

文章编号 1004-924X(2016)增-0252-07

白天卫星激光测距的望远镜实时指向修正

孙明国^{1,2,3*}, 高鹏骐¹, 李振伟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, 吉林 长春 130117;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高白天卫星激光测距目标的观测效率, 减小观测员的工作量, 利用实测数据来计算预报的时间偏差, 并对下一圈的实测预报进行指向修正。对望远镜指向进行大气折射修正和三轴误差修正, 以实测数据的距离信息计算预报时间偏差, 即利用一天内前几个弧段的实测数据, 包括晚上数据来计算预报的时间偏差。然后, 对下一圈的轨道预报进行时间偏差修正, 分析和比较改正后的偏差量和改正前的偏差量。实验结果表明: 传统的 M-M 大气折射修正模型和经纬仪三轴改正模型可以使望远镜指向精度(RMS)达到 $5\sim 10''$, 满足白天卫星激光测距的要求($10''$)。利用时间偏差修正预报指向可以使偏差量减小 $1\sim 3''$, 部分修正量多达 $8''$, 偏差量减小, 说明该方法是可行的。

关键词: 卫星激光测距; 指向偏差; 轴系误差; 误差修正

中图分类号: TH754; TN247 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20162413.0252

Real-time prediction correction of telescope in day-time satellite laser ranging

SUN Ming-guo^{1,2,3*}, GAO Peng-qi¹, LI Zhen-wei², DONG Xue², ZHAO You¹

- (1. National Astronomical Observatories, 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: sunmg@bao.ac.cn

Abstract: To increase the working quantities of observer without high observation efficiency, the measured data was used to calculate the predicted time bias, which can correct the time bias of prediction of the targets in the next pass. The telescope pointing corrections were performed at first, involving the atmospheric refraction modification and the tri-axial error correction. The predicted time bias was calculated with distance information of measured data, which means to calculate the predicted time bias with the measured data of the first few segmental arcs, including data of night. Finally the time bias in the prediction of track at next round was corrected and evaluated. Experimental result shows that the traditional M-M atmospheric refraction correction model and theodolite tri-axial cor-

收稿日期: 2016-05-26; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. U1231114; No. 11503056; No. 11503057); 国家重大科研装备研制项目(No. ZDYZ2013-2); 吉林省科技发展计划资助项目(No. 20150623024TC-33)

rection model can increase the (RMS) of telescope pointing to $5\sim 10''$, which can meet requirement of satellite laser ranging in the daytime ($10''$). The bias quantity of target can be decreased by $1\sim 3''$ by correcting the prediction pointing of time bias. Partial correction quantity can be as much as $8''$.

Key words: satellite laser ranging; pointing deviation; axial system error; error correction

1 引 言

国际上大多数观测台站的卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 都是在夜间进行的。白天卫星激光测距数据有助于提高空间目标的定轨精度,有利于开展地球动力学等相关领域的研究^[1-5]。因此,国内外许多台站都在积极发展白天卫星激光测距技术^[6-7]。白天背景噪声大约是夜间的 100 万倍,一般采用空间滤波、光谱滤波和时间滤波 3 种方法来减少天空背景噪声的影响。空间滤波技术采用可变光阑使接收视场角在 $10\sim 30''$ 内变化,而且白天不能看到卫星的像点,要进行“盲测”,因此瞄准目标是非常困难的。这就要求望远镜系统要有较高的指向精度 ($10''$) 和预报精度。

望远镜指向修正模型通常有两种:一种是球谐函数模型。该模型简单,适用于拟合各种误差,但该模型系数之间的相关性较大,模型稳定性较差,参数没有物理意义,不是最理想的模型;第二种是轴系修正模型,即采用对望远镜误差源进行回归分析的方法,针对望远镜本身的结构特点,建立物理意义明确的数学模型。现在国内外很多台站多采用此方法对望远镜进行指向修正,不管是对水平结构还是地平结构的望远镜,轴系修正模型都能取得较为满意的修正结果。2003 年,国际大地测量协会 (IAG) 提出了全球大地测量观测系统 (Global Geodetic Observing System, GGOS) 工作项目标准,国际卫星激光测距服务系统 (ILRS) 作为 (IAG) 成员,提出新建的卫星激光测距站都按 GGOS 的标准建立,现有的站点也需改进自身的测距系统以满足该标准^[8]。在满足 GGOS 标准的情况下,激光测距系统经过误差源回归分析修正,一般能够达到 $10''$ 的指向精度。

在轨道预报方面,为了满足白天激光测距以及激光测月的要求,从 2006 年 8 月起,国际激

光测距网开始使用 CPF (Consolidated Prediction Format) 星历预报^[9-10]。CPF 预报在 3 天的弧长内,预报精度一般在 10 m 的量级。CPF 预报能将目标顺利引入视场,但是对于一些低轨卫星和非球型卫星的实际轨道预报总会存在整体偏差——偏靶量。偏靶量和经纬仪的零位误差类似,仅仅依靠提高望远镜的指向精度 (RMS) 无法消除这种误差。晚上观测目标时,观测员很容易调整光尖,消除偏靶量而对准目标。而白天观测时,观测员只能靠“盲目”搜索目标。对于大量的观测任务来说,每颗星都需要花费很大精力,不仅增加了观测员的工作量,观测效率也不高。

2007 年,长春站卫星激光测距系统采用多种滤波方式降低背景噪声,成功实现了白天测距^[11-12],使长春站成为世界上最优秀的白天千赫兹卫星激光测距站之一。在多年观测经验的基础上,我们发现同一个组轨道预报的根数在短弧范围内 (1 天),时间偏差几乎是相同的,而时间偏差可以通过前面几个弧段的观测数据的残差分析得到。因此,本文提出通过修正时间偏差来提高预报精度的方法,并通过 Jason2 和 Ajisai 卫星的观测数据实验验证了该方法的可行性。

2 传统的卫星激光测距指向修正

2.1 坐标变换与大气折射修正

望远镜跟踪目标的指向预报,即卫星的轨道预报,由国际卫星激光测距服务系统提供。CPF 预报给出的是目标在地固坐标系中的位置矢量,供全球各个测站使用。在具体观测之前,各个观测站要把 CPF 预报转换到相应的测站坐标。已知测站在地固坐标的位置矢量,那么卫星在测站坐标中的位置矢量为:

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{R}_x \left\{ \frac{\pi}{2} - \varphi \right\} \mathbf{R}_z \left\{ \frac{\pi}{2} + \lambda \right\} [\mathbf{r} - \mathbf{r}_{sta}], \quad (1)$$

其中: $\boldsymbol{\rho}$ 、 \mathbf{r} 分别为卫星在测站坐标和地固坐标系

中的位置矢量, r_{sta} 为测站在地固坐标系中的位置矢量, φ, λ 为测站的大地纬度和经度, $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_z$ 分别为绕 x 轴和 z 轴的旋转矩阵。有了目标在测站坐标中的位置矢量, 就可以得到任意时刻的真方位角和真高度角。

目标的理论真高度和真方位必须转化为视方位和视高度, 也就是经过大气折射修正和观测设

备误差修正后, 才能用于实际观测^[13]。大气折射是由于地球表面的大气层密度、温度、湿度、气压等随着高程不同而发生变化, 导致原本直线前进的光或其它电磁波在穿越大气层时发生弯曲。目前, 卫星精密定轨和预报软件普遍采用 Marini&Murray(M-M)大气折射模型, 大气折射的修正模型:

$$\Delta E_{ato} = \frac{\cos E \times (6.001\ 612 \times 10^{-4} + 1.920\ 56 \times 10^{-6} (n_g - 313.0))}{\sin E + \sqrt{\sin^2 E + 0.0025284}}, \quad (2)$$

$$n_g = 80.343 f(\lambda) (P - 0.140\ 647 \times W) / T, \quad (3)$$

其中: n_g 为光波的折射率, P 为压强, T 为温度, W 为水汽成分的大气压。通过式(3)和式(2)容易得出, 白天的温度和大气压强变化对大气折射产生较大的影响, 如果其它参数不变, 温度变化 10° , 在高度角为 20° 时, 折射量变化可以达到 $6''$; 气压 W 变化 $1\ \text{kPa}$, 在高度角 20° 时, 变化量可以达到 $1 \sim 2''$ 。

2.2 地平式望远镜三轴修正

望远镜在安装调试, 以及码盘和 CCD 相机安装等过程中会引入误差, 使得光电望远镜的指向与实际方向存在误差, 即光电望远镜的静态指向误差。为了提高望远镜的指向精度, 满足白天“盲目”跟踪的要求, 需要对望远镜进行指向误差修正。而最常用的就是三轴修正模型。

望远镜经纬仪的经典误差模型由三条轴线定义而成, 俯仰电机转动的轴线为水平轴, 方位电机转动的轴线为垂直轴, 指向目标的光路中心的轴线为光轴。在测量时方位编码器的实际零位与真实零位的误差定义为定向差 A_0 , 俯仰编码器的实际零位与真实零位定义为零位差 E_0 , 照准差 α 就是指望远镜视轴线与水平轴线不正交的角度, 源自视轴不垂直度误差和视轴在水平面与铅垂面的晃动误差。

横轴差 β 为水平轴与垂直轴不垂直的偏差角度。竖轴差 γ 为垂直轴与铅垂线之间的偏差。根据三轴修正模型^[14-17], 设垂直轴偏差的方向角为 A' , 可以得到修正公式为:

$$\begin{cases} \Delta A_{axis} = \alpha \sec E + \beta \tan E + \gamma \sin(A - A') \tan E \\ \Delta E_{axis} = + \gamma \cos(A - A') \tan E \end{cases} \quad (4)$$

令: $\delta = -\gamma \cos A'$, $\varphi = \gamma \sin A'$ 则上式转化为:

$$\begin{cases} \Delta A_{axis} = \alpha \sec E + \beta \tan E - \\ \delta \tan E \sin A - \varphi \cos A \tan E. \\ \Delta E_{axis} = -\delta \cos A + \varphi \sin A \end{cases} \quad (5)$$

建立三轴指向修正模型以后, 一般通过观测恒星, 通过比对理论星图和实测星图计算望远镜的指向偏差, 然后利用最小二乘法对该模型进行拟合, 用统计分析的方法求出地平式望远镜指向模型中各待定参数。

2.3 传统方法修正精度

以长春人造卫星观测站 $60\ \text{cm}$ 激光测距望远镜所观测的 Ajisai 和 Jason2 卫星为例, 样本取 2014 年 2 月 2 日至 5 日共 8 个弧段的数据, 采用的修正参数为: $\alpha = -0.003\ 75^\circ$, $\beta = 0.003\ 13^\circ$, $\delta = 0.001\ 2^\circ$, $\varphi = 0.001\ 5^\circ$, $A_0 = 0.000\ 021^\circ$, $E_0 = 0.063\ 713^\circ$ 。对实测数据和预报数据进行统计分析, 结果如表 1 所示。表 1 中第一列为观测弧段的起始时间, 第二列为目标的名称, 第三至五列分别为方位、高度和总的脱靶量, 第六至八列分别为方位、高度和总的指向精度(RMS)。从表 1 中可以看出: 经过修正以后, 指向精度(RMS)一般在 $3 \sim 7''$, 满足白天卫星激光测距的要求($10''$)。卫星的脱靶量有时候达到 20 多个角秒, 脱靶量和零位偏差有些相似, 为整个弧段的整体偏离量, 需要通过手动调整修正。值得说明的是, 望远镜的修正参数随着温度、风速以及自身的运动姿态等参数的变化而发生微小的变化, 需要经常进行测量和更新。

表 1 传统方式的望远镜指向修正精度

Tab. 1 Pointing accuracies of conventional correction for day-time satellite laser ranging

MJD(UTC)	Satellite	$\Delta_A/(\prime\prime)$	$\Delta_E/(\prime\prime)$	$\Delta_{total}/(\prime\prime)$	$\sigma_A/(\prime\prime)$	$\sigma_E/(\prime\prime)$	$\sigma_{total}/(\prime\prime)$
56691.345665	Ajisai	-4.39	1.92	4.79	6.86	2.10	7.14
56692.389502	Ajisai	2.14	8.16	8.43	1.42	3.03	3.35
56693.270070	Ajisai	-9.23	15.38	17.94	2.62	1.83	3.20
56693.437032	Ajisai	21.73	-10.61	23.74	2.42	3.32	4.11
56691.023117	Jason2	9.92	-9.57	10.46	4.95	2.29	5.45
56692.038397	Jason2	2.44	1.84	3.06	3.52	2.07	4.08
56693.055819	Jason2	21.48	-0.29	21.49	4.82	2.70	5.54

3 白天卫星激光测距实时指向修正

3.1 白天激光光尖可视化与手动指向修正

目前,长春站在白天激光测距中,通过光谱滤波并利用激光的后向散射现象实现了激光光尖的可视化,可以在 CCD 中监视到激光束,如图 1 所示。图像显示频率为 5 Hz,激光波长为 532.0 nm。光尖可视化能固定激光束的两个自由度,即使卫星预报稍有偏差,也可以通过盲目跟踪搜索卫星,所以是白天卫星激光测距成功实现的重要前提条件。从表 1 可以看出,有时候偏靶量达到十个甚至二十多个角秒,观测员要在很大的范围内手动搜索目标,这样不但增加了观测员的工作量,而且观测效率不高。



图 1 白天卫星激光测距的激光光尖显示截图

Fig. 1 Image of laser light point of day-time satellite laser ranging

3.2 白天卫星激光测距实时指向修正原理

观测人员在长期的观测中发现,对同一个目标在相同的一段观测时期,会有相同的时间延迟量或提前量。虽然白天激光测距中目标是看不见的,但是根据目标的精确距离信息可以计算出卫星的时间偏差。利用这个时间偏差,就可以在下一圈中修正望远镜预报的指向精度。从而可以减

少观测员的搜索范围,提高观测效率。这里对一天内前几个弧段的观测值和预报值的残差进行最小二乘拟合,即有:

$$\Delta \rho_i(t) = b + \Delta \dot{\rho}_i(t) \times \tau, \quad (6)$$

其中: $\Delta \dot{\rho}_i(t)$ 为径向速度,通过统计分析求出每一个目标每一次通过的时距偏差 b 和 τ 的最大或然值。时间偏差的概念最早用来分析观测值和理论真值之间的偏差,通过观测值和预报值的残差分析可以得到实际观测值相对于预报轨道的时间偏差(τ),详细推导过程可以参考文献[18]。然后利用目标的方位角速度(\dot{A})和高度角速度(\dot{E})进行偏靶量的修正:

$$\begin{cases} \Delta A_i = \tau \times \dot{A} \\ \Delta E_i = \tau \times \dot{E} \end{cases} \quad (7)$$

轨道预报可以在几分钟之内完成,而空间目标的下一圈将在几十分钟之后才能来到。根据上几圈的观测数据分析,并结合激光回波反馈信号,可以实时修正时间偏差,对下一圈的观测预报进行指向修正。

3.3 白天实时指向修正实验验证

同样以长春人造卫星观测站 60 cm 激光测距望远镜所观测的 Ajisai 和 Jason2 卫星为例,首先,利用当天的观测数据,包括晚上的数据,计算目标的时间偏差。2014 年 2 月 2 日至 5 日期间,Ajisai 卫星的观测残差和径向速度的关系如图 2 所示。从图 2 中可以看出预报的相对精度非常高,距离偏差只有十几米。图 2 中点线的斜率也就是时间偏差,可以看出,前后几圈的预报数据点的斜率大致相同,也就是说时间偏差大致相同。

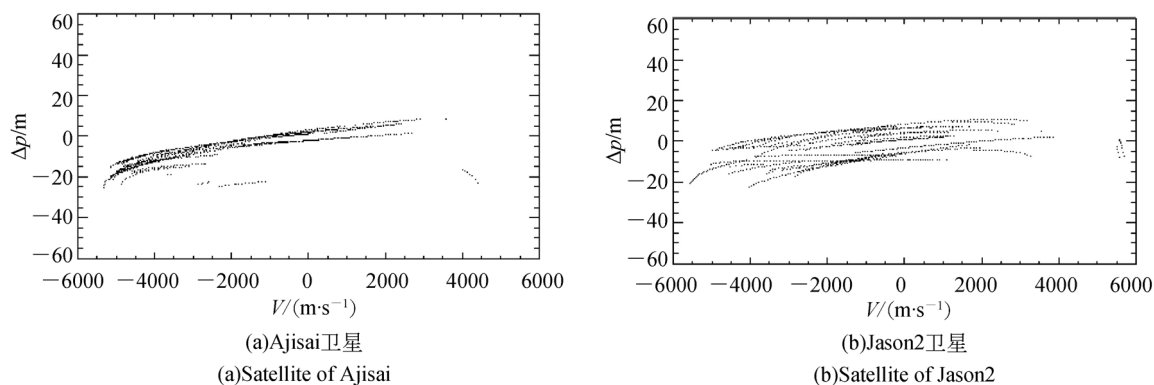


图 2 卫星的距离偏差相对于速度的分布图

Fig. 2 Ranging bias between observation and prediction as a function of velocity

经过统计分析, Ajisai 卫星的时间偏差大约为 $0.004 \sim 0.008$ s 左右。同理, Jason2 卫星的观测残差如图 2(b) 所示, 时间偏差大约在 0.003 s 左右。时间偏差仅表示观测值和预报值的相对时间不同步误差, 误差范围大约在毫秒的量级。对预报进行时间偏差修正, 对实测数据和新的预报数据

进行统计分析, 结果如表 2 所示。和表 1 类似, 表 2 中第一列为观测弧段的起始时间, 第二列为目标的名称, 第三至五列分别为方位、高度和总的脱靶量, 第六至八列为方位、高度和总的指向精度 (RMS)。对比表 1, 经过时间偏差修正后偏靶量都有不同程度的减小, 一般减小 $1 \sim 3''$, 最大达到 $8''$ 。

表 2 白天卫星激光测距望远镜实时指向修正精度

Tab. 2 Pointing accuracies of real-time correction in day-time satellite laser ranging

MJD(UTC)	Satellite	$\Delta_A / (")$	$\Delta_E / (")$	$\Delta_{total} / (")$	$\sigma_A / (")$	$\sigma_E / (")$	$\sigma_{total} / (")$
56691.345665	Ajisai	-2.35	1.72	2.91	6.82	2.10	7.14
56692.389502	Ajisai	2.56	4.74	5.38	1.42	3.02	3.34
56693.270070	Ajisai	-1.30	9.90	9.99	2.60	1.84	3.19
56693.437032	Ajisai	19.28	-13.21	23.38	2.44	3.37	4.16
56691.023117	Jason2	8.96	3.31	9.55	4.93	2.29	5.44
56692.038397	Jason2	1.40	1.68	2.19	3.52	2.02	4.06
56693.055819	Jason2	20.14	-0.14	20.14	4.81	2.75	5.54

4 结 论

本文对于长春站 60 cm 卫星激光测距系统, 采用 M-M 大气折射修正模型和经典的三轴指向修正模型, 可以使白天指向精度 (RMS) 达到 $5 \sim 10''$, 满足白天卫星激光测距的需要 ($10''$)。利用时间偏差修正白天望远镜的预报指向偏差, 可以使偏靶量减少 $1 \sim 3''$, 最多能达

$8''$ 左右。该方法能够减小偏靶量, 提高观测员的搜索效率。

白天卫星激光测距中, 太阳光照及温度变化会对测距造成很大的影响。探测器位于望远镜接收终端内, 环境温度将改变探测器的工作温度, 从而产生系统时间延迟。另外温度变化对大气折射和轴系指向修正模型也会产生较大的影响, 因此在白天激光测距时在经常校准系统偏差并结合气象参数不断地更新轨道预报。

参考文献:

- [1] 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):

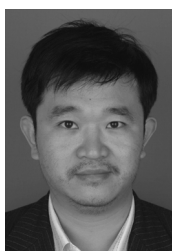
153-160.

SUN M G, LIU CH ZH, FAN C B, *et al.*. Analysis on the accuracy of celestial positioning based on the SLR precise orbit[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, 53(2):153-160. (in Chinese)

- [2] 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[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 112-117.
SUN M G, GAO P Q, SHEN M, *et al.*. Combined tracking and orbit determination for space objects using laser and optics measurements [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 112-117. (in Chinese)
- [3] 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): 197-203.
ZHANG H F, MENG W D, WU ZH B, *et al.*. One way laser ranging and its measuring experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 197-203. (in Chinese)
- [4] 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): 239-246.
CHEN J Y, CHANG X, ZHOU Y, *et al.*. Statistical analysis of received photons for lunar laser ranging system with adaptive optics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 239-246. (in Chinese)
- [5] 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): 182-189.
LI X, TANG R F, LI ZH L, *et al.*. Laser ranging data processing based on the analysis of the binary image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 182-189. (in Chinese)
- [6] 杨福民,肖焱坤,陈婉珍,等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. 中国科学(A辑), 1998, 28(11): 1048-1056.
YANG F M, XIAO ZH K, CHEN W ZH, *et al.*. Design and test result of daytime satellite laser ranging [J]. *China Science (A Part)*, 1998, 28(11): 1048-1056. (in Chinese)
- [7] 韩光宇,瞿锋,郭劲,等. 卫星激光测距中白天测距的分析与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 885-890.
HAN G Y, QU F, GUO J, *et al.*. Analysis and realization of daytime ranging of SLR [J]. *Chinese Journal Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 885-890. (in Chinese)
- [8] 党亚民,陈俊勇. GGOS和大地测量技术进展[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 131-133.
DANG Y M, CHEN J Y. Progress of GGOS and geodetic techniques [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(1): 131-133. (in Chinese)
- [9] 崔爽,郭立红,王伟国,等. 中低轨卫星高仰角时刻的轨道预测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 245-251.
CUI SH, GUO L H, WANG W G, *et al.*. Orbit forecast of medium and low orbit satellite at the time of high elevation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 245-251. (in Chinese)
- [10] 陈国平,何冰,张志斌,等. CPF星历精度分析[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2010, 31: 35-44.
CHEN G P, HE B, ZHANG ZH B, *et al.*. Analysis of CPF ephemeris' accuracy [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 2010, 31: 35-44. (in Chinese)
- [11] 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.
LIU CH ZH, ZHAO Y, FAN C B, *et al.*. Performance and observation summary of Changchun satellite laser ranging station [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(6): 406-408. (in Chinese)
- [12] LIU CH ZH, ZHAO Y, FAN C B, *et al.*. Performance and observation summary of Changchun satellite laser ranging station [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(13): 1070-1072.
- [13] 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.
LI ZH W, ZHANG T, SUN M G. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 589-599. (in Chinese)
- [14] 李振伟,杨文波,张楠. 水平式光电望远镜静态指向误差的修正[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 263-269.
LI ZH W, YANG W B, ZHANG N. Static pointing error of level mounting optoelectronic telescope [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 263-269. (in Chinese)
- [15] 孙航,张海波,曹立华,等. 大口径光电探测设备主镜晃动的误差补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 85-91.
SUN H, ZHANG H B, CAO L H, *et al.*. Error compensation for primary mirror shaking of large aperture optical detection equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 85-91. (in Chinese)
- [16] 巩岩. 利用恒星标校卫星激光测距经纬仪指向精度[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 258-260.
GONG Y. Calibration the pointing precision of

- satellite laser ranging theodolite by observing stars [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 258-260. (in Chinese)
- [17] 张滋黎, 朱涵, 周维虎. 激光跟踪仪转镜倾斜误差的标定及修正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1205-1212.
ZHANG Z L, ZHU H, ZHOU W H. Error calibration and correction of mirror tilt in laser trackers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1205-1212. (in Chinese)
- [18] 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.
FENG CH G, ZHU Y L, ZHANG F P. Determination of LAGEOS satellite' orbits and residual analysis[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2003, 44(1): 55-64. (in Chinese)

作者简介:



孙明国(1977—),男,山东夏津人,博士研究生,助理研究员,2005年于中国科学院研究生院(中科院云南天文台)获得硕士学位,主要从事卫星激光测距和空间目标精密定轨等方面的研究。E-mail: sunmg@bao. ac. cn

导师简介:



赵有(1964—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1998年于中科院电子学研究所获得博士学位,主要从事卫星激光测距、弱信号探测等方面的研究。E-mail: youzhao@nao. cas. cn