-line elements[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(7): 1107-1115.
- 23 Li Jisheng. Precise Orbit Determination of Satellite[M]. Beijing: People's Liberation Army Press, 1995: 3-13.
- 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995: 3-13.
- 24 Liu Lin, Wang Haihong, Hu Songjie. Summary on satellite orbit determination[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2005, 24(2): 28-34.
- 刘林, 王海红, 胡松杰. 卫星定轨综述[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(2): 28-34.

栏目编辑: 史敏