

文章编号 1004-924X(2013)02-0274-07

星敏感器和遥感相机主光轴交联角的在轨检校

魏新国^{1*}, 王清龙¹, 李 健¹, 赫华颖²

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191; 2. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要: 为了提高遥感影像产品的定位精度, 研究了星敏感器主光轴和遥感相机主光轴交联角的在轨检校方法。利用高分辨率卫星遥感影像的严格成像模型, 将改进的非直接求解模型引入到遥感相机安装误差的标定中, 提出一种对遥感相机内外方位元素进行统一检校的方法, 实现了天上姿态确定系统和遥感相机之间系统误差的精确补偿。对来自遥感卫星的整轨遥感图像进行处理, 利用最优化模型确定遥感相机和星敏感器姿态关系矩阵, 进而检校出交联角。最后, 利用单像对地目标定位原理, 对检校精度进行了验证。实验结果表明, 校正后地面点经纬度方向平面位置 RMS 误差分别为 9.31 m 和 9.28 m, 显示通过内外方位元素统一检校, 遥感图像的定位精度得到显著提高。

关键词: 星敏感器; 遥感相机; 后方交会; 交联角; 在轨校验

中图分类号: V448.22; V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0274

On-orbit calibration for cross-angle between optical axes of star sensor and remote sensing camera

WEI Xin-guo^{1*}, WANG Qing-long¹, LI Jian¹, HE Hua-ying²

(1. School of Instrument and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. China Centre for Resource Satellite Data & Application, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: wxg@buaa.edu.cn

Abstract: A calibration method for the cross-angle between the optical axis of a remote sensing camera and that of a star sensor was investigated to improve the positioning accuracy of remote sensing images. On the basis of the rigorous space resection model, the unified calibration method of interior and exterior orientation elements was proposed by introducing an improved non-direction solving model into the calibration of mounting error of the remote sensing camera. By which, the system error between attitude determining sensor and remote sensing camera was compensated accurately. In processing the remote sensing images from a satellite, the relationship matrix between remote sensing camera and star sensor attitude were determined by the optimized model, then the cross-angle was calibrated accurately. Finally, the cross-angle model was verified with the geometrical relationship of single-image targeting. After the calibration, the plane position RMS errors are 9.31 m and 9.28 m in latitude and longitude directions, respectively, which shows that the positioning accuracy of the remote sensing images have been improved greatly by the proposed method.

Key words: star sensor; remote sensing camera; space resection; cross-angle; on-orbit calibration

收稿日期: 2012-07-11; 修订日期: 2012-09-04.

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划资助项目 (No. NCET-10-0037)

1 引言

随着我国国产高分辨率遥感卫星的发展,它在国防和民用各方面发挥着越来越重要的作用^[1]。提高遥感影像的几何定位精度是高分辨率遥感卫星应用的基础,而实现高精度几何定位,首要的工作是检校和补偿高分辨率遥感卫星的系统误差。遥感卫星的系统误差包括卫星入轨后内方位元素的变化、卫星轨道和姿态的测量误差、传感器与卫星平台间的安装误差等^[2]。其中,星上各类敏感器相对于卫星平台的姿态误差对影像定位精度的影响最直接。尽管经过精确的地面标定,但是由于发射冲击和在轨空间环境的变化,遥感相机和姿态敏感器相对于卫星平台的姿态仍会发生改变。二者姿态矩阵的误差无法通过单独检校实现,但是可以通过标校遥感相机和姿态敏感器之间的旋转矩阵来实现。星敏感器作为星上姿态控制系统中姿态测量精度最高的测量部件,常用星敏感器作为卫星平台姿态的基准。因此,可用标校遥感相机和星敏感器之间的姿态关系矩阵实现系统误差的补偿,并通过遥感相机和星敏感器主光轴之间的夹角——交联角来直观反映该姿态矩阵。

交联角的检校必须通过地面控制点解算遥感相机的姿态。遥感相机的姿态获取是通过基于共线条件的严格几何模型实现的^[3-4]。严格几何模型求解可以根据依赖的数据和求解元素分为直接求解模型和非直接求解模型两类。直接求解模型完全依赖于地面控制点得到遥感相机的全部外方位元素;非直接求解模型则利用GPS提供的星历姿态信息和少量地面控制点对共线方程的严格几何模型进行求解^[5]。前一种方法由于影像方位参数之间存在很强的相关性,会造成求解方程病态,从而无法得到稳定的求解结果^[6]。非直接求解模型主要应用于遥感图像的定位^[5]。对此模型进行改进,将其姿态角元素作为未知量,在景中心时刻进行泰勒展开,并利用交联角对展开阶数进行讨论,使遥感相机的姿态完全不依赖于星上定姿系统。当今定轨技术所测定的外方位线元素总体定位精度非常高^[7-8],这使非直接求解模型的应用成为可能,但在应用该模型时,简单的几何外检校方法没有考虑模型改进和内方位元素的影响。

本文根据共线条件的严格几何模型,将改进的非直接求解模型引入到遥感相机安装误差的标定中,提出了一种遥感相机内外方位元素统一检校的方法。最后,利用某遥感卫星的遥感图像数据实现了交联角的检校,并通过地面控制点对检校结果进行了验证。

2 遥感卫星影像严格几何模型

本文根据共线方程建立的遥感相机成像的严格几何模型,建立了地心坐标系(WGS84)到遥感相机像空间坐标系的关系。像空间坐标系根据遥感图像各行元素的成像顺序,卫星航向的反方向为 y 轴方向,沿线阵CCD影像的方向为 x 轴方向建立像坐标系。由卫星位置、像坐标系和地心坐标系之间的关系可以建立遥感相机成像的严格几何模型:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{\text{CO}} \mathbf{R}_{\text{OG}} \begin{bmatrix} X - X_p \\ Y - Y_p \\ Z - Z_p \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: (x, y) 为遥感相机像主点坐标, f 为主距; \mathbf{R}_{CO} 为轨道坐标系到遥感相机坐标系的转换矩阵,实际由轨道坐标系到卫星本体坐标系和卫星本体坐标系到遥感相机坐标系的转换矩阵相乘得到; \mathbf{R}_{OG} 为轨道坐标系到卫星本体坐标系的转换矩阵; $(X, Y, Z)^T, (X_p, Y_p, Z_p)^T$ 分别为卫星位置和所选地面控制点在WGS84坐标系中的坐标; λ 为比例系数。 \mathbf{R}_{CO} 可以表示为关于航向倾角 φ ,旁向倾角 ω ,相片旋角 κ 及其时间变化率的函数。 \mathbf{R}_{OG} 可以根据卫星平台在WGS84坐标系中的位置矢量 \mathbf{r} 和速度矢量 \mathbf{v} ,由公式(2)、(3)计算得到。

$$\begin{cases} X_0 = Y_0 \times Z_0 \\ Y_0 = \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{r}}{|\mathbf{v} \times \mathbf{r}|} \\ Z_0 = -\frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_{\text{OG}} = [X_0, Y_0, Z_0]^T. \quad (3)$$

高分辨率遥感卫星在轨运行过程中,姿态扰动和轨道偏移不可避免,在采集一景图像时间较长时,会使模型误差增大;若采集图像时间较短,可以看作是一个连续平稳的过程。在一景图像中,外方位线元素 \mathbf{r} 可以根据相邻8个时间点的插值得到,外方位角元素 φ, ω, κ 可以在景中心时

刻展开为 k 阶形式:

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_0 + \varphi_1 t + \varphi_2 t^2 + \cdots + \varphi_k t^k \\ \omega = \omega_0 + \omega_1 t + \omega_2 t^2 + \cdots + \omega_k t^k \\ \kappa = \kappa_0 + \kappa_1 t + \kappa_2 t^2 + \cdots + \kappa_k t^k \end{cases} \quad (4)$$

3 星敏感器与遥感相机交联角的检校

3.1 坐标转换矩阵的校正

由于星历数据具有定位精度高的优势,可利

$$\mathbf{R}_{\text{IS}}(q_0, q_1, q_2, q_3) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 交联角在轨检校方法

已知地面控制点的像坐标 (x_i, y_i) 及其对应在地面空间坐标系中的坐标 (X_i, Y_i, Z_i) , 利用影像的列坐标 y_i 来求取其对应的星上时间码。根据星上下传的星历数据,利用星上时间码进行多项式插值求取地面控制点成像时刻卫星的位置矢量 $(X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i})$ 。假设在一景图像中,景中心时刻的外方位角元素为 $\varphi_0, \omega_0, \kappa_0$, 其对应的 k 阶变化率为 $\varphi_k, \omega_k, \kappa_k$ 。根据式(4)建立严格成像模型的构像方程:

$$\begin{cases} F_1 = x + f \frac{a_1 m + b_1 n + c_1 p}{a_3 m + b_3 n + c_3 p} = 0 \\ F_2 = y + f \frac{a_2 m + b_2 n + c_2 p}{a_3 m + b_3 n + c_3 p} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: $(m, n, p)^T = \mathbf{R}_{\text{OG}}(X - X_P, Y - Y_P, Z - Z_P)^T$ 。所选择的每个地面控制点对应的线性化误差方程式为:

$$V = \frac{\partial F}{\partial u} \Delta + L \quad (7)$$

其中: $u = [\varphi, \omega, \kappa, \cdots, \varphi_k, \omega_k, \kappa_k]^T$, Δ 为 u 的改正量, $L = [x - \bar{x}, y - \bar{y}]^T$ 。 \bar{x} 和 \bar{y} 是用各待定值代入公式(6)计算的像坐标估计值。对于多个地面控制点,利用式(7)求解得到改正值 Δ , $u + \Delta$ 即为所求。

在求解得到外方位角元素后,即可得到矩阵 \mathbf{R}_{CO} 。将 \mathbf{R}_{CO} 作为已知,利用中心投影的构像方程式建立方程:

$$\begin{bmatrix} \bar{Z} & 0 & \bar{X} \\ 0 & \bar{Z} & \bar{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ f \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

用星上下传的星历数据,内插得到成像时刻卫星的位置矢量 r 。由位置矢量 r 和速度矢量 v 的垂直关系,采用位置矢量作为基准,对速度矢量和位置矢量进行规范正交化,从而实现旋转矩阵 \mathbf{R}_{OG} 的修正。

利用低通滤波的方法去除星敏姿态四元数各分量的高频噪声。再根据式(5)所确定的旋转矩阵,可以得到星敏坐标系到地心惯性坐标系(J2000.0)下的姿态旋转矩阵 \mathbf{R}_{IS} 。

其中: $\bar{X} = a_1 m + b_1 n + c_1 p$, $\bar{Y} = a_2 m + b_2 n + c_2 p$, $\bar{Z} = a_3 m + b_3 n + c_3 p$; 垂直于 CCD 的方向坐标 $x = 0$ 。根据选择的地面控制点利用最小二乘法标定出最优的内方位元素。整个过程如下:

(1)选择多个地面控制点,利用遥感相机内参数地面标定值,代入共线方程误差式,多次迭代得到稳定的外方位角元素及其变化率,得到矩阵 \mathbf{R}_{CO} ;

(2)对应选择的每个地面控制点,利用求解得到的 \mathbf{R}_{CO} ,将遥感相机的内方位元素 x_0, y_0, f 作为未知数,利用最小二乘法求解方程组,得到标定后的遥感相机内参数;

(3)多次迭代(1)、(2)步进行优化,即可得到稳定的内方位元素和外方位角元素。

最后,再利用采集到的所有遥感图像进行整体优化,得到更稳定的最优解^[9]。

根据卫星下传的星历数据,进行星上时间码与 UTC 时间的匹配,得到星上时间码对应的 UTC 时间。地心惯性坐标系(J2000.0)到 WGS84 坐标系的转换矩阵 \mathbf{R}_{GI} 是关于 UTC 时间的矩阵,由极移矩阵、岁差矩阵、章动矩阵和自转矩阵构成^[10]。因此,由式(9)可得遥感相机在地心惯性系(J2000.0)下的姿态矩阵 \mathbf{R}_{IC} 。

$$\mathbf{R}_{\text{IC}} = (\mathbf{R}_{\text{CO}} \mathbf{R}_{\text{OG}} \mathbf{R}_{\text{GI}})^T \quad (9)$$

由星敏感器下传的姿态四元数所对应的的时间码,利用插值拟合的方法可以得到星敏感器在地面控制点成像时刻的姿态四元数,分别利用式(9)和式(5)得到遥感相机相对于 J2000.0 坐标系的

姿态矩阵 R_{IC} 和星传感器姿态矩阵 R_{IS} , 再由:

$$R_{SC} = R_{IS}^T R_{IC}, \quad (10)$$

得到星传感器和遥感相机间的姿态关系矩阵 R_{SC} 。

对每个地面控制点, 都可以求解得到对应成像时刻的星传感器与遥感相机姿态关系矩阵 R_{SC}^i 。建立最优化目标方程(11), 使 Δ 最小, 得到最优的 R_{SC} 。

$$\Delta = (R_{SC} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{SC}^i) + \lambda (E - R_{SC}^T \cdot R_{SC}), \quad (11)$$

其中: E 为 3 阶单位阵, λ 为最优化比例因子, n 为所选的地面控制点的组数。

设 $R_{SC} = (r_1, r_2, r_3)$, r_3 是遥感相机主光轴在星传感器坐标系下的坐标, 星传感器主光轴在星传感器坐标系下的坐标为 $z = (0, 0, 1)^T$, 则交联角 $CrossAngle$ 可以表示为:

$$CrossAngle = \arccos(z \cdot r_3). \quad (12)$$

整体的算法求解过程如图 1 所示。

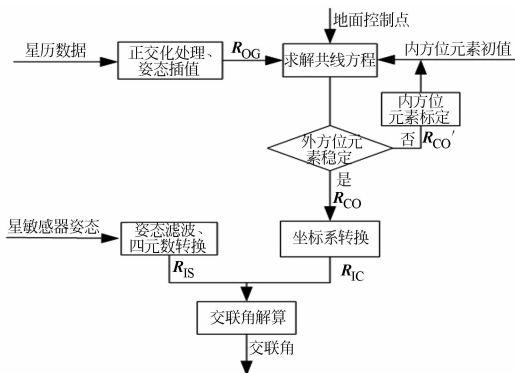


图 1 交联角检校算法流程图

Fig. 1 Flowchart of cross-angle calibration algorithm

3.3 交联角检校精度验证方法

根据单像空间对地目标定位原理, 求取成像光线与地球椭球面的交点。图 2 示意了成像光线与椭球面的交点的几何关系, O_1 为卫星位置, O_2 为地心, P 为地面控制点的位置。

假设像空间向量为 V_{img} , WGS84 物空间向量为 V_{wgs} , 那么物空间向量与像空间向量的关系为:

$$V_{wgs} = a \cdot R_{GI} R_{IS} R_{SC} \cdot V_{img}, \quad (13)$$

其中: a 为比例因子。根据式(13)得到 P 点在 WGS84 坐标系中的经纬度, 用以验证交联角的检校精度。

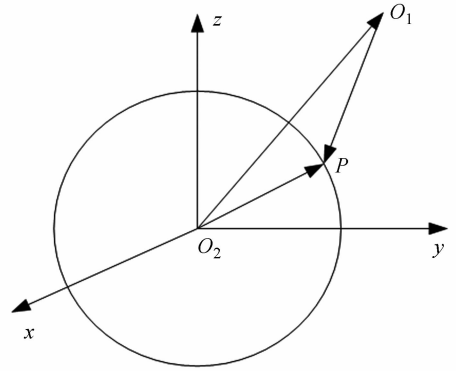


图 2 遥感卫星成像示意图

Fig. 2 Imaging model of remote sensing satellite

4 实验结果及分析

实验采用某遥感卫星下传的第 X 轨和第 Y 轨的星历数据、姿态数据和遥感图像数据, X 轨和 Y 轨相隔 11 天。其中, 遥感卫星在距地 505.984 km 的太阳同步轨道上飞行; 实验所用的星载遥感相机分辨率优于 2.5 m; 星传感器的精度水平优于 $5'' (3\sigma)$ 。在卫星 X 轨和 Y 轨下传的 4 景遥感图像 ($24\ 530\ \text{pixel} \times 24\ 575\ \text{pixel}$) 中, 每景图像选择 20 个地面控制点进行实验。

首先式(4)中的 k 取 1, 对于 X, Y 轨的 4 景遥感图像中选择的 80 个地面控制点, 每个地面控制点都可以得到一个遥感相机与星传感器之间的姿态关系矩阵, 对每景图像利用式(11)建立最优化目标方程, 求解得到优化后的 R_{SC} :

$$R_{SC} = \begin{bmatrix} 0.439\ 96 & 0.361\ 14 & 0.822\ 20 \\ -0.046\ 71 & -0.905\ 13 & 0.422\ 56 \\ 0.896\ 80 & -0.224\ 31 & -0.381\ 35 \end{bmatrix}.$$

在得到姿态关系矩阵的同时, 检校星传感器和遥感相机之间的交联角, 输出结果如图 3 所示。交联角均值 $\mu = 112.417\ 1^\circ$, 标准偏差 $\sigma = 3.772''$ 。

4.1 遥感相机姿态模型验证

在上述求解过程中, 利用交联角对式(4)中 k 的取值做了定量分析。在姿态平稳的条件下, k 取 1, 2, 3 均能满足遥感相机成像严格几何模型的要求。

由图 4 可以推断: 在将外方位角元素作为未知数的情况下, 不同展开阶数对交联角求解的影响很小, 最大差值为 $4.62 \times 10^{-4} (^\circ) \approx 1.66''$ 。因此, 对遥感相机外方位角元素一阶展开即可满足检校要求。

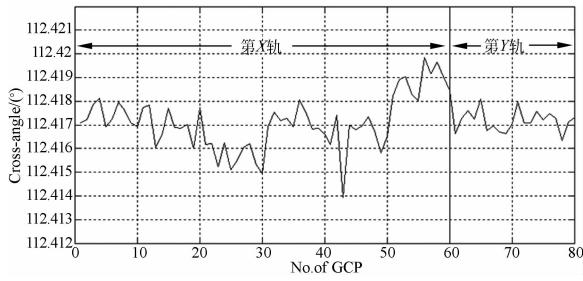


图 3 交联角检校结果

Fig. 3 Results of cross-angle calibration

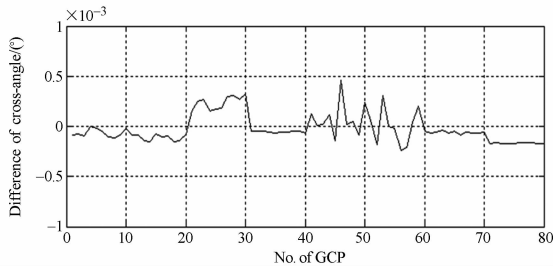


图 4 一、二阶展开的交联角差值

Fig. 4 Difference of cross-angle for 1-order and 2-order Taylor expansions

4.2 交联角检校精度验证

检校出的交联角是一个相对值,在验证遥感相机与星传感器的姿态关系矩阵时要通过已知的确定信息对其进行验证。所以,在 X 轨另外一景遥感图像中,选取 20 个地面验证点,根据 3.3 节提出的验证方法,利用公式(13)计算值与真值之间的经纬度方向的位置偏差来表征交联角和姿态关系矩阵 R_{sc} 的检校精度。为了更好地对比交联角检校的效果,这里分别对以下 3 种情况进行了比较:(1)未经交联角检校;(2)简单几何外检校,即仅检校外参数而不考虑遥感相机的内参数;(3)内外方位元素统一检校,即本文所提出的方法。3 种情况的验证结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,未经交联角检校的地面验证点的求解值与真值之间有较大的系统偏差;利用简单几何外检校的方法使该系统偏差明显减小,经度和纬度方向的 RMS 偏差分别为 23.27 m 和 47.31 m;经过内外方位元素统一检校方法对该系统偏差进行补偿后,在经度和纬度方向定位精度的 RMS 误差分别为 9.31 m 和 9.28 m。由此可见,通过内外方位元素统一检校,遥感图像的定位精度得到了显著提高。

表 1 交联角检校后地面验证点平面误差

Tab. 1 GCP horizontal errors after cross-angle calibration (m)

序号	未经交联角检校 偏差		简单几何外检 校偏差		内外方位元素 统一检校偏差	
	纬度	经度	纬度	经度	纬度	经度
	方向	方向	方向	方向	方向	方向
1	436.31	646.29	0.37	-13.52	5.96	6.84
2	429.77	561.72	-14.95	-8.75	-7.11	14.72
3	429.71	548.40	-17.60	-9.17	-11.31	9.76
4	418.02	560.69	-17.93	-64.91	11.03	12.25
5	400.55	510.72	-49.66	-98.71	-7.17	2.74
6	425.01	635.45	-14.62	-41.87	3.19	13.62
7	432.68	612.72	-10.62	-27.17	-5.12	-8.19
8	430.19	591.06	-3.43	-44.60	11.32	-0.91
9	433.77	549.78	-4.67	-26.74	2.10	-6.27
10	415.31	501.13	-29.28	-50.86	-2.74	12.62
11	419.72	624.98	-29.18	-44.38	-10.53	12.57
12	428.65	632.45	-4.40	-40.63	12.94	13.26
13	419.84	618.98	-30.03	-53.86	-12.16	0.66
14	420.94	582.14	-27.07	-53.01	-9.68	-2.87
15	433.29	636.61	-2.51	-18.65	7.04	12.90
16	399.53	450.06	-52.12	-80.99	-9.49	8.27
17	429.33	612.86	-21.14	-21.66	-15.97	-3.66
18	429.13	610.32	-17.19	-30.89	-9.09	-4.61
19	433.66	563.09	-2.29	-17.68	6.19	7.61
20	417.82	556.01	-17.77	-68.58	11.65	9.22
RMS	424.28	582.49	23.27	47.31	9.31	9.28

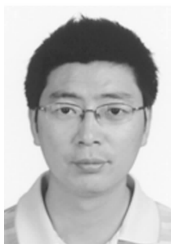
5 结 论

本文充分利用定义的交联角以及内方位元素和外方位角元素的统一检校,实现了遥感相机与星传感器间姿态关系矩阵的精确补偿。内外方位元素统一检校的方法,充分利用卫星定位精度高的优势,对非直接求解模型进行了改进;同时,将简单几何外检校过程中作为固定值的内方位元素考虑到求解过程中,增加了求解方法的精确性;最后在对每一景图像进行最小二乘平差模型求解的同时,对多景图像进行整体优化,得到了最优化的目标结果。实验表明:一阶展开遥感相机姿态角元素即可符合精度要求;经过对内外方位元素的统一检校,可以利用较少的地面控制点,得到的交联角精度水平在 $3.772''(1\sigma)$ 。最后利用地面验证点进行验证,得到的经度方向偏差和纬度方向偏差的 RMS 分别为 9.31 m 和 9.28 m。

参考文献:

- [1] 李文华,李石华,伍红玲.无轨道参数高分辨率卫星影像高精度几何纠正[J].测绘科学,2009,34(增刊):110-112.
LI W H, LI SH H, WU H L. High resolution satellite imagery precise rectification without orbit parameters [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009,34(Supp.):110-112. (in Chinese)
- [2] 祝小勇,张过,唐新明,等.资源一号02B卫星影像几何外检校研究及应用[J].地理与地理信息科学,2009,25(3):16-18.
ZHU X Y, ZHANG G, TANG X M, *et al.*. Research and application of CBRS02B image geometric exterior calibration [J]. *Geography and GEO-Information Science*, 2009,25(3):16-18. (in Chinese)
- [3] TAEJUNG K, AN D. Analysis of sensor model accuracy on estimating exterior orientation parameters of satellite images [J]. *IEEE International Geo-Science and Remote Sensing Symposium*, 2005,1-8:1165-1168.
- [4] MATTIA C, FRANCESCA F, FRANCESCA G, *et al.*. A new rigorous model for high-resolution satellite imagery orientation: application to EROS A and QuickBird [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012,33(8):2321-2354.
- [5] POLI D. General model for airborne and spaceborne linear array sensors[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 34 (B1):177-182.
- [6] 张剑清,张祖勳.高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2002,27(6):555.
ZHANG J Q, ZHANG Z X. Strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information Science Version)*, 2002, 27(6):555. (in Chinese)
- [7] 袁修孝,余俊鹏.高分辨率卫星遥感影像的姿态角常差检校[J].测绘学报,2008,37(1):36-39.
YUAN X X, YU J P. Calibration of constant angular error for high resolution remotely sensed imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008,37(1):36-39. (in Chinese)
- [8] 刘洋,易东云,王正明.地心惯性系到质心轨道坐标系的坐标转换方法[J].航天控制,2007,25(2):7-8.
LIU Y, YI D Y, WANG ZH M. Coordinate transformation methods from the inertial system to the centroid orbit system [J]. *Aerospace Control*, 2007, 25(2):7-8. (in Chinese)
- [9] 魏新国,张广军,樊巧云,等.基于RAC约束的星敏感器在轨校准方法[J].光学精密工程,2008,16(10):2009-2011.
WEI X G, ZHANG G J, FAN Q Y, *et al.*. On-orbit calibration of star sensor based on radial alignment constraint [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):2009-2011. (in Chinese)
- [10] KAPLAN G H, HUGHES J A. Mean and apparent place computations in the new IAU system [J]. *The Astronomical Journal*, 1989, 97(4):1202-1209.

作者简介:



魏新国(1977—),男,湖北随州人,博士,副教授,于2004年于北京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为光电精密测量、天体敏感器及天文导航。
E-mail: wxg@buaa.edu.cn



王清龙(1987—),男,山东日照人,硕士生研究生,主要研究方向为天体敏感器。
E-mail: qinglongself@163.com



李 健(1986—),男,山西长治人,博士研究生,研究方向为天体敏感器。E-mail:lijian_0355@163.com



赫华颖(1981—),北京人,硕士,工程师,2008年毕业于中国空间技术研究院,主要研究方向为遥感图像处理。E-mail:hehuaying@spacechina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)

《发 光 学 报》

——EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号
《发光学报》编辑部
邮 编:130033
电 话:(0431)86176862, 84613407
E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4
国际标准刊号: ISSN 1000-7032
国内邮发代号: 12-312
国外发行代号: 4863BM
<http://www.fgxb.org>