

光学学报

基于统一验证场法的国产高分辨率卫星影像 几何定位精度评估

李傲¹, 唐新明^{1,2*}, 祝小勇^{2**}

¹ 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266510;

² 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048

摘要 为衡量国产主流 2 m 分辨率光学卫星的几何定位精度, 本文在有理多项式(RPC)模型与区域网平差的基础上, 针对不同卫星在不同地区表现出的几何定位精度的差异, 提出了一种利用相同控制基准测评多星几何定位精度的方法。以河北省沽源县平坦地区作为控制区域, 采用高分一号系列卫星(GF1、GF1-B、GF1-C、GF1-D)、资源三号系列卫星(ZY3-1、ZY3-2)以及天绘一号卫星(TH-1)的多幅不同高分辨率卫星影像进行单景与立体影像几何精度的评估试验。研究表明: 在无控制点条件下, 高分一号系列卫星单景影像的平面精度大都优于 42 m; TH-1 单景影像的平面精度约为 6.36 m; ZY3-1 立体影像的精度较高, 平面精度约为 11.29 m, 高程精度约为 3.43 m。在有控制点条件下, 高分一号系列卫星单景影像的平面精度均优于 13.3 m, ZY3-1、ZY3-2 和 TH-1 单景影像的平面精度均优于 5.46 m, ZY3-1、ZY3-2 立体影像的平面精度分别约为 4.01 m 和 4.29 m, 高程精度分别约为 1.71 m 和 1.61 m。本文方法对多颗高分辨率国产光学卫星几何定位精度的评估是合理可行的。

关键词 遥感; 传感器; 国产高分辨率卫星; 有理多项式模型; 区域网平差; 几何定位精度评估

中图分类号 P236

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0328001

Geometric Positioning Accuracy Evaluation of Domestic High-Resolution Satellite Images Based on Unified Verification Field Method

Li Ao¹, Tang Xinming^{1,2*}, Zhu Xiaoyong^{2**}

¹ College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China;

² Land Satellites Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China

Abstract There are differences in the geometric positioning accuracy of the domestic mainstream optical satellites with 2 m spatial resolution in different areas. For this reason, based on a rational polynomial coefficients (RPC) model and block adjustment, we proposed a method to test the geometric positioning accuracy of multiple satellites through the same control benchmark. Specifically, taking the Guyuan flat area in Hebei Province as the control area, we evaluated and tested the geometric positioning accuracy of high-resolution single-scene and stereo images from the GF1 series satellites (GF1, GF1-B, GF1-C, and GF1-D), the Ziyuan-3 series satellites (ZY3-1 and ZY3-2), and the Tianhui-1 satellite (TH-1). The research results are shown as follows: (1) Without considering the ground control points, the plane errors of single-scene images from the GF1 series satellites and TH-1 are mostly better than 4.2 m and about 6.36 m, respectively, while the accuracy of stereo images from ZY3-1 is high, with the plane and elevation errors being respectively 11.29 m and 3.5 m or so. (2) Considering the ground control points, all the plane errors of single-scene images from the GF1 series satellites are better than 13.3 m, and those from ZY3-1, ZY3-2, and TH-1 are better than 5.46 m, while for the stereo images of ZY3-1 and ZY3-2, the plane

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-09-02; 录用日期: 2020-09-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504903, 2016YFB0501402)

* E-mail: tangxinming99@qq.com; ** E-mail: zhuxytop@163.com

error is about 4.01 m and 4.29 m, and the elevation error is about 1.71 m and 1.61 m, respectively. It follows that the proposed method is reasonable and feasible to evaluate the geometric positioning accuracy of several high-resolution domestic optical satellites.

Key words remote sensing; sensors; domestic high-resolution satellite; rational polynomial coefficients model; block adjustment; geometric positioning accuracy evaluation

OCIS codes 010.0280; 040.5190; 040.1520

1 引言

近年来,中国的高分辨率光学遥感卫星发展迅速,不断发射的高分(GF)系列和资源(ZY3)系列遥感卫星(参见 <http://www.lasac.cn/chwx/zrzyzgwx/ywx/index.html>),使我国自主获取高分辨率遥感光学卫星数据的能力大幅提升^[1]。随着国内光学遥感卫星的蓬勃发展,国产高分辨率卫星影像几何精度的评估越来越受到业界关注。卫星影像的几何定位精度不仅取决于卫星影像直接测量的精度,还取决于事后地面检校与精度验证等工作补偿卫星影像的误差^[2-4]。要提高国产光学卫星几何定位的精度,评估工作至关重要。

国内外许多研究机构与专家学者针对卫星传感器几何精度验证进行了广泛的研究。国外商业遥感卫星起步较早。Agugiaro 等^[5]利用特兰托几何检校场控制数据和高精度航空 LiDAR-DSM 数据对 GeoEye-1 和 WorldView-2 影像几何定位的精度进行了分析与评估,分析结果表明,无控平面的精度达到了 3.5 m; de Lussy 等^[6]针对 SPOT 卫星后续星 Pleiades-1 与 Pleiades-2 进行了几何定位精度的验证,根据全球 20 多个精度验证场对卫星成像模型进行修正,最终得出无控制地面点定位精度优于 3 m; 张力等^[7]将法国 SPOT-5 HRS 长条带立体影像应用于我国西部 1:50000 比例尺地形图空白区测图工程中,根据在宝鸡地区均匀测得的外业 GPS 控制点,对 SPOT 影像的测图精度进行了分析与研究; 李德仁^[8]利用河南嵩山定标场对我国第一颗民用立体测绘卫星(资源三号卫星)影像进行了在轨几何定标,并针对其测图能力进行了评估与验证,评估结果表明影像满足 1:50000 的测图精度要求。在没有地面精度验证场的基础上,王涛等^[9]提出运用数字实验场来进行国产测绘卫星影像定位精度的评估,他们采用国外高精度 WorldView 影像产品作为控制数据,分别对资源三号与天绘一号卫星影像定位的精度进行了评估与优化; 韩杰等^[10]在北京与莱州地区,采用高分一号与资源三号卫星影像进行了多星联合定位试验,并对定位精度进行了评估与验证。

上述研究工作分别在有无地面检校场条件下,对不同卫星影像的几何定位精度进行了评价,取得了有意义的结果。然而,在有地面检校场的基础上,大部分人只研究了单颗卫星的几何定位精度; 在无地面检校场的条件下,利用其他地理信息数据验证得到的卫星几何定位精度因误差累积并不十分准确。在大多数研究中,每颗卫星的评估区域和评估方法都是不同的,而且每颗卫星的几何定位精度只能通过相关论文、报告进行比较。因此,如何针对多颗高分辨率国产光学卫星进行几何精度差异性分析,是本文试验的关键。

本文根据同区域同方法验证的思想,通过建立统一的几何精度验证区域,采用统一的精度评估方法进行多颗相近分辨率国产光学卫星影像评估试验。利用有理多项式(RPC)模型条件下的像方仿射变换与光束法区域网平差方法,分别对国内现有全色 2 m 分辨率的相同或相近的卫星影像数据进行单景与立体影像几何精度试验,验证各影像的几何定位精度,并分析定位精度的差异。

2 数据与方法

2.1 试验区域与试验数据

选取中国河北省沽源县附近 1550 km² 的范围作为试验区域。沽源测区位于河北省西北部坝上地区,东经 115.49°~115.81°,北纬 41.59°~41.87°,地处内蒙古高原南缘,属温带大陆性草原气候,全年多晴天,少云。测区地势较平坦,少山地,高程起伏为 1350~1450 m。

试验影像选取覆盖试验区域且云量少于 5% 的 7 景传感器校正影像,7 景卫星影像分别为 GF1、GF1-B、GF1-C、GF1-D、TH-1、ZY3-1 和 ZY3-2 卫星影像,其中资源三号卫星每景影像均包含前、正、后三线阵全色影像。影像生产过程中采用地面后处理的高精度定姿和定轨数据。卫星影像分布与控制点分布如图 1 所示。

在试验地区范围内选取的控制点(GCP)大部分为道路交叉口,少量为地物转角处。控制点坐标为 GPS-RTK 现场测量得到,精度在 0.1 m 左右。像

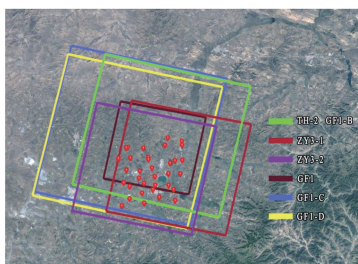


图 1 多幅国产高分辨率卫星影像与控制点分布图
Fig. 1 Multiple domestic high-resolution satellite images and control point distribution map

点坐标获取方式为人工像点量测,精度约为 0.5 pixel。

本文利用获取的国产光学卫星传感器校正产品进行单景影像几何平面定位精度试验和立体影像几何立体定位精度试验。表 1 为国产卫星的基本参数与试验影像信息。国产卫星的基本参数包括卫星名称、发射时间、地面分辨率以及幅宽,试验影像信息包括影像采集时间以及控制点个数。表 1 中,PAN 表示全色影像,MS 表示多光谱影像。

表 1 国产卫星的基本参数及试验影像信息

Table 1 Basic parameters and test image information of domestic satellites (PAN: panchromatic image; MS: multispectral image)

Satellite	Launching year	Orbit height /km	Spatial resolution /m	Width of image /km	Imaging time	Number of GCP
ZY3-1	2012	505	2.1(PAN) 5.8(MS)	50	2019-09-27	32
ZY3-2	2016	505	2.1(PAN) 5.8(MS)	50	2017-09-22	32
GF1	2013	645	2(PAN) 8(MS)	60	2018-12-07	22
GF1-B	2018	645	2(PAN) 8(MS)	60	2018-11-01	29
GF1-C	2018	645	2(PAN) 8(MS)	60	2019-10-12	30
GF1-D	2018	645	2(PAN) 8(MS)	60	2018-10-02	26
TH-1	2012	505	2(PAN) 8(MS)	60	2018-09-16	28

2.2 模型与方法

2.2.1 RPC 模型及变换

RPC 模型是一种有理多项式模型,也是一种广义通用的遥感卫星传感器成像几何模型,其优点在于直接使用了数学函数中的比值多项式,将地面点坐标与其对应的像点坐标建立联系,从而实现相互转换。已有试验和研究表明,RPC 模型的拟合精度

很高,可以代替严格的卫星成像几何模型^[11]。比值多项式的定义为

$$\begin{cases} y = \frac{N_L(P, L, H)}{D_L(P, L, H)} \\ x = \frac{N_S(P, L, H)}{D_S(P, L, H)} \end{cases}, \quad (1)$$

其中,

$$N_L(P, L, H) = a_1 + a_2L + a_3P + a_4H + a_5LP + a_6LH + a_7PH + a_8L^2 + a_9P^2 + a_{10}H^2 + a_{11}PLH + a_{12}L^3 + a_{13}LP^2 + a_{14}LH^2 + a_{15}L^2P + a_{16}P^3 + a_{17}PH^2 + a_{18}L^2H + a_{19}P^2H + a_{20}H^3, \quad (2)$$

$$D_L(P, L, H) = b_1 + b_2L + b_3P + b_4H + b_5LP + b_6LH + b_7PH + b_8L^2 + b_9P^2 + b_{10}H^2 + b_{11}PLH + b_{12}L^3 + b_{13}LP^2 + b_{14}LH^2 + b_{15}L^2P + b_{16}P^3 + b_{17}PH^2 + b_{18}L^2H + b_{19}P^2H + b_{20}H^3, \quad (3)$$

$$N_S(P, L, H) = c_1 + c_2L + c_3P + c_4H + c_5LP + c_6LH + c_7PH + c_8L^2 + c_9P^2 + c_{10}H^2 + c_{11}PLH + c_{12}L^3 + c_{13}LP^2 + c_{14}LH^2 + c_{15}L^2P + c_{16}P^3 + c_{17}PH^2 + c_{18}L^2H + c_{19}P^2H + c_{20}H^3, \quad (4)$$

$$D_S(P, L, H) = d_1 + d_2L + d_3P + d_4H + d_5LP + d_6LH + d_7PH + d_8L^2 + d_9P^2 + d_{10}H^2 + d_{11}PLH + d_{12}L^3 + d_{13}LP^2 + d_{14}LH^2 + d_{15}L^2P + d_{16}P^3 + d_{17}PH^2 + d_{18}L^2H + d_{19}P^2H + d_{20}H^3, \quad (5)$$

式中: $a_i, b_i, c_i, d_i (i=1, 2, 3, \dots, 20)$ 为 RPC 模型系数; (P, L, H) 为标准化之后的地面点坐标; (x, y) 为标准化之后的像点坐标。地面点坐标与像点坐标均可基于 RPC 模型进行转换。

2.2.2 基于像方仿射变换的区域网平差

RPC 模型通常采用地面无关的模式进行求解, 所以会存在一定的系统误差^[2,12]。由于 RPC 模型的参数不含有任何物理意义, 因此无法通过误差来源对其进行改正。像方补偿方案被广泛应用于该误差补偿中, 本文采用该方案消除单景影像 RPC 模型的系统误差。

基于像方仿射变换的 RPC 模型区域网平差以单景影像作为平差单元, 将像点坐标作为观测值, 整

体求解各影像的系统误差改正参数, 其误差方程建立在严密的光束法区域网平差理论的基础上。研究表明, 像方仿射变换能够较好地消除 RPC 模型的系统误差, 恢复真实的摄影光束^[13-14]。

本文采用的 RPC 模型区域网平差数学模型, 即像方仿射变换公式^[11]为

$$\begin{cases} F(x) = e_1 + e_2 \times s + e_3 \times l + s - x = 0 \\ F(y) = f_1 + f_2 \times s + f_3 \times l + l - y = 0 \end{cases}, (6)$$

式中: x 和 y 为量测的像点坐标; s 和 l 是用 RPC 模型计算的像点坐标值; e_1, f_1 为偏移系数; e_2, f_2 为列方向的变换系数; e_3, f_3 为行方向的变换系数。

将(1)式代入(6)式, 并对其进行线性化, 可得每个连接点的线性方程为

$$\begin{cases} v_x = \frac{\partial F(x)}{\partial e_1} \Delta e_1 + \frac{\partial F(x)}{\partial e_2} \Delta e_2 + \frac{\partial F(x)}{\partial e_3} \Delta e_3 + \frac{\partial F(x)}{\partial f_1} \Delta f_1 + \frac{\partial F(x)}{\partial f_2} \Delta f_2 + \frac{\partial F(x)}{\partial f_3} \Delta f_3 + \frac{\partial F(x)}{\partial D_{lat}} \Delta D_{lat} + \\ \frac{\partial F(x)}{\partial D_{lon}} \Delta D_{lon} + \frac{\partial F(x)}{\partial D_{hei}} \Delta D_{hei} + F(x_0) \\ v_y = \frac{\partial F(y)}{\partial e_1} \Delta e_1 + \frac{\partial F(y)}{\partial e_2} \Delta e_2 + \frac{\partial F(y)}{\partial e_3} \Delta e_3 + \frac{\partial F(y)}{\partial f_1} \Delta f_1 + \frac{\partial F(y)}{\partial f_2} \Delta f_2 + \frac{\partial F(y)}{\partial f_3} \Delta f_3 + \frac{\partial F(y)}{\partial D_{lat}} \Delta D_{lat} + \\ \frac{\partial F(y)}{\partial D_{lon}} \Delta D_{lon} + \frac{\partial F(y)}{\partial D_{hei}} \Delta D_{hei} + F(y_0) \end{cases}, (7)$$

式中: $D_{lat}, D_{lon}, D_{hei}$ 分别为地面坐标的标准化参数。

由(7)式可建立误差方程

$$v = Bt + Ax - l, (8)$$

其中,

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial a_1} & \frac{\partial F_x}{\partial a_2} & \frac{\partial F_x}{\partial a_3} & \frac{\partial F_x}{\partial b_1} & \frac{\partial F_x}{\partial b_2} & \frac{\partial F_x}{\partial b_3} \\ \frac{\partial F_y}{\partial a_1} & \frac{\partial F_y}{\partial a_2} & \frac{\partial F_y}{\partial a_3} & \frac{\partial F_y}{\partial b_1} & \frac{\partial F_y}{\partial b_2} & \frac{\partial F_y}{\partial b_3} \end{bmatrix}, (9)$$

$$t = [\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3, \Delta a_4, \Delta a_5, \Delta a_6]^T, (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial D_{lat}} & \frac{\partial F_x}{\partial D_{lon}} & \frac{\partial F_x}{\partial D_{hei}} \\ \frac{\partial F_y}{\partial D_{lat}} & \frac{\partial F_y}{\partial D_{lon}} & \frac{\partial F_y}{\partial D_{hei}} \end{bmatrix}, (11)$$

$$x = [\Delta D_{lat}, \Delta D_{lon}, \Delta D_{hei}]^T, (12)$$

$$l = \begin{bmatrix} -F(x_0) \\ -F(y_0) \end{bmatrix}. (13)$$

基于(8)式所示的误差方程, 利用最小二乘平差原理计算地面坐标改正数与像方仿射变换系数。在计算过程中, 消除一类地面坐标改正数, 仅保留像方

仿射变换系数。

2.3 误差评定方法

本文采用均方根误差(RMSE)作为卫星影像平面定位精度的衡量指标。平面定位精度中均方根误差的计算公式为

$$\begin{cases} \alpha_{RMSE,x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n}} \\ \alpha_{RMSE,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \\ \alpha_{RMSE,xy} = \sqrt{\alpha_{RMSE,x}^2 + \alpha_{RMSE,y}^2} \end{cases}, (14)$$

式中: n 为检查点的个数; (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 为检查点 i 的真实地理坐标; (x_i, y_i) 为从待检测影像上获取的坐标; $\alpha_{RMSE,x}, \alpha_{RMSE,y}$ 分别为 x 方向和 y 方向的定位中误差。

3 结果与分析

3.1 单景影像的几何平面定位精度试验

针对单景国产卫星影像进行无控制点和有控制

点条件下的精度评价。首先采用 RPC 模型将人工野外测量的 GPS 点进行计算,得出像方坐标,然后将其与人工量测的控制点像方坐标作差,得出无控制点条件下单景影像的几何定位精度。再采用 5 个控制点、

其余为检查点(CIP)的平差方式,根据像方仿射变换模型,改正影像存在的系统误差,得出有控制点条件下单景影像的几何定位精度。最后,统一采用均方根误差评定方法进行精度评价,评价结果如表 2 所示。

表 2 单景卫星影像的几何定位精度

Table 2 Geometric positioning accuracy of single scene satellite image

Satellite	Number of GCP	Number of CIP	RMSE of ICP /pixel		
			<i>x</i>	<i>y</i>	Plane
GF1	0	32	12.87	12.89	17.08
	5	27	2.42	2.04	3.16
GF1-B	0	32	16.11	13.23	20.85
	5	27	4.06	2.98	5.03
GF1-C	0	22	8.45	15.65	17.79
	5	17	3.09	2.49	3.97
GF1-D	0	29	19.48	87.69	89.83
	5	24	5.18	4.17	6.65
ZY3-1	0	30	4.63	1.88	5.00
	5	25	1.29	1.09	1.69
ZY3-2	0	36	11.35	5.9	12.80
	5	31	1.61	2.04	2.60
TH-1	0	28	2.49	1.99	3.18
	5	23	1.61	1.79	2.41

由表 2 可以看出:除 GF1-D 外,高分系列卫星的无控制平面精度都优于 21 pixel(约为 42 m),GF1-D 星无控制平面精度与其他卫星相差较大,其平面精度约为 89.83 pixel(约为 179.66 m);ZY3-1 星的单景无控制平面精度较高分系列卫星高,其平面精度约为 5.00 pixel(约为 10.5 m);ZY3-2 星的单景无控制平面精度约为 12.80 pixel(约为 26.88 m);天绘卫星(TH-1)的无控制平面精度最高,其平面精度约为 3.18 pixel(约为 6.36 m)。由表 2 还可以看出:高分系列卫星的有控制平面精度均优于 6.65 pixel(约为 13.3 m),其中 GF1 与 GF1-C 星的有控制平面精度较其他高分系列卫星稍高,分别约为 3.16 pixel(6.32 m)和 3.97 pixel(约为 7.94 m);ZY3-1 星的单景有控制平面精度约为 1.69 pixel(约为 3.549 m),ZY3-2 星的单景有控制平面精度约为 2.60 pixel(约为 5.46 m);天绘卫星有控制平面精度约为 2.41 pixel(约为 4.82 m)。

由上述精度评价结果可以发现:1)在像平面坐标系下,国产光学卫星均表现出明显的系统误差;2)GF1-D 无控制平面精度系统误差最大;3)高分系列卫星单景无控制平面精度略差,资源三号系列卫星与天绘卫星的精度较高,其中天绘卫星的精度最高。

出现以上结果的原因如下:1)卫星姿态角、相机安装角等误差会导致严密成像几何模型存在系统误

差,进而导致根据严密成像几何模型拟合出来的 RPC 模型出现系统误差。2)系统误差主要由卫星的姿态角误差引起,卫星轨道测量误差对影像定位的影响较小^[14]。3)高分系列卫星的轨道高度为 645 km,大于资源系列卫星与天绘卫星。假设所有卫星的姿态测量精度相同,轨道高度较高的高分系列卫星的姿态角误差会对平面定位精度有更大影响。4)有控制条件下部分卫星的几何定位精度有 5~6 pixel 的平面误差(除了受像点量测、几何检校、卫星颤振等误差因素影响外^[15],还可能与处于几何检校末期有关。在检校周期的前期,有控制平面精度较高,其在后期会随着时间的推移出现偏差的累积)。

综上,与无控制点条件下相比,单景卫星影像在有控制点条件下的几何定位精度显著提升,表明单景影像都有明显的系统误差,且都进行了很好的系统误差补偿。

3.2 立体影像的几何平面定位精度试验

在无控制点和有控制点条件下对国产卫星立体影像的定位精度进行评价。首先采用 RPC 模型中的 RPC 文件将人工野外测量的 GPS 点反算到像点坐标;随后将每景影像的像元作为平差单元,将像点坐标作为观测值,整体求解各影像的仿射变换系数改正数与三维坐标改正数;然后通过空间前方交会

设置区域网平差的初值,进而利用迭代求解出立体影像的几何定位精度;最后将人工量测的部分控制点代入区域网平差中,分析检查点的误差分布。误差分析过程中采用均方根误差评定方法对几何定位精度进行评价。

选取 ZY3-1、ZY3-2 星的两景立体影像(每景均由前视、后视、正视三张影像组成^[16]),在不同控制点条件下进行区域网平差试验。

针对 ZY3-1 星的三线阵影像数据进行试验。首先将所有控制点当作检查点进行平差,得到检查点的平面中误差约为 11.29 m,高程中误差约为 3.43 m;随后在识别的控制点中选取影像的四角

点进行布控,其余点作为检查点,检查点的平面中误差约为 6.09 m,高程中误差约为 1.79 m;将全部控制点当作控制点进行平差时,得到检查点的平面中误差约为 4.01 m,高程中误差约为 1.71 m。

采用相同的试验方法对 ZY3-2 星的影像进行试验,无控制点条件下检查点的平面中误差约为 26.12 m,高程中误差约为 5.28 m;四角点布控条件下检查点的平面中误差约为 5.86 m,高程中误差约为 1.63 m;全部控制点平差条件下检查点的平面中误差约为 4.29 m,高程中误差约为 1.61 m。精度结果统计如表 3 所示。

表 3 不同控制点条件下试验区国产立卫星体影像平差的精度统计

Table 3 Accuracy statistics of domestic satellite stereo image adjustment in test area under different control points

Satellite	Number of GCP	Number of CIP	RMSE of ICP /m				RMSE of GCP /m			
			<i>x</i>	<i>y</i>	Plane	Height	<i>x</i>	<i>y</i>	Plane	Height
ZY3-1	0	24	9.97	5.3	11.29	3.43	—	—	—	—
	4	20	0.76	0.53	0.93	0.59	3.47	5	6.09	1.79
	24	0	—	—	—	—	2.96	2.69	4.01	1.71
ZY3-2	0	27	25.58	5.32	26.12	5.28	—	—	—	—
	4	23	1.74	1.76	2.47	2.58	4.76	3.41	5.86	1.63
	27	0	—	—	—	—	2.99	3.08	4.29	1.61

由表 3 可以看出:1)ZY3-1 星与 ZY3-2 星立体影像对的无控定位结果均存在明显的系统误差,其原因与单景影像系统误差产生的原因相同;2)立体影像定位结果沿轨误差均大于垂轨误差,这是因为线阵推扫式卫星属于行中心投影,其垂轨方向的变形要比沿轨方向小^[17]。

ZY3-1 星与 ZY3-2 星试验影像进行区域网平差后的平面误差和高程误差分布如图 2 和图 3 所示,图 2 中的黑色箭头为平面误差,箭头指向误差方向。从图 2 和图 3 中可以看出:试验影像在进行无控制平差时,影像的平面误差与高程误差均呈现明显的系统性;对四角点和全部控制点进行平差后,影像的几何立体定位精度(平面精度与高程精度)均大幅提高,且误差呈现出随机性的特点,说明已较好地补偿了系统误差。

4 结 论

本文针对国产光学卫星传感器校正产品进行同一区域的几何定位精度评估试验。对于单景影像试验,在无控制点条件下,ZY3-1 与 TH-1 的平面几何定位精度较高,高分系列光学卫星的稍差;在有控制点条件下,GF1-C、ZY3-1 与 TH-1 的平面几何定位精度较高,在 10 m 以内,而其余系列卫星的精度稍

差。对于立体光学影像试验,在无控制点条件下,ZY3-1 星的立体几何精度较好,平面中误差约为 11.29 m,高程中误差约为 3.43 m;在有控制点条件下,ZY3-1 与 ZY3-2 星的平面几何精度基本相当(分别约为 4.01 m 和约为 4.29 m),但 ZY3-2 的高程精度稍高,约为 1.61 m。

本文在涪源地区进行精度试验,并分析了 GF1、GF1-B、GF1-C、GF1-D、ZY3-1、ZY3-2、TH-1 等国产光学卫星的几何定位精度。在无控制点和有控制点两种条件下,无论是单景影像还是立体影像,均得出了试验区所有国产光学卫星的几何定位精度,分析了不同卫星在试验区域中几何定位精度的差异以及出现差异的可能原因,为后续更多的高分辨率卫星的几何定位精度验证与提高提供了参考,证明了建立统一的精度验证区域在多颗国产光学卫星几何定位精度评估中是合理可行的。

随着我国光学遥感卫星数目逐渐增多,同一精度验证场多颗卫星的几何定位精度验证会逐渐成为一种趋势,这样做不仅节约了精度验证成本,提高了效率,还可以在同一条件下对多星的几何定位精度进行差异性评估、分析,以及实现长时间序列的精度监测。几何精度验证场的构建,在未来高分辨率光学卫星几何定位精度的验证与提升方面起到了至关

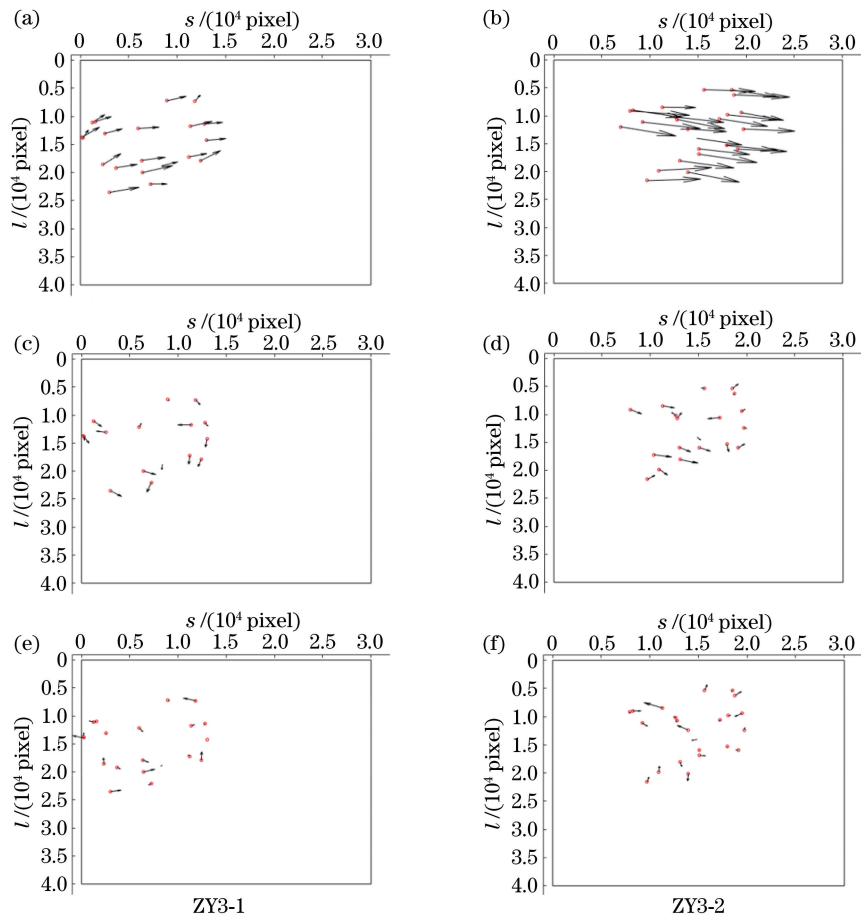


图 2 沽源地区立体影像的平面误差分布。(a)(e)无控制点;(b)(f)四角点;(c)(g)全部控制点
 Fig. 2 Distribution of plane error of stereo image in Guyuan region. (a) Without control points;
 (b) four control points; (c) all control points

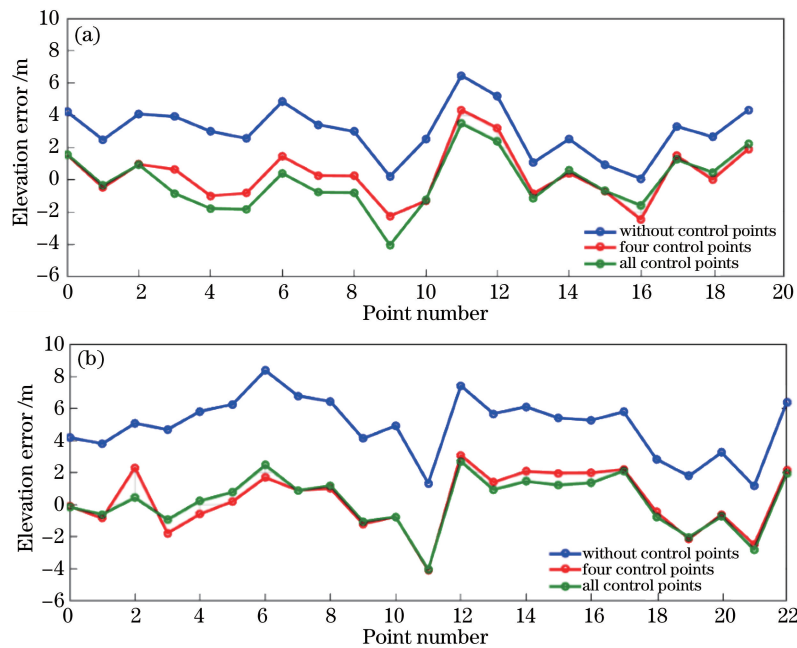


图 3 沽源地区立体影像的高程误差分布。(a) ZY3-1;(b) ZY3-2
 Fig. 3 Elevation error distribution of stereo image in Guyuan region. (a) ZY3-1; (b) ZY3-2

重要的作用,对国产卫星平台和传感器的研发、链路仿真及其在影像行业的推广应用等具有重要意义。

致谢 感谢自然资源部国土卫星遥感应用中心为本研究提供试验数据。

参 考 文 献

- [1] Li D R, Zhang G, Jiang Y H, et al. Research on image geometric precision of domestic optical satellites[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(1): 1-9.
李德仁, 张过, 蒋永华, 等. 国产光学卫星影像几何精度研究[J]. *航天器工程*, 2016, 25(1): 1-9.
- [2] Zhang G. Rectification for high resolution remote sensing image under lack of ground control points [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005: 60-85.
张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 60-85.
- [3] Tian G L, Huang Q L, He H Y, et al. Analysis on geometric positioning accuracy evaluation of remote sensing satellite image [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(5): 106-112.
田国梁, 黄巧林, 何红艳, 等. 遥感卫星图像几何定位精度评估方法浅析[J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(5): 106-112.
- [4] Tang X M, Xie J F, Zhang G. Development and status of mapping satellite technology[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 17-24.
唐新明, 谢俊峰, 张过. 测绘卫星技术总体发展和现状[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(3): 17-24.
- [5] Agugiaro G, Poli D, Remondino F. Testfield Trento: geometric evaluation of very high resolution satellite imagery[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B1: 191-196.
- [6] de Lussy F, Greslou D, Dechoz C, et al. Pleiades HR in flight geometrical calibration: location and mapping of the focal plane[J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B1: 519-523.
- [7] Zhang L, Zhang J X, Chen X Y, et al. Block-adjustment with SPOT-5 imagery and sparse GCPs based on RFM[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(4): 302-310.
张力, 张继贤, 陈向阳, 等. 基于有理多项式模型 RFM 的稀少控制 SPOT-5 卫星影像区域网平差[J]. *测绘学报*, 2009, 38(4): 302-310.
- [8] Li D R. China's first civilian three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 317-322.
李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星: 资源三号测绘卫星[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3): 317-322.
- [9] Wang T, Zhang Y, Wang H, et al. Positioning accuracy evaluation and optimization for domestic surveying and mapping satellites images based on digital experiment field [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, 36(4): 371-376.
王涛, 张艳, 王扈, 等. 基于数字实验场的国产测绘卫星影像定位精度评估及优化[J]. *测绘科学技术学报*, 2019, 36(4): 371-376.
- [10] Han J, Xie Y, Wu G X, et al. Geo-positioning accuracy analysis for domestic high-resolution satellite imagery [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, 28(4): 100-107.
韩杰, 谢勇, 吴国玺, 等. 国产高分辨率卫星影像几何定位研究[J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(4): 100-107.
- [11] Li D R, Zhang G, Jiang W S, et al. SPOT-5 HRS satellite imagery block adjustment without GCPS or with single GCP [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(5): 377-381.
李德仁, 张过, 江万寿, 等. 缺少控制点的 SPOT-5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31(5): 377-381.
- [12] Tang X M, Zhang G, Zhu X Y, et al. Triple linear-array imaging geometry model of Ziyuan-3 surveying satellite and its validation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2): 191-198.
唐新明, 张过, 祝小勇, 等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. *测绘学报*, 2012, 41(2): 191-198.
- [13] Liu J, Wang D H, Liu J X, et al. Precise positioning of IKONOS satellite images based on RPC model[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(3): 228-231, 234.
刘军, 王冬红, 刘敬贤, 等. 利用 RPC 模型进行 IKONOS 影像的精确定位[J]. *测绘科学技术学报*, 2006, 23(3): 228-231, 234.
- [14] Yuan X X, Yu X. Calibration of angular systematic errors for high resolution satellite imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 385-392.
袁修孝, 余翔. 高分辨率卫星遥感影像姿态角系统误差检校[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3): 385-392.
- [15] Xie J F, Mo F, Wang H, et al. Jitter detection of ZY3-02 satellite platform using phase-correlation registration based on symmetrical energy distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0628003.
谢俊峰, 莫凡, 王怀, 等. 基于能量对称分布相位相

- 关配准的资源三号 02 星颤振探测 [J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0628003.
- [16] Li Y Y, Wu H, Chang X L, et al. Multi-view stereo positioning error analysis based on spaceborne optics and SAR images [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0528003.
- 李莹莹, 吴昊, 常学立, 等. 基于星载光学和 SAR 影像的多视立体定位误差分析 [J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0528003.
- [17] Zhang G, Li F T, Jiang W S, et al. Study of three-dimensional geometric model and orientation algorithms for systemic geometric correction product of push-broom optical satellite image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 34-38.
- 张过, 厉芳婷, 江万寿, 等. 推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的 3 维几何模型及定向算法研究 [J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 34-38.