

水平式光电望远镜静态指向误差的修正

李振伟*, 杨文波, 张楠

(中国科学院国家天文台 长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117)

摘要: 为了提高水平式光电望远镜静态指向精度, 对光电望远镜静态指向修正模型进行了理论分析和实验研究, 建立了水平式望远镜指向模型。首先, 介绍了球谐函数模型和水平式望远镜指向模型, 并对水平式望远镜指向模型加以修改。然后, 对全天区均匀分布的70颗Tycho-2恒星进行实际观测, 获得水平式光电望远镜在L轴和B轴上的指向偏差, 利用最小二乘法对该模型进行拟合, 计算出水平式望远镜指向模型中各待定系数。最后, 采用该指向模型对某型水平式望远镜进行了修正。实验结果表明: 采用水平式望远镜指向模型进行修正后, 望远镜设备总指向精度由修正前的 $152.10''$ 提高到了 $4.76''$ 。满足系统总体提出的精度要求, 能够广泛地应用于科研和工程领域。

关键词: 光电望远镜; 空间碎片; 静态指向误差

中图分类号: P123.46; V556.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150802.0263

Static pointing error of level mounting optoelectronic telescope

LI Zhen-wei*, YANG Wen-bo, ZHANG Nan

(Changchun Observatory, NAO, CAS, Changchun 130033, China)

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

Abstract: In order to improve the static pointing accuracy of level mounting optoelectronic telescope, the static pointing models are presented after theoretical analysis and experimental research, and modified model for level mounting optoelectronic telescope is established. First, spherical harmonic function model and modified model for level mounting optoelectronic telescope are introduced. Then 70 stars from Tycho-2 scattered uniformly in the sky were selected to be measured, and the discrete values of the 70 stars' pointing errors were gained in longitude and latitude dimensions, respectively. Finally, the coefficients in the total pointing error model were obtained by least square fitting method. Experimental results indicate that pointing precision of level mounting optoelectronic telescope can be improved from $152.10''$ (without modified model) to $4.76''$ (with modified model). The modified model for level mounting optoelectronic telescope can satisfy the requirements in general design, which can be widely applied in science and engineering field.

Key words: optoelectronic telescope; space objects; static pointing error

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-12-13

基金项目: 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站青年探索基金资助项目 (No. 1400TS1001); 中国科学院院级科研装备研制资助项目 (No. YZ201116)

1 引言

随着人类航天活动的增加,空间环境日益恶化。空间碎片与在轨航天器之间碰撞,直接导致航天器器件损坏或者解体,对在轨航天器的正常运行构成严重威胁。此外,空间碎片再入大气层,将给人类带来不可估量的灾难。空间碎片地基观测手段主要包括雷达和光电望远镜。根据雷达距离方程,雷达的探测能力与距离的4次方成反比,而光电望远镜的探测能力与距离的2次方成反比,因此雷达对近地空间目标探测有利,而光电望远镜更有利于中高轨空间目标的探测^[1]。

从机械结构进行分类,光电望远镜主要有地平式结构、赤道式结构和水平式结构^[2-3]。由于力学优越性高、回转半径小、跟踪性能好及外场安装简单等优点,地平式光电望远镜应用广泛。赤道式结构的突出优点是天体的视运动可以很容易地利用赤经轴的匀速转动来补偿,主要应用于天文观测领域。而水平式光电望远镜在观测条件最好的天顶位置没有跟踪盲区,特别是在跟踪观测人造地球卫星和空间碎片时能够表现出良好的性能,近年来受到人们越来越多的关注^[4]。

光电望远镜在制造、安装调试,以及码盘和CCD相机安装等过程中会引入误差^[5],使得光电望远镜指向与实际方向存在误差,即光电望远镜静态指向误差。这种误差必须进行修正,以提高空间碎片的观测精度^[6-9]。

光电望远镜观测空间碎片主要在半个天球面进行,球谐函数修正模型是一种比较直观的方法。但水平式光电望远镜观测范围不含两个极区附近天区,其法方程条件比较差,因此在求解球谐函数时无法得到很好的解,其修正结果也无法达到较好的精度^[6]。此外,球谐函数修正模型参数较

多,参数间存在较大相关性,而且各个模型参数均无具体物理意义。

2 光电望远镜系统静态指向模型

2.1 球谐函数模型

采用分离变数法,所求得的球谐函数为^[4,10]:

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = P_l^m(\cos\theta) \begin{cases} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{cases}, \quad \begin{cases} l = 0, 1, 2, 3, \dots \\ m = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases}. \quad (1)$$

式中: $P_l^m(\cos\theta)$ 为 l 阶多项式,多项式导数的阶数为 m 。

函数 $f(\theta, \varphi)$ 在球面 $S(0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi)$ 的球谐函数计算方法如下:

(1)先将 $f(\theta, \varphi)$ 对变量 φ 进行傅里叶级数展开:

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} [A_m(\theta) \cos m\varphi + B_m(\theta) \sin m\varphi], \quad (2)$$

函数 $f(\theta, \varphi)$ 有自变量 θ ,傅里叶级数系数 A_m 和 B_m 均是 θ 的函数,即有:

$$\begin{cases} A_m(\theta) = \frac{1}{\pi\delta_m} \int_0^{2\pi} f(\theta, \varphi) \cos m\varphi d\varphi \\ B_m(\theta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta, \varphi) \sin m\varphi d\varphi \end{cases}, \quad (3)$$

式中, $\delta_0 = 2$,而 $\delta_m = 1 (m \neq 0)$ 。又以 $P_l^m(\cos\theta)$ 为基,将 $A_m(\theta)$ 和 $B_m(\theta)$ 在区间 $[0, \pi]$ 上进行展开,即有:

$$\begin{cases} A_m(\theta) = \sum_{l=m}^{\infty} A_l^m P_l^m(\cos\theta) \\ B_m(\theta) = \sum_{l=m}^{\infty} B_l^m P_l^m(\cos\theta) \end{cases}. \quad (4)$$

(2)将式(4)代入式(3),经过整理,可得:

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} [A_l^m \cos m\varphi + B_l^m \sin m\varphi] P_l^m(\cos\theta), \quad (5)$$

(3)将式(5)以多项式形式展开,即有:

$$f(\theta, \varphi) = a_0 + a_1 \sin\varphi + a_2 \cos\theta \cos\varphi + a_3 \sin\theta \cos\varphi + a_4 \sin^2\varphi + a_5 \cos\theta \sin\varphi \cos\varphi + a_6 \sin\theta \sin\varphi + a_7 \sin^3\varphi + a_8 \cos\theta \sin^2\varphi \cos\varphi + a_9 \sin\theta \sin^2\varphi \cos\varphi + a_{10} \sin^4\varphi + a_{11} \cos\theta \sin^3\varphi \cos\varphi + a_{13} \sin\theta \sin^3\varphi \cos\varphi, \quad (6)$$

(4)将光电望远镜的经轴转角和纬轴转角代入式(6),即可得到光电望远镜误差修正模型:

$$\begin{cases} \Delta L = f(L, B) \\ \Delta B = g(L, B) \end{cases}, \quad (7)$$

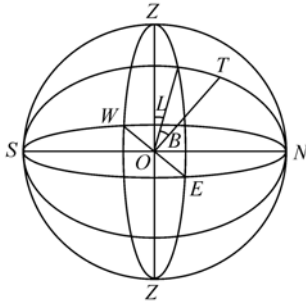


图10 水平坐标系

Fig. 10 ALT-ALT coordinate system

其中,如图1所示, L 表示经轴转角,子午圈与过天体与南北两点的大圆的二面角,西点为第一坐标的极,自子午圈向东为正,值为 $-180^\circ \sim +180^\circ$; B 表示纬轴转角,过天体做垂直于卯酉圈的大圆,第二坐标以垂足与天体之间的弧长度量,南点为第二坐标的极,自卯酉圈向北为正,向南为负,值为 $-90^\circ \sim +90^\circ$; ΔL 为经轴转角误差; ΔB 为纬轴转角误差。

由于光电望远镜指向是一种空间模型,根据正割原理,用 $\Delta L \cos B$ 代替 ΔL 即:

$$\begin{cases} \Delta L \cos B = f(L, B) \\ \Delta B = g(L, B) \end{cases}, \quad (8)$$

综上所述,光电望远镜静态指向球谐函数修正模型计算公式如式(9)和(10)所示:

$$\begin{aligned} \Delta L \cos B = & a_0 + a_1 \sin B + a_2 \cos L \cos B + a_3 \sin L \cos B + a_4 \sin^2 B + a_5 \cos L \sin B \cos B + \\ & a_6 \sin L \sin B \cos B + a_7 \sin^3 B + a_8 \cos L \sin^2 B \cos B + a_9 \sin L \sin^2 B \cos B + \\ & a_{10} \sin^4 B + a_{11} \cos L \sin^3 B \cos B + a_{12} \sin L \sin^3 B \cos B, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta B = & b_0 + b_1 \sin B + b_2 \cos L \cos B + b_3 \sin L \cos B + b_4 \sin^2 B + b_5 \cos L \sin B \cos B + \\ & b_6 \sin L \sin B \cos B + b_7 \sin^3 B + b_8 \cos L \sin^2 B \cos B + b_9 \sin L \sin^2 B \cos B + \\ & b_{10} \sin^4 B + b_{11} \cos L \sin^3 B \cos B + b_{12} \sin L \sin^3 B \cos B. \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 水平式望远镜指向模型

文献^[6]从水平式光电望远镜的具体特点和实际物理意义出发,提出了针对水平式光电望远镜指向模型,本文在此基础上对其进行了修改,导出了本文所用的水平式光电望远镜指向模型,即:

A. 零点误差:

$$\begin{cases} \Delta L = \cos B = a_0 \cos B \\ \Delta B = b_0 \end{cases}, \quad (11)$$

B. L 轴与光轴不垂直误差:

$$\begin{cases} \Delta L \cos B = dx \\ \Delta B = dy \end{cases}, \quad (12)$$

C. L 轴与 B 轴不垂直误差:

$$\Delta L \cos B = q_1 \sin B, \quad (13)$$

D. L 轴指向误差:

$$\begin{aligned} \Delta L &= q_2 \sin(L - L_0) \sin B \\ \Delta B &= q_2 \cos(L - L_0) \end{aligned}, \quad (14)$$

E. 码盘偏心误差:

$$\begin{cases} \Delta L = \frac{\varepsilon_1}{r} \sin(L - L_0) \\ \Delta B = \frac{\varepsilon_2}{r} \sin(B - B_0) \end{cases}, \quad (15)$$

将上述误差叠加后,经过整理,建立水平式光电望远镜静态指向模型^[11]:

$$\begin{aligned} \Delta L \cos B = & A_0 + A_1 \sin B + A_2 \sin L \cos B + \\ & A_3 \cos L \cos B + A_4 \sin L \sin B + \\ & A_5 \cos L \sin B + A_6 \cos B, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Delta B = & B_0 + B_1 \sin B + B_2 \cos B + \\ & B_3 \sin L + B_4 \cos L, \end{aligned} \quad (17)$$

其中,各个参数具体物理意义如表1所示。

表 1 模型参数具体物理意义

Tab.1 Physical meanings of coefficients in the model

参数	具体物理意义
ΔL	经轴转角误差
ΔB	纬轴转角误差
A_0	照准差
A_1	经纬轴垂直度误差
A_2	编码器安装偏心误差常数
A_3	编码器安装偏心误差常数
A_4	经轴水平倾斜误差
A_5	经轴南北指向误差
A_6	经轴编码器零位差
B_0	纬轴编码器零位差
B_1	编码器安装偏心误差常数
B_2	编码器安装偏心误差常数
B_3	经轴南北指向误差
B_4	经轴水平倾斜误差

本文在此基础上对其进行修改,推导出了本文所用的水平式静态指向误差修正模型,如式(18)和(19)所示:

$$\Delta L = C_0 + C_1 \tan B + C_2 \sin L + C_3 \cos L + C_4 \sin L \tan B + C_5 \cos L \tan B + C_6 \sec B, \quad (18)$$

$$\Delta B = B_0 + B_1 \sin B + B_2 \cos B + B_3 \sin L + B_4 \cos L, \quad (19)$$

3 测量实验与结果

为了验证水平式望远镜静态指向模型的修正精度,本文采用某型水平式光电望远镜系统(具体参数如表 2 所示)进行了相关实验,通过对全

表 2 光电望远镜系统具体参数

Tab.2 Parameters of the telescope system

参数	数值
口径	400 mm
焦距	600 mm
光谱范围	500 ~ 800 nm
望远镜视场	46.9' × 46.9'
CCD 图像尺寸	512 × 512
像元角分辨率	5.50"

天区均匀分布的一批恒星进行实际观测,获得一系列恒星的观测位置 L_0, B_0 , 以及由 Tycho-2 星表计算出对应时刻的理论视位置 L_c, B_c , 从而得到水平式光电望远镜在各个位置上的指向偏差 $\Delta L = L_0 - L_c$ 和 $\Delta B = B_0 - B_c$, 如图 2 和图 3 所示。

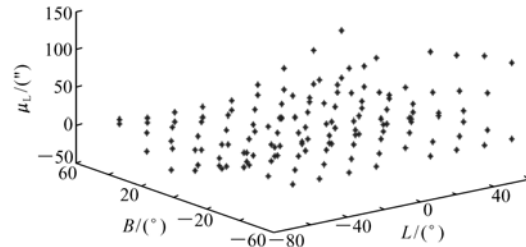


图 2 模型修正前 L 轴的残差分布图

Fig.2 Distributing of residue in L axis without modified model

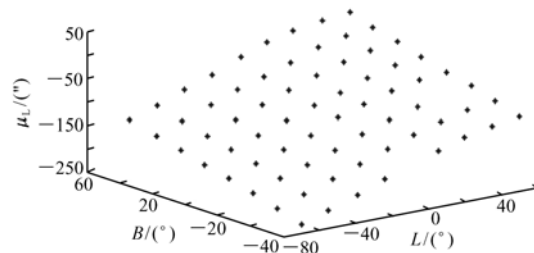


图 3 模型修正前 B 轴的残差分布图

Fig.3 Distributing of residue in B axis without modified model

L 轴、B 轴指向精度及总指向精度采用中误差计算方法,即:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_L &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{L_i})^2}{n-1}}, \\ \sigma_B &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{B_i})^2}{n-1}} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_B^2}, \quad (21)$$

水平式望远镜静态指向误差进行修正前的指向精度为:

$$\sigma_L = 84.36'', \sigma_B = 126.57'', \sigma = 152.10''$$

针对水平式光电望远镜在 L 轴和 B 轴上的指向偏差(水平式望远镜静态指向模型修正数

据),采用球谐函数模型方法进行修正,最小二乘法进行拟合,就可测定模型的各个系数,如表 3 所示,其残差分布图如图 4 和图 5 所示,水平式望远镜的静态指向精度为:

$$\sigma_L = 4.08'', \sigma_B = 2.60'', \sigma = 4.84''$$

表 3 70 颗恒星资料所确定的球谐函数模型系数
Tab.3 Coefficients in spherical harmonic function model from data of 70 stars

L axis coefficients	Result(")	B axis coefficients	Result(")
a_0	-11.649 9	b_0	-127.231 5
a_1	20.949 2	b_1	48.481 8
a_2	-10.942 9	b_2	26.385 3
a_3	7.171 0	b_3	74.376 4
a_4	90.921 9	b_4	-26.472 8
a_5	-96.630 6	b_5	1.858 0
a_6	37.067 0	b_6	4.657 0
a_7	-33.253 0	b_7	23.063 6
a_8	2.728 6	b_8	43.228 9
a_9	21.454 4	b_9	76.928 4
a_{10}	71.836 8	b_{10}	28.881 3
a_{11}	-59.037 0	b_{11}	7.876 5
a_{12}	32.231 5	b_{12}	-11.265 5

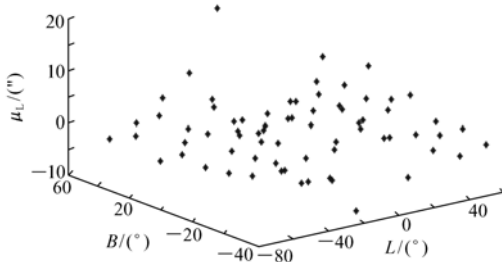


图 4 球谐函数模型修正后 L 轴的残差分布图

Fig.4 Distributing of residue in L axis with spherical harmonic function model

对于同样的一批全天区均匀分布恒星,采用水平式光电望远镜指向模型进行修正,最小二乘法进行拟合,就可测定模型的各个系数,如表 4 所示;其残差分布图如图 6 和图 7 所示,水平式望远镜的静态指向精度为:

$$\sigma_L = 3.69'', \sigma_B = 3.01'', \sigma = 4.76''$$

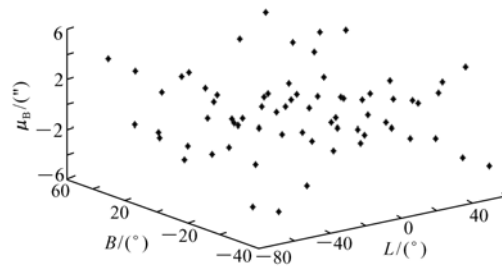


图 5 球谐函数模型修正后 B 轴的残差分布图

Fig.5 Distributing of residue in B axis with spherical harmonic function model

表 4 70 颗恒星资料所确定的水平式望远镜指向模型系数

Tab.4 Coefficients in modified model for level mounting optoelectronic telescope from data of 70 stars

L axis coefficients	Result(")	B axis coefficients	Result(")
C_0	214.459 4	B_0	-132.608 9
C_1	6.831 1	B_1	62.482 0
C_2	11.896 1	B_2	1.670 9
C_3	-8.294 3	B_3	77.591 8
C_4	36.255 3	B_4	31.054 6
C_5	-90.038 6		
C_6	-228.980 7		

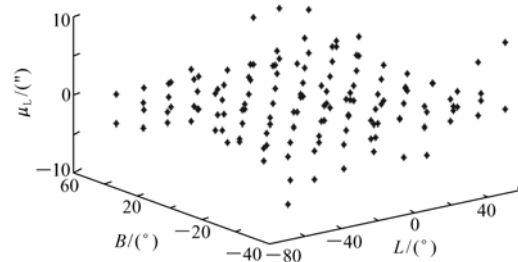


图 6 水平式望远镜指向模型修正后 L 轴的残差分布

Fig.6 Distributing of residue in L axis with modified model for level mounting optoelectronic telescope

图 2 ~ 7 直观地表达了在指向模型修正前后水平式望远镜静态指向误差的大小分布。从实验数据分析,可知:水平式光电望远镜静态指向误差

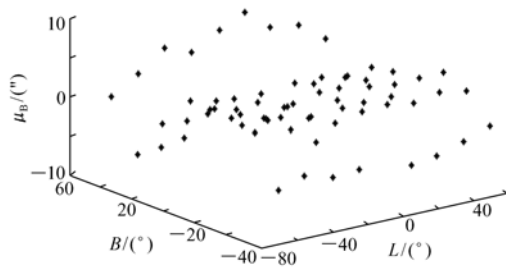


图7 水平式望远镜指向模型修正后 B 轴的残差分布

Fig.7 Distributing of residue in B axis with modified model for level mounting optoelectronic telescope

采用球谐函数和水平式望远镜指向模型进行修正,这两种模型修正精度基本相当,前者精度为 $\sigma_L = 4.08''$, $\sigma_B = 2.60''$, $\sigma = 4.84''$;后者精度为 $\sigma_L = 3.69''$, $\sigma_B = 3.01''$, $\sigma = 4.76''$ 。但与常用的球函数修正模型相比,水平式望远镜指向模型参数较少,参数间相关性较小,模型比较稳定,而且各参数具有物理意义,能够反映出水平式光电望远镜设备本身的系统差。对于水平式望远镜而言,在精度满足要求时,建议选择水平式望远镜指向模型。

参考文献:

- [1] 门涛,徐蓉,刘长海,等. 光电望远镜暗弱目标识别算法及探测能力[J]. 强激光与粒子束,2013,25(3):587-592.
MEN T, XU R, LIU CH H, *et al.*. Dark target identification algorithm and detecting ability of optoelectronic telescopes [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(3): 587-592. (in Chinese)
- [2] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [3] 高昕,王建立,唐嘉,等. 低轨微小卫星及小碎片搜索/跟踪机动式大视场光电望远镜[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 124-128.
GAO X, WANG J L, TANG J, *et al.*. Overview Mobile telescope with large FOV for searching and tracking low-orbit micro-satellites and space debris [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 124-128. (in Chinese)
- [4] 刘廷霞,王伟国,李博,等. 水平式经纬仪静态指向修正模型的比较与改进[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1374-1380.
LIU T X, WANG W G, LI B, *et al.*. Comparison and improvement of correction models for static pointing of level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1374-1380. (in Chinese)
- [5] 潘年,马文礼. 拼接式钢带光栅编码器测角误差分析与修正[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 788-794.
PAN N, MA W L. Error analysis and correction of scale tape grating encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 6(5): 788-794. (in Chinese)
- [6] 平一鼎,张晓祥,鲁春林. 65 cm 水平式望远镜静态指向模型[J]. 天文学报, 2006, 47(2): 224-230.

4 结 论

水平式光电望远镜具有天顶处无跟踪盲区的优点,广泛地应用于空间目标和碎片的常规观测任务中。由于望远镜制造、加工的安装,以及码盘和 CCD 安装等原因,望远镜存在静态指向误差,这种误差需要进行修正,以提高空间目标的观测精度。

首先,本文对天顶无跟踪盲区的水平式光电望远镜静态指向修正模型进行了理论分析。针对球谐函数模型的局限性,介绍了一种水平式望远镜指向模型,并加以修改。该模型具有参数较少,参数间相关性较小等优点,是一种简明且具有明确物理意义的修正模型,能够反映出水平式光电望远镜设备本身的系统差。

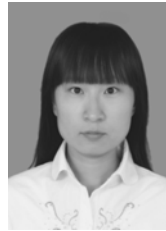
随后,本文采用某型水平式光电望远镜系统进行实际观测,验证水平式望远镜静态指向模型的修正精度,实验结果表明:采用水平式望远镜指向模型进行修正后,望远镜设备总指向精度由修正前的 $152.10''$ 提高到了 $4.76''$,满足系统总体提出的精度要求,能够广泛地应用于科研和工程领域。

- PING Y D,ZHANG X X,LU CH L. Static pointing model of 65 cm level mounting telescope[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2006,47(2):224-230. (in Chinese)
- [7] 张晓祥,吴连大. 望远镜静态指向模型的基本参数[J]. *天文学报*,2001,42(2):198-205.
ZHANG X X,WU L D. The basic parameters of telescope static point model[J]. *Acta Astronomica Sinica*,2001,42(2):198-205. (in Chinese)
- [8] 韩雪冰. 水平式望远镜测量算法研究与精度分析检测[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理所,2009.
HANG X B. Research on measuring algorithm and precision analysis detection of Alt-alt telescope [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China,2009. (in Chinese)
- [9] 薛向尧,高云国,韩光宇,等. 水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术[J]. *光学精密工程*,2011,19(7):1524-1530.
XUE X Y,GAO Y G,HAN G Y,*et al.*. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(7):1524-1530. (in Chinese)
- [10] 瞿锋,赵春梅,卫志斌. 人卫激光测距望远镜系统的指向修正[J]. *测绘科学*,2006,31(4):84-86.
QU F,ZHAO CH M,WEI ZH B. Telescope orientation correction for satellite laser range[J]. *Science of Surveying and Mapping*,2006,31(4):84-86. (in Chinese)
- [11] 韩雪冰,张景旭,王志,等. 水平式光电望远镜照准差检测方法[J]. *光电工程*,2009,36(6):63-67.
HANG X B,ZHANG J X,WANG ZH,*et al.*. Research of ALT-alt photoelectric telescope sighting error measurement [J]. *Opto-electronic Engineering*,2009,36(6):63-67. (in Chinese)

作者简介:



李振伟(1983—),男,河南安阳人,助理研究员,2005年于东北大学获得学士学位,2008年于中国科学院研究生院获得硕士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间目标光电观测技术方面的研究。E-mail:lizw@cho.ac.cn



张楠(1984—),女,辽宁锦州人,助理研究员,2007年于东北师范大学获得学士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事图像复原方面的研究。E-mail:zhangn599@163.com



杨文波(1980—),男,吉林省吉林市人,博士,助理工程师,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事自动控制、机器视觉等方面的研究。E-mail:ywbcust@sina.com