

天宫一号飞行器失效后激光测距实验分析

孙明国^{1,2,3}, 高鹏骐¹, 李振伟², 孙建南², 董雪², 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, 长春 130117;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: youzhao@bao.ac.cn

2016-11-24 收稿, 2017-01-09 修回, 2017-01-10 接受, 2017-03-27 网络版发表

吉林省科技发展计划(20150623024TC-33)、国家自然科学基金(U1231114, 11503056, 11503057)和国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)资助

摘要 天宫一号飞行器于2016年3月终止了数据服务, 成为在轨飞行的“空间碎片”。其所处的轨道空间, 高度约400 km, 是天宫二号航天器、国际空间站等载人航天器以及一系列对地测量卫星运行的重要区域。空间碎片对这些航天器的运行构成严重威胁。卫星激光测距是目前空间目标观测手段中精度最高的一种, 测量精度可达厘米量级, 其高精度的观测结果为碰撞风险评估提供了有力支撑。天宫一号装有角反射器, 这为激光测距提供了良好的实验平台。2016年3~5月期间, 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站(7237)和中国科学院上海天文台佘山观测站(7821)以及中国科学院紫金山天文台等单位联合对失效的天宫一号目标进行了激光测距实验, 共获得有效数据23圈。通过实测数据处理分析, 发现激光观测数据的均方根(RMS)即定轨精度可以达到10 cm。利用卫星激光测距(SLR)精密定轨得到的新根数做轨道预报, 两天的预报在地固坐标 x, y, z 三个分量上的误差约200~300 m, 径向误差好于100 m, 能够满足激光测距后续观测的要求。本次实验将为天宫二号及其他低轨道航天器的激光测距和精密定轨提供有益的参考和技术支撑。

关键词 空间实验室, 空间碎片, 卫星激光测距(SLR), 光学观测, 精密定轨

天宫一号空间目标飞行器是中国首个空间实验室, 于2011年9月29日在酒泉卫星发射中心发射。它实际上也是中国空间站的雏型, 运行期间先后与神舟八号、九号和十号飞船完成空间交会对接, 多位航天员曾进入天宫一号工作和生活并开展空间科学实验。该飞行器已于2016年3月正式终止了数据服务, 成为空间轨道上的“空间碎片”^[1,2]。天宫一号所处的轨道空间, 高度约400 km, 是天宫二号航天器、国际空间站等载人航天器以及一系列对地测量卫星运行的重要区域。空间碎片严重威胁着有效卫星和航天器的运行安全, 对于失效后的天宫一号目标, 我国采

取了两方面应对措施: 一是加强了该目标的地面监测和预警; 二是在飞行器轨道寿命末期, 使天宫一号主动离轨, 重返大气层烧毁。

目前对空间碎片的监测和跟踪主要采用地基的光学望远镜和雷达。雷达设备一般兼有对弹道导弹的预警任务, 所以数据是非开放的。光学设备观测技术成熟, 运行费用相对较低, 适合长期的常规观测, 例如中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站(简称: 国家天文台长春站)某光学望远镜在天宫一号目标发射和数次空间交会对接过程中一直参与跟踪定位和碰撞预警任务。空间目标只要有足够的星等, 即

引用格式: 孙明国, 高鹏骐, 李振伟, 等. 天宫一号飞行器失效后激光测距实验分析. 科学通报, 2017, 62: 2796–2803

Sun M G, Gao P Q, Li Z W, et al. Analysis on the experiment of satellite laser ranging of defunct Tiangong-1 spacecraft (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2796–2803, doi: 10.1360/N972016-01302

可被光学设备跟踪定位,光学资料比较丰富,然而光学定轨精度不高,一般在百米的量级^[3~6]。卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)是目前空间目标观测手段中精度最高的一种,测量精度可达厘米量级,已在卫星精密定轨和空间大地测量中逐步得到应用^[7~9]。美国的科研人员曾提出,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风险^[10]。如何利用卫星激光测距技术对空间碎片跟踪定位成为空间科学研究领域的一个重要课题。

近年来,空间碎片激光测距技术在许多国家得到迅速发展。2002年10月,澳大利亚的Greene^[11]在报告中称位于堪培拉的Stromlo激光测距站已实现对1250 km、大小为15 cm的空间碎片进行测距^[12]。2011年奥地利Graz激光测距站和法国Grasse激光测月站先后获得空间碎片的激光测距有效数据^[13,14]。作为空间大国,为了满足载人航天安全和可持续利用空间资源的要求,中国也在不断发展空间碎片跟踪监测的新技术和新方法。2008年中国科学院上海天文台佘山观测站(简称:上海天文台佘山站)(卫星激光测距系统编号:7821)利用高功率的Nd:YAG测距试验系统,开始空间碎片的激光跟踪和测距试验,并获得了火箭残骸的漫反射激光测距数据。随后,2010年云南天文台也获得了数十圈的空间碎片激光测距数据。2013年末国家天文台长春站(卫星激光测距系统编号:7237)完成了空间碎片激光测距系统的安装与调试,2014年初开始获得空间碎片的激光测距数据。现阶段国家天文台长春站(7237)已成功实现了400~1800 km的非合作目标漫反射激光测距,共计观测244个目标,目标的雷达散射截面(radar cross-section, RCS)范围为1.2~18.5 m²,平均测距误差约为1 m^[15]。

在天宫一号即将陨落最后时期,各有关单位本着充分利用、挖掘潜力的原则,继续开展相关的科学实验。为了满足和神舟飞船交会对接的需要,天宫一号在设计之初安装了近场和远场两个雷达角反射器,这为激光测距创造了极为有利的观测实验平台。从2016年3月开始,国家天文台长春站和上海天文台以及中国科学院紫金山天文台等单位开始对天宫一号目标进行激光测距实验。本文主要论述天宫一号激光测距的实验原理和数据处理过程,实验证明激光测距精密定轨可以使目标的定轨精度得到显著提高。这对于空间目标的轨道预报和碰撞预警具有重

要意义。

1 天宫一号的激光测距

天宫一号空间目标飞行器质量为8500 kg、全长10.4 m、最大直径为3.35 m、有效横截面积为34.87 m²。它的轨道倾角为42.7650°,偏心率为0.001,轨道周期约90 min。目标星等约1.3,肉眼可见。由于天宫一号体积庞大且轨道较低,它在自由运行状态下,轨道衰减非常明显。比如:2016年3月20日,天宫一号目标近地点高度为378590.3 m,远地点高度为399500.1 m,而到了3月30日,近地点高度为381893.1 m,远地点高度为394220.6 m。可以看出它的远地点每天下降约500 m,同时近地点抬升约300 m,即轨道偏心率越来越小,同时平均轨道逐渐下降。

卫星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,获得空间目标距离信息的技术。对于带有角反射器的激光卫星单次测量精度可达毫米,定轨精度可达到厘米量级。卫星激光测距系统在跟踪目标的同时,发射激光并接收回波信号。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。为了保证观测精度同时减小空间背景噪声的影响,C-SPAD要求门控信号和有效光子的间隔大于50 ns,这要求轨道预报必须有足够的精度。否则即使在视场内发现目标,在调整距离门的过程中,没有收到回波信号目标已经丢失。天宫一号目标的轨道低、角速度快、过境时间短,如果轨道预报不精确,成功探测的几率将会大大降低。

天宫一号目标没有加入国际激光测距服务网(international laser ranging service, ILRS),因此也就没有ILRS提供的精密预报。对于这类目标的激光测距,一般的做法是采用两行根数(two-line element, TLE)预报。两行根数由北美防空司令部(north American air defense command, NORAD)结合空间监视网面向全球公开发布(<https://www.space-track.org>),它是目前编目最全,影响力最为广泛的预报根数^[16]。例如,取2016年3月22日天宫一号(NORAD编号:37820)的两行根数,基于SGP4 (simplified general perturbation version4)算法做3天的轨道预报。两行根数轨道预报的偏差如图1所示,从图1可以看出,天宫一号的两行根数预报在地固坐标系中x, y, z分量上的偏差约5000~8000 m,距离偏差约1000 m。TLE预报

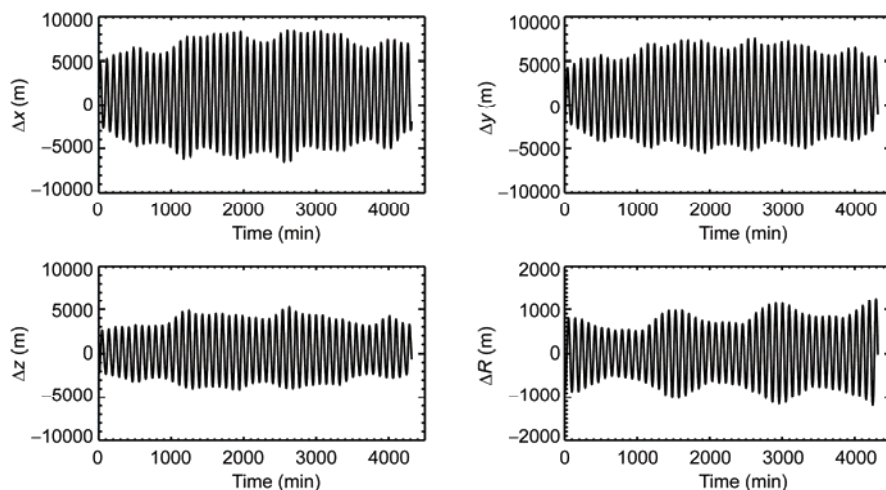


图1 天宫一号目标的两行根数(TLE)预报精度

Figure 1 The precision of TLE orbit prediction of Tiangong-1

能满足光学望远镜的预报要求^[17],但是这种精度的预报用于天宫一号目标激光测距很难收到回波信号,也就是说一般的两行根数预报不能满足激光测距的精度要求.国家天文台长春站所用的天宫一号激光联测实验的轨道预报,由中国科学院紫金山天文台空间目标与碎片观测研究中心提供,观测研究中心提供的天宫一号的高精度轨道预报,是目标在地球固定坐标系中一系列的坐标位置,步长为60 s.激光测距时,根据具体的要求通过Lagrange内插的方法计算出目标的状态量.由于有雷达数据的支持,紫金山天文台提供的轨道预报比较准确.通过对比激光测距精密轨道和紫金山天文台提供的预报轨道发现,该预报在两天的弧长内,预报精度在地固坐标系中 x , y , z 三个分量上好于300 m,特别是在距离量上好于百米,能够满足激光测距的需要.

2 激光测距数据处理与分析

2016年3~5月,国家天文台长春站和上海天文台佘山站对天宫一号成功进行了激光测距,共获得23圈(pass)数据,其中国家天文台长春站(7237)22圈,观测弧长从几十秒到三分钟不等,最长连续观测数据天数为5天.上海天文台佘山站(7821)由于天气和可见期等因素的影响,仅仅在3月31日获得一圈观测数据,观测弧长72.5 s.在3月31日前后三天内,长春站没有观测数据,即两个站的观测数据不能同时做定轨处理.观测数据少,弧段分布不理想且一般为单站数据是目前空间碎片激光测距精密定轨面对的基

本问题.

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同时可以解算某些参数,也称为精密定轨^[18~20].精密定轨一般采用的是基于线性无偏最小方差估计技术的统计动力学方法.卫星在地心天球参考坐标系中的状态方程可写为

$$\begin{cases} \dot{X} = F(X, t), \\ X(t_0) = X_0, \end{cases} \quad (1)$$

式中, $X = [\mathbf{r}^T; \mathbf{v}^T; \mathbf{p}_d^T; \mathbf{p}_g^T]^T$, 其中, $\mathbf{r}$, $\mathbf{v}$ 分别为空间目标的位置矢量和速度矢量; $\mathbf{p}_d$ 为待估的动力学参数矢量,例如,在本次定轨的同时解算了大气阻力系数、太阳光压系数; $\mathbf{p}_g$ 为待估的几何参数矢量,可以包括台站坐标、地球自转参数等.空间目标的观测方程可写为

$$Y_i = G(X_i, t_i) + \varepsilon_i, \quad (2)$$

式中, X_i , Y_i , ε_i 分别为 t_i 时刻的状态、观测值以及观测噪声.首先对方程(1)和(2)进行线性化,然后利用最小二乘方法求解.在求解估值过程中,一般采用迭代方法,直至满足设置的收敛准则为止.

收敛的判据为:(1)目标位置矢量最新估值的方差小于预先指定的判据POSmin.(2) $|RMS_j - RMSP| / RMS_j$ 小于预先指定的一个量.其中, RMS_j 为第 j 次迭代中全部观测残差之带权中误差,定义为

$$RMS_j = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_{ij})(y_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n (w_{ij})} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中, n 为观测数据总数, y_{ij} 为第 j 次迭代中观测数据的残差, w_{ij} 为对应的权重, $RMSP$ 为观测残差均方根的线性预报值, 在数值上等于 $RMSP_{j+1}$, 其计算公式为

$$(RMSP)_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_{ij} (y_{ij} - \mathbf{H}_{ij} \hat{x}_j)^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{P}_j} (\bar{x}_j - \mathbf{H}_{ij} \hat{x}_j)^2}{\sum_{i=1}^n w_{ij}}}, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{H}$ 为偏导数矩阵和状态转移矩阵的矢量乘积矩阵, $\bar{P}$ 为协方差矩阵的先验值, $\bar{x}$ 为状态偏差估计的先验值, $\hat{x}$ 为状态偏差的最优估值. 当这两个条件满足其中 1 个时, 即认为程序正常收敛.

在定轨过程中采用的力学模型为: JGM3 地球引力场模型, 取 70×70 阶、太阳和月球 n 体摄动、DE405/LE405 行星和月球星历表的日月引潮力模型、国际地球自转服务系统 IERS1996 规范的 Warh 地球固体潮摄动模型、美国德克萨斯大学空间研究中心 CSR3.0 海潮摄动模型、太阳光压和地球辐射压摄动、DTM94 大气阻力模型^[21]、相对论摄动等. 参考系为: J2000.0 平赤道平春分点地球惯性系、国际地球参考框架 ITRF97 测站坐标和地球板块模型、国际天文联合会 IAU2000 岁差、国际地球自转服务系统 IERS 章动.

严格来说, 单站的测距数据是不能定轨的, 如果一个观测站连续取得多圈观测数据而且数据量比较丰富, 由于地球的自转, 等效于多个观测站取得了观测数据, 则可以进行轨道改进. 利用国家天文台长春

站 60 cm 激光测距望远镜所观测的天宫一号目标观测数据进行精密定轨, 样本取 2016 年 3 月 23~26 日共 8 个弧段 (pass) 的数据, 定轨结果如表 1 所示. 从表 1 中可以看出, 天宫一号目标的单站激光测距定轨精度在 10 cm 左右.

定轨结果的均方根 (RMS) 反映的是轨道的“内符合”精度, “外符合”精度一般是通过广泛认可的其他定轨结果 (比如: GPS) 和观测数据做比较, 或者用自己定轨结果的前后弧段交点处的轨道之差表示. 本次实验在 J2000 坐标系中, 利用 3 月 23~25 日三天的观测数据定出的 3 月 24 日零时零分零秒的轨道 X_0 (x, y, z, v_x, v_y, v_z) 为 (4170993.815, 5097681.717, 1568507.107, -5221.622, 2751.738, 4901.826); 利用 3 月 24~26 日三天的观测数据定出的历元时刻 3 月 24 日零时零分零秒的最优解 X_0 为 (4170948.492, 5097718.921, 1568557.051, -5221.575, 2751.745, 4901.850), 其中距离单位为 m, 速度单位为 m/s. 比较前后两个弧段的定轨之差可以发现, 同一个时刻的定轨结果在 x, y, z 三个分量上的差别小于 50 m, 距离偏差 ($|X_0| - |X_0|$) 为 11.660 m. 在重叠弧段的两天内, 在轨道径向、沿轨迹方向和轨道法向 (RTN 坐标系) 对两次定轨结果做偏差分析, 统计结果 $RMS(\sigma_R, \sigma_T, \sigma_N)$ 为 (22.563, 49.862, 55.794) m, 其中历元时刻 3 月 24 日零时零分零秒的坐标偏差 $\Delta X(\Delta X_R, \Delta X_T, \Delta X_N)$ 为 (-11.660, -71.124, 2.104) m. 当然, 影响“外符合”精度的因素不仅仅跟观测数据本身的精度有关, 还与观测站在全球的分布、观测数据的弧长以及定轨模型的选取等诸多因素有关. 随着越来越多的观测站加入空间碎片的联测工作和观测数据的丰富, “外符合”精度将会有所提高.

表 1 天宫一号空间目标激光测距精密定轨精度

Table 1 The root mean square (RMS) of orbit determination of Tiangong-1 spacecraft using SLR data

弧段序号	观测时间(协调世界时)	弧长(s)	观测数据个数	剔除数据个数	RMS(m)
1	2016/3/23 11:58:9.8	105.4	24886	1516	0.144
2	2016/3/23 13:34:55.9	70.4	12322	243	0.110
3	2016/3/24 11:3:1.8	34.2	9158	2648	0.180
4	2016/3/24 12:39:3.8	147.2	26797	2025	0.041
5	2016/3/24 14:14:11.4	168.7	15368	303	0.074
6	2016/3/25 13:14:30.8	47.9	608	0	0.114
7	2016/3/26 12:17:0.4	122.4	5007	1655	0.132
8	2016/3/26 13:52:2.2	104.1	3476	201	0.152

3 激光与光学观测联合数据处理

如果利用单一技术能够获得足够多的高精度数据,同样能够获得高精度的定轨结果.而实际情况存在很多困难,空间目标的激光测距资料一般为单站数据,数据量较少,数据分布不好,导致在轨道改进计算中程序无法收敛,即不能进行精密定轨.为了解决单站少量激光测距数据不能定轨的困难,采用联合光学数据和激光数据进行综合定轨.

空间目标只要有足够的星等,就可以被光学望远镜跟踪定位,光学观测数据非常丰富.光学望远镜的观测数据主要有两种:一种是轴系定位数据,另一种是天文定位数据.在望远镜观测的过程中,码盘读出的数据即轴系定位数据:方位角和高度角(A, H)或者经纬度(L, B);而天文定位数据的生成相对比较复杂,计算机首先要采集CCD图像,还要计算定标星(背景恒星)的位置,最后通过星点提取和星图匹配,得到目标的赤经赤纬(α, δ).轴系定位的精度一般在10角秒(arcsec)左右,而天文定位由于不受置平及南北指向误差等因素的影响,定位精度对于高轨道目标可以达到3 arcsec.新一代光电望远镜跟踪定位空间目标主要采用天文定位方式,单纯的光学数据定轨精度一般在百米的量级.

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^[22~24].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 (赤经赤纬)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.对于单站的激光测距短弧数据,轨道改进的系数矩阵 B 接近秩亏,条件方程不可解.对于长弧数据,如果数据量太少,定轨程序也难以收敛.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观测资料,使轨道优化顺利进行,并达到提高轨道精度的目的.

以天宫一号目标为例,样本取2016年3月31日上海天文台佘山站激光测距望远镜观测的1个弧段(pass)的数据以及2016年3月29和30日国家天文台长春站光学望远镜观测的2个弧段(pass)的天文定位数据,进行综合定轨.在定轨过程中基于校正因子的经验加权法(empirical weighing method)对不同类型的观测数据采用不同的权重,具体做法是把经验均方差的倒数作为本类型数据的权重.激光数据经验均方差取0.10 m,光学数据经验均方差取10 arcsec,也就是激光数据和光学数据的权重比值取100:1,综合定轨结果如表2所示.光学定位的精度所用单位是arcsec,激光测距的单位是m.从定轨结果可以看出,光学定位精度一般在4~6 arcsec,激光测距的精度为6.9 cm,综合定轨的结果(RMS)为0.077.

4 精密定轨后的轨道预报

空间碎片探测最主要的目的是碰撞预警,而碰撞预警的关键就是轨道预报.同时,为了满足后续跟踪观测的需要也要不断更新轨道预报^[25].对于激光测距卫星,从2006年8月起国际激光测距网(ILRS)改为使用可用于多种目标测距的星历——CPF(consolidated prediction format)星历.该星历由国际激光测距服务预报中心提供,每个星历中包含若干天的具有一定时间间隔在地固坐标系中的目标状态量^[26].由于该星历是采用比较完善的力学模型和轨道计算模型求得的,预报精度相应有所提高.对于空间碎片的激光测距,轨道预报基本都是由各单位自行完成.按照CPF预报模式,利用激光测距定轨后新的轨道根数和前文所述的力学模型,对天宫一号目标进行轨道预

表2 天宫一号空间目标激光和光学观测数据综合定轨精度

Table 2 The root mean square (RMS) of orbit determination of Tiangong-1 space aircraft using SLR data and optical data

观测时间(协调世界时)	数据类型	弧长(s)	观测数据个数	剔除数据个数	RMS(unit)
2016/3/29 10:54:48.6	α	133.45	482	68	6.02(arcsec)
2016/3/29 10:54:48.6	δ	133.45	482	63	5.90(arcsec)
2016/3/30 11:32:9.0	α	125.50	485	11	3.99(arcsec)
2016/3/30 11:32:9.0	δ	125.50	485	10	4.15(arcsec)
2016/3/31 12:10:43.7	SLR	72.50	10882	0	0.069(m)
2016/3/29 10:54:48.6	(α, δ)&SLR	331.45	12816	152	0.077

报, 两天的预报精度在 x , y , z 方向上的精度约为200~300 m, 径向精度好于100 m, 如图2所示. 对比图2和1可以发现, 利用精密轨道根数得到的轨道预报精度比两行根数预报精度有显著提高.

5 结论

国家天文台长春站(7237)和上海天文台佘山站(7821)以及紫金山天文台空间碎片观测与研究中心对天宫一号空间目标成功进行了联合激光测距, 取得了有效观测数据. 通过数据分析可以得到以下结论:

(1) 对于单个激光测距站, 如果连续取得多圈观测数据且数据量比较丰富, 可以进行轨道改进. 利用天宫一号目标国家天文台长春站连续4天8圈(pass)的观测数据, 实现单站的精密定轨. 天宫一号目标的单站激光测距“内符合”精度(RMS)在10 cm左右. 通过对比前后弧段交点处的轨道之差, 重叠点精度在 x , y , z 方向上的精度约50 m, 距离精度约11 m. 从“内符

合”精度的数值推测, 随着观测站的不断增多和观测数据的丰富, “外符合”精度还有很大的提升空间.

(2) 利用光学观测数据和单站激光测距数据联合定轨解决了单站少量激光数据不能定轨的困难, 使高精度的测距数据得以充分利用. 利用上海天文台佘山站1圈的激光测距数据和国家天文台长春站光学数据联合定轨, 激光测距数据的定轨精度(RMS)为6.9 cm, 这一数值和单纯的激光测距定轨精度相当.

(3) 利用精密定轨得到的精密轨道根数可以推出精确的轨道预报, 天宫一号目标两天的预报精度在 x , y , z 方向上的精度约为200~300 m, 径向精度好于100 m, 可以满足后续激光测距的精度要求. 这对于观测站独立开展空间碎片激光测距工作具有积极的促进作用.

2016年9月发射成功的天宫二号航天器, 在外形和运行轨道方面与天宫一号十分相似, 本次实验将为天宫二号和其他低轨道航天器的激光测距和精密定轨提供有益的参考和技术支撑.

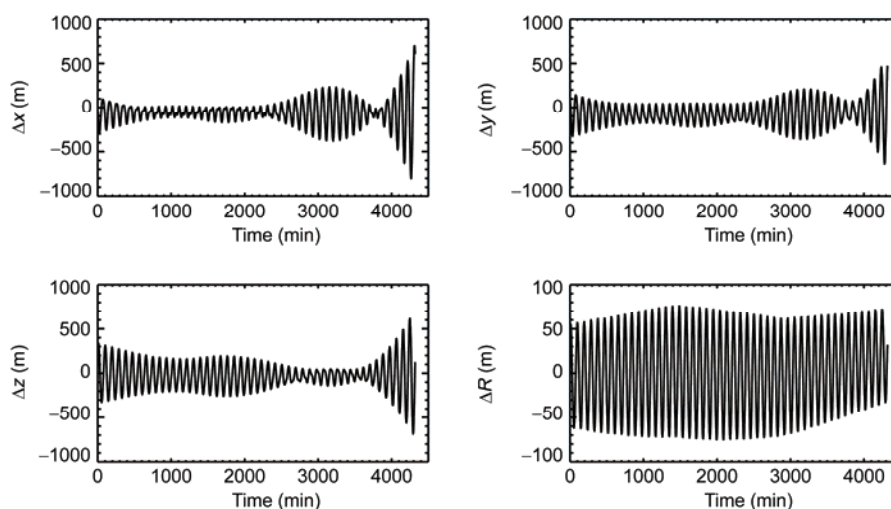


图2 天宫一号目标综合定轨预报精度

Figure 2 The prediction orbit precision of Tiangong-1 obtained by accurate elements

致谢 感谢中国科学院紫金山天文台空间目标与碎片观测研究中心提供天宫一号目标的高精度轨道预报和中国科学院上海天文台提供数据共享服务.

参考文献

- 1 Schildknecht T, Ploner M, Hugentobler U. The search for debris in GE0. Adv Space Res, 2006, 28: 1291–1299
- 2 Chen L, Han L, Bai X Z, et al. Orbital Dynamics and Error Analysis of Space Object (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 2–9 [陈磊, 韩蕾, 白显宗, 等. 空间目标轨道力学与误差分析. 北京: 国防工业出版社, 2010. 2–9]

- 3 Thomas S. Optical surveys for space debris. *Astron Astrophys Rev*, 2007, 14: 41–111
- 4 Schildknecht T, Flohrer T, Musci R, et al. Statistical analysis of the ESA optical space debris surveys. *Acta Astronaut*, 2008, 63: 119–127
- 5 Beutler G, Hugentobler U, Ploner M, et al. Determining the orbits of EGNOS satellites based on optical or microwave observations. *Adv Space Res*, 2005, 36: 392–401
- 6 Li Z W, Zhang T, Sun M G. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2015, 23: 589–599 [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. *光学精密工程*, 2015, 23: 589–599]
- 7 Liu C Z, Zhao Y, Fan C B, et al. Performance and observation summary of Changchun satellite laser ranging station (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2002, 47: 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. *科学通报*, 2002, 47: 406–408]
- 8 Liu C Z, Zhao Y, Fan C B, et al. Performance and observation summary of Changchun satellite laser ranging station. *Chin Sci Bull*, 2002, 47: 1070–1072
- 9 Sun M G, Liu C Z, Fan C B, et al. Analysis on the accuracy of celestial positioning based on the SLR precise orbit (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2012, 53: 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. *天文学报*, 2012, 53: 153–160]
- 10 Gottlieb R G, Sponaugle S J, Gaylor D E. Orbit determination accuracy requirements for collision avoidance. In: *Proceeding of the 11th Annual AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*. Santa Barbara: AIAA, 2001. 1105–1121
- 11 Greene B. Laser tracking of space debris. In: *Proceeding of 13th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*. Washington, 2002
- 12 Sang J, Ritchie I, Pearson M, et al. Results and analyses of debris tracking from Mt Stromlo. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui: The Maui Economic Development, 2013
- 13 Kirchner G, Koidl F, Friederich F, et al. Laser measurements to space debris from Graz SLR station. *Adv Space Res*, 2013, 51: 21–24
- 14 Courde C, Samain E, Laas-Bourez M, et al. Laser ranging on space debris with the MéO station. In: *Proceedings of International Technical Laser Workshop 2012*. Rome, 2012
- 15 Sun J N, Liu C Z, Fan C B, et al. Orbit determination of non-cooperative targets using laser ranging data at Changchun station (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2015, 56: 474–482 [孙建南, 刘承志, 范存波, 等. 长春站非合作目标激光测距资料的定轨. *天文学报*, 2015, 56: 474–482]
- 16 Hoots F R, Roehrich R L. Spacetrack Report No.3. *Project Spacetrack Reports*. Springs: US Air Force Aerospace Defense Center, 1980
- 17 Levit C, Marshall W. Improved orbit predictions using two-line elements. *Adv Space Res*, 2011, 47: 1107–1115
- 18 Li J S. Precise Orbit Determination of Satellite. Beijing: People's Liberation Army Press, 1995. 3–13 [李济生. 人造卫星精密轨道确定. 北京: 解放军出版社, 1995. 3–13]
- 19 Huang L W, Shuai P, Zhang X Y, et al. A method of pulsar based dynamic orbit determination in the earth fixed reference frame for near earth spacecraft (in Chinese). *J Astronaut*, 2016, 37: 895–900 [黄良伟, 帅平, 张新源, 等. 一种近地航天器脉冲星地固系动力学定轨方法. *宇航学报*, 2016, 37: 895–900]
- 20 Zhao G, Zhou X H, Wu B. Precise orbit determination of Haiyang-2 using satellite laser ranging. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 589–597
- 21 Wang H B, Zhao C Y. Analysis on the impact of different solar radiation indexes on atmospheric model accuracy (in Chinese). *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 39: 467–475 [汪宏波, 赵长印. 不同太阳辐射指数对大气模型精度的影响分析. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 467–475]
- 22 Zhang Q, Liao X H, Huang C, et al. An investigation of the precise orbit determination by combination of two kinds of measurements (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2000, 41: 347–354 [张强, 廖新浩, 黄诚, 等. 两种观测技术综合精密定轨的探讨. *天文学报*, 2000, 41: 347–354]
- 23 Sun M G, Liu C Z, Li Z W, et al. Orbit determination using single station SLR data assisted by telescope pointing data. In: *Proceedings of International Conference on Optical Instruments and Technology*. Beijing: International Society for Optics and Photonics, 2011
- 24 Sun M G, Gao P Q, Shen M, et al. Combined tracking and orbit determination for space objects using laser and optics measurements (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2015, 52: 071203 [孙明国, 高鹏骐, 沈鸣, 等. 空间目标的激光和光学两种观测技术联合定位. *激光与光电子学进展*, 2015, 52: 071203]
- 25 Bennett J, Sang J, Smith C H, et al. Accurate orbit predictions for debris orbital manoeuvre using ground-based lasers. *Adv Space Res*, 2013, 52: 1876–1887
- 26 Pearlman M R, Degnan J J, Bosworth J M. The international laser ranging service. *Adv Space Res*, 2002, 30: 135–143

Summary for “天宫一号飞行器失效后激光测距实验分析”

Analysis on the experiment of satellite laser ranging of defunct Tiangong-1 spacecraft

SUN MingGuo^{1,2,3}, GAO PengQi¹, LI ZhenWei², SUN JianNan², DONG Xue² & ZHAO You^{1*}

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

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

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

* Corresponding author, E-mail: youzhao@bao.ac.cn

Tiangong-1, which was launched on 29 September 2011, is the first prototype space station of China. During the past two years in its lifetime, Tiangong-1 has been visited by a series of Shenzhou spacecraft. On 21 March 2016, it had formally ended its service and now is replaced by Tiangong-2. The orbit of Tiangong-1 is about 400 km above the ground where Tiangong-2, the international space station and other satellites are located as well. The space debris is now posing great collision risk to these space assets. The satellite laser ranging (SLR) is a space tracking technique with the highest precision. Its precise data lay a solid foundation for reliable conjunction assessment.

On October 2002, Greene, Mount Stromlo SLR station of Australia, announced that it was possible to track a piece of space debris of a size of 15 cm at a distance of 1250 km using the SLR technology. In 2011, both Graz SLR station of Austrian and Grasse LLR station of France succeeded in debris laser ranging data. In China, Shanghai Astronomical Observatory obtained debris laser ranging data in 2008, Yunnan Observatory in 2010 and Changchun Observatory in 2014 also obtained debris data using SLR. In 2014, Changchun Observatory observed a total of 244 space debris in altitude about 400 to 1800 km. Tiangong-1 spacecraft was equipped with corner cube reflectors (CCRs), which were designed mainly for orbital rendezvous with Shenzhou spacecraft and now provide convenience for SLR.

From March to May of 2016, a coordinated laser ranging experiment on Tiangong-1 was made by Changchun Observatory (ILRS site ID: 7237) of National Astronomical Observatories, Sheshan station (ILRS site ID: 7821) of Shanghai Astronomical Observatory and Purple Mountain Observatory. Tiangong-1 has not been tracked by international laser ranging service (ILRS) and the orbit prediction of consolidated prediction format (CPF) cannot be obtained from ILRS. In general, the two line elements (TLE) of space objects can be downloaded from internet (<https://www.space-track.org>) which is released by north American air defense command (NORAD). However, the TLE prediction error of Tiangong-1 (NORAD ID: 37820) is about several kilometers that is not precise enough for SLR. During the experiment, the actual prediction is provided by Purple Mountain Observatory.

By the end of the experiment, data of 23 passes was obtained. Precise orbit determination is made by using the SLR data and the root mean squares (RMS) of the SLR observation residuals is about 10 cm. For one pass of scattered data, the orbit determination program is not convergent. Then combined orbit determination is made using one pass of SLR data and optical celestial position data. The relative weight of SLR data to optical data is 100:1 and the RMS of the SLR observation residuals is about 6.9 cm. The new orbit prediction is propagated from the orbit determination of SLR data and its precision is about 200–300 m. The radial precision is better than 100 m that is accurate enough for later laser ranging. In general, the experiment of satellite laser ranging to defunct Tiangong-1 spacecraft will have positive effects on precise orbit determination of both Tiangong-2 and other low earth orbit space objects.

space laboratory, space debris, satellite laser ranging (SLR), optical observations, precise orbit determination

doi: 10.1360/N972016-01302