

高分五号可见短波红外高光谱影像在轨几何定标及精度验证

王密, 秦凯玲, 程宇峰, 朱映, 郭贝贝

武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

摘要: 高分五号可见短波红外高光谱相机(AHSI)作为一颗具有高光谱分辨率的对地观测载荷,对复杂地物具有精确的探测与分类能力,高精度的几何定标对于卫星影像应用至关重要。本文采用了基于探元指向角的几何定标模型,分步解算内外定标参数,并选取多景影像进行实验验证。结果表明:通过严格的在轨几何定标,可见短波红外高光谱影像在无控制点的条件下,平面定位精度优于60 m(2个像素),内部精度优于0.5个像素,波段配准精度优于0.3个像素。

关键词: 高分五号,高光谱相机,严格几何模型,几何定标,定位精度

引用格式: 王密,秦凯玲,程宇峰,朱映,郭贝贝.2020.高分五号可见短波红外高光谱影像在轨几何定标及精度验证.遥感学报,24(4):345-351

Wang M, Qin K L, Cheng Y F, Zhu Y and Guo B B. 2020. Geometric calibration for GF-5 AHSI camera. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(4): 345-351[DOI:10.11834/jrs.20209198]

1 引言

高分五号卫星作为中国“高分专项”中的一颗重要科研卫星,首次实现了对大气和陆地的综合观测。可见短波红外高光谱相机是高分五号卫星上的主要载荷之一,对于水环境遥感、生态环境遥感、固体废弃物遥感及矿物识别与填图具有十分重要的意义(刘银年,2018)。表1列出了高分五号可见短波红外高光谱相机的具体信息,其中VNIR代表可见近红外波段,SWIR代表短波红外波段。

表1 高分5号可见短波红外高光谱相机参数

Table 1 The AHSI parameters of GF-5

类别	参数
光谱范围/nm	400—2500
光谱分辨率/nm	VNIR: ≤5; SWIR: ≤10
波段数	330 (VNIR:150; SWIR:180)
幅宽/km	60
空间分辨率/m	30

高分五号卫星发射前对星上载荷参数通常会进行严格的实验室检校,然而由于卫星发射和运行过程中空间环境改变等因素的影响,使得星上载荷结构和状态发生改变,导致实验室检校参数在轨后与真实参数存在较大的误差,直接影响几何处理精度。因此,在轨几何定标是光学卫星遥感影像高精度几何处理的关键和基础。纵观国际上先进的光学遥感卫星,如美国的Geoeye、法国的Pleiades等,在轨运行后均立即开展了系统的在轨几何定标工作,并定期进行在轨几何定标,对星上载荷的状态进行持续跟踪分析,旨在消除卫星平台外部系统误差(如相机安装角在卫星发射过程中受空间力学环境影响相对于实验室检校值的形变、空间复杂热环境下引起的长周期性变形误差)和相机内部系统误差(主点主距检校误差及物镜光学畸变、CCD畸变),从而保证影像产品的几何质量(Baltsavias等,2006; Jacobsen, 2006; Yang和Wang, 2013; Jiang等, 2013)。美国的IKONOS卫星通过在轨几何定标后,无地面控

收稿日期:2019-06-11;预印本:2019-11-06

基金项目:国家自然科学基金(编号:91838303)

第一作者简介:王密,1974年生,男,教授,研究方向为高分辨率光学遥感影像高精度几何处理与应用。E-mail:wangmi@whu.edu.cn

通信作者简介:朱映,1987年生,女,副教授,研究方向为光学遥感影像几何处理。E-mail:yzhu_1003@foxmail.com

制点条件下平面和高程定位精度分别为 12 m (RMS) 和 10 m (RMS) (Baltsavias 等, 2006)。GeoEye-1 卫星利用区域网平差进行几何定标后, 无控定位精度可达到 3 m (Crespi 等, 2010)。法国的 SPOT-5 卫星利用分布于全球各地的地面检校场进行在轨定标, 实现了单景影像无控定位精度 50 m (RMS), 多像对高程定位精度 15 m 的精度要求 (Bouillon 等, 2006)。

国内对于光学遥感卫星在轨几何定标理论研究起步相对较晚, 近几年在“高分专项”支持下, 中国高分遥感卫星的在轨几何定标技术有了极大的发展。李德仁和王密 (2012) 采用分步几何定标的方法完成了资源 3 号卫星三线阵相机的在轨几何定标, 其平面与高程精度完全满足 1:50000 测图的要求。杨博和王密 (2013) 用嵩山定标场数据对资源 1 号 02C 卫星全色相机进行了几何定标实验, 达到了无控定位精度 100 m, 有控制点条件下, 利用 1—2 个控制点即可达到 1 个像素左右的几何精度。Jiang 等 (2014) 以资源三号多光谱相机的一个波段作为其他波段几何定标的参考基准, 提出一种无需定标场的波段间相对定标方法, 实现了波段间优于 0.2 个像素的配准精度。

如何保证高分五号可见短波红外高光谱相机影像的几何定位精度及谱段间的配准精度是本文解决的关键问题。对于可见短波红外高光谱相机, 高光谱分辨率的成像特点使得相机成像谱段众多, 上述针对高空间分辨率光学遥感卫星的在轨几何定标方法难以直接应用。本文在现有几何定标模型和方法基础上, 根据高分五号卫星可见短波红外高光谱相机探测器设计与成像特点, 构建了可见短波红外高光谱相机在轨几何定标模型, 通过绝对定标和相对定标策略完成在轨几何定标, 并利用真实数据进行实验, 验证了该方法的可行性。实验表明, 可见短波红外高光谱相机通过在轨几何定标, 影像无地面控制定位精度优于 60 m (两个像素), 内部精度优于 0.5 个像素, 波段间配准精度优于 0.3 个像素。

2 可见短波红外高光谱相机设计特点与成像模型

可见短波红外高光谱相机采用离轴三反望远镜成像, 利用视场分离器将可见近红外和短波红外波段分离开, 通过狭缝视场后, 采用基于凸面

光栅的光谱仪进行精细分光, 光谱图像信号分别汇聚到 CCD 面阵探测器和短波红外 HgCdTe 焦平面探测器焦面上, 实现 330 个波段的高光谱成像 (刘银年, 2018)。其中可见近红外波段 (包括前 150 个波段) 是一个完整的长条带, 对应星下点沿飞行方向的位置, 短波红外波段 (包括后 180 个波段) 由 4 个条带组成, 按上下交错方式排列, 两个条带对应星下点沿飞行方向 1° 的位置, 另外两个条带对应星下点沿飞行 1.4° 的位置, 具体如图 1 所示。

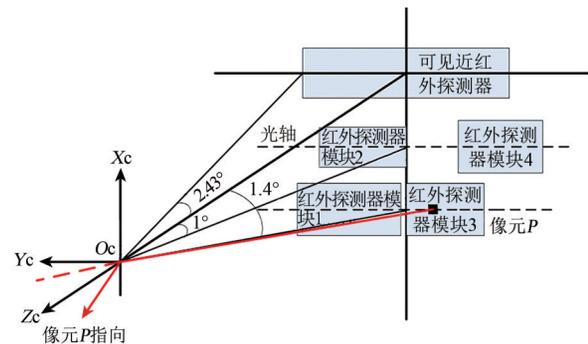


图 1 可见短波红外高光谱相机成像示意图

Fig.1 The imaging schematic diagram of AHSI camera

高分五号卫星采用线阵推扫方式成像, 满足中心投影成像共线方程, 因此可见短波红外高光谱相机严格几何成像模型以共线方程为基础构建, 结合卫星的星历数据和姿态观测数据, 构建其严格几何成像模型, 如式 (1)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} = \lambda R_{\text{body}}^{\text{cam}} \begin{pmatrix} R_{\text{J2000}}^{\text{body}}(t) R_{\text{wgs}}^{\text{J2000}}(t) \begin{bmatrix} X_g - X_{\text{gps}}(t) \\ Y_g - Y_{\text{gps}}(t) \\ Z_g - Z_{\text{gps}}(t) \end{bmatrix}_{\text{wgs}} \\ \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{\text{body}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, t 为像点 (x, y) 的成像时刻, 一般采用 UTC 时, (X_g, Y_g, Z_g) 与 $(X_{\text{gps}}, Y_{\text{gps}}, Z_{\text{gps}})$ 分别表示在 WGS84 坐标系中物方点坐标及 GPS 天线相位中心坐标, $(B_x, B_y, B_z)_{\text{body}}$ 代表在卫星本体坐标系下, 传感器投影中心到 GPS 天线相位中心的偏心矢量, (x, y, f) 代表相机坐标系下的像点坐标; $R_{\text{body}}^{\text{cam}}, R_{\text{J2000}}^{\text{body}}, R_{\text{wgs}}^{\text{J2000}}$ 分别表示卫星本体坐标系到相机坐标系的旋转矩阵、J2000 坐标系到卫星本体坐标系的旋转矩阵、WGS84 坐标系到 J2000 坐标系的旋转矩阵。

3 可见短波红外高光谱相机在轨几何定标模型与方法

3.1 可见短波红外高光谱相机在轨几何定标模型

可见短波红外高光谱相机在轨成像是一个涉及到时间、姿态、轨道等方面的协同工作，影响其几何定位精度的误差来源复杂。其中相机安装角、GPS观测和姿态观测造成的系统误差统一归为外部误差，必须对其进行补偿。采用基于3次多项式的探元指向角模型作为内定标模型，对相机内部几何畸变误差进行拟合。本文采用的可见短波红外高光谱相机在轨几何定标模型如式(2)、式(3)所示，外定标参数 $R_{\text{body}}^{\text{cam}}$ 用于补偿相机外方位元素误差，确定相机坐标系在空间中的姿态。内定标参数 $(ax_0, ax_1, ax_2, ax_3, ay_0, ay_1, ay_2, ay_3)$ 用于确定各个探测器探元在相机坐标系下的指向角。

$$\begin{pmatrix} \tan(\psi_x(s)) \\ \tan(\psi_y(s)) \\ 1 \end{pmatrix} = \lambda R_{\text{body}}^{\text{cam}} \begin{pmatrix} R_{\text{J2000}}^{\text{body}} R_{\text{wgs}}^{\text{J2000}} \begin{bmatrix} X_g - X_{\text{gps}} \\ Y_g - Y_{\text{gps}} \\ Z_g - Z_{\text{gps}} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{\text{body}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_x(s) = ax_0 + ax_1 \times s + ax_2 \times s^2 + ax_3 \times s^3 \\ \psi_y(s) = ay_0 + ay_1 \times s + ay_2 \times s^2 + ay_3 \times s^3 \end{cases} \quad (3)$$

式中， s 为探测器探元序号，单位为像素。

基于探元指向角的定标模型可将相机内部复杂的物理参数（主点、主距、镜像畸变参数、切向畸变参数）的确定转化为探元指向角多项式系数的确定，利于定标参数求解，在不必要确定相机具体的物理参数的同时即可直接构建每一个探元在相机坐标系下的指向角，便于工程使用。

3.2 可见短波红外高光谱相机在轨几何定标方法

考虑到可见短波红外高光谱相机采用可见光近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)两种探测器通过精细分光实现高光谱成像，可将VNIR探测器获取的150个波段和SWIR探测器获取的180个波段分别作为一个整体进行相机内部参数的标定，而对于外定标参数，VNIR和SWIR两个探测器共用一个相机，作为外定标参数的相机安装矩阵是共享的。因此330个波段的外定标参数一致，可见光近红外150个波段的内定标参数一致，短波红外180个波段的内定标参数一致。

本文采用先外定标后内定标的分步定标策略，选取可见光近红外波段中与参考影像辐射特性相近的波段进行绝对定标(杨博和王密, 2013)，解算外定标参数，确定参考相机坐标系，进一步确定可见光近红外内定标参数；考虑到可见光近红外波段与短波红外波段成像视角不同，导致成像时间存在延迟，若对可见光近红外波段和短波红外波段分别进行绝对定标，难以保证波段间的配准精度(Jiang等, 2014)，因此本文以可见光近红外为基准波段，对短波红外波段进行相对定标，分别解算4片短波红外探测器的内定标参数，同时选取可见光近红外与短波红外辐射特性相近的波段进行相对定标，以匹配到足够多的连接点，为定标参数的解算提供足够的约束。

高分五号可见短波红外高光谱相机在轨几何定标流程如图2所示。整个定标过程可分为两个部分：第一部分对VNIR谱段进行绝对几何定标，通过参考数据(包括数字正射影像(DOM)和数字高程模型(DEM))进行密集匹配，得到覆盖整个成像幅宽的密集控制点，先解算外定标参数，即可见短波红外高光谱相机的安装参数，再解算VNIR的内定标参数，即探元指向角模型多项式系数；第二部分对SWIR谱段进行相对几何定标，由于相机安装参数已经确定，直接代入至定标模型中，并以VNIR的149波段作为参考DOM，参考DEM不变，进行密集匹配，确定SWIR的内定标参数，即四个探测器探元指向角模型多项式系数。如此即可保证两类探测器具有相同的空间基准，同时消除两类探测器波段间配准误差，提高波段间几何定位的一致性。

4 实验数据及结果分析

4.1 实验数据

为了验证本文在轨几何定标模型与方法的正确性与可行性，实验中以资源三号影像制作的2 m分辨率的DOM和5 m分辨率的DEM作为参考影像，其平面和高程精度约为5 m(Yang等, 2017)，均能满足高分五号卫星可见短波红外高光谱相机定标精度的需求。同时为了确保控制点匹配的数量与分布，选取没有云覆盖和大片水域覆盖的区域作为待定标影像。卫星待定标影像详细信息如表2所示。

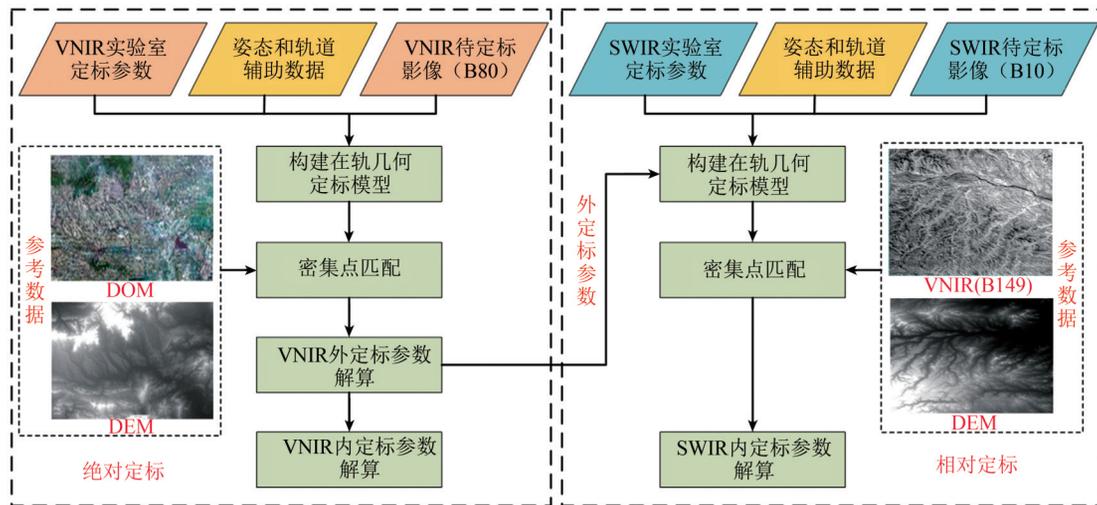


图2 几何定标流程

Fig.2 The flow diagram of geometric calibration

表2 定标影像详细信息

Table 2 Detailed information about the satellite calibration imagery data

参数	可见光近红外 (VNIR)	短波红外 (SWIR)
地面分辨率/m	30	30
图像大小/像素	2048×2100	512×2260
成像时间	2018-10-18	2018-10-18
中心地理坐标	117.9°E, 37.2°N	117.9°E, 37.2°N

4.1 几何定标结果分析

选取定标影像VNIR波段中与参考影像相近的波段(80波段)与参考数据进行密集匹配,自动匹配的同名点的物方坐标可以直接从参考DOM和DEM中获取。实验中筛选出35338个同名点进行VNIR探测器内外定标参数解算。表3列出了VNIR波段外定标参数的实验室提供的初始检校值和解算结果。图3表示VNIR探测器探元指向角正切值曲线。

表3 外定标解算结果

Table 3 The external calibration parameters

外定标参数/(°)	定标前	定标后
Pitch	0.000000	-0.026352
Roll	0.000000	0.067686
Yaw	0.000000	-0.026457

从表3可以看出,卫星在轨后,相机的安装角发生了轻微的变化,其中roll角的变化相对较大。从图3中可发现VNIR探测器垂轨方向的探元指向角正切值呈现二次曲线形态,而沿轨方向探元指向角正切值表现为线性特征。

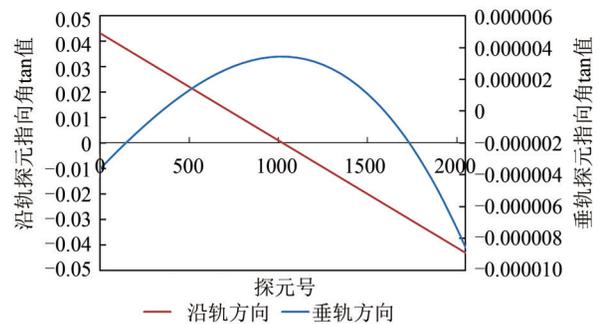


图3 VNIR 探元指向角正切值曲线

Fig.3 The pointing angle tangent value curves of VNIR

进一步列出了VNIR影像定标前后的几何定位精度对比结果,如表4所示。定标前采用实验室定标参数,VNIR影像绝对定位精度垂轨方向超过1 km,沿轨方向接近3 km,定标后VNIR影像垂轨和沿轨方向绝对定位精度分别提高到了15.51 m和13.38 m,定位误差约0.5个像素,说明定标影像的绝对定位系统误差得到有效补偿。同时,利用地面控制点对影像内精度进行评价,VNIR影像内精度垂轨方向从3.06个像素提高到0.4个像素,沿轨方向从2.62个像素提高到了0.35个像素,说明影像内部的畸变得到了有效补偿。

在VNIR探测器定标基础上,进一步对SWIR探测器进行定标。为了避免光谱差异引入匹配误差,选取VNIR的149波段作为基准波段,与SWIR的10波段进行波段间相对定标。实验中SWIR的4个成像模块分别匹配了16773、16966、17951、15247个同名点,分别解算每一片探测器的内定标参数。图4表示SWIR探测器4片探测器探元指向角正切值曲线。从图4中可知4片探测器沿轨方向

探元指向角正切值呈现线性特征, 而垂轨方向则呈现二次、三次曲线特征。

根据上述定标结果可知:

(1) 从表3、表4可以看出, 在轨运行期间, 相机的安装角明显发生了改变, 这对卫星影像的绝对定位精度影响达到了公里级。更新外定标参数之后, 定标景的绝对定位精度明显提高, 沿轨和垂轨方向均为1个像素以内。因此外定标参数的

在轨检校必不可少。

表4 定标景几何精度统计结果

Table 4 The statistics of the geometric accuracy of calibration image

项目	定标前(实验室定标)		定标后(本文方法)	
	垂轨	沿轨	垂轨	沿轨
绝对定位精度/m	1111.89	2928.75	15.51	13.38
内精度/像素	3.06	2.62	0.40	0.35

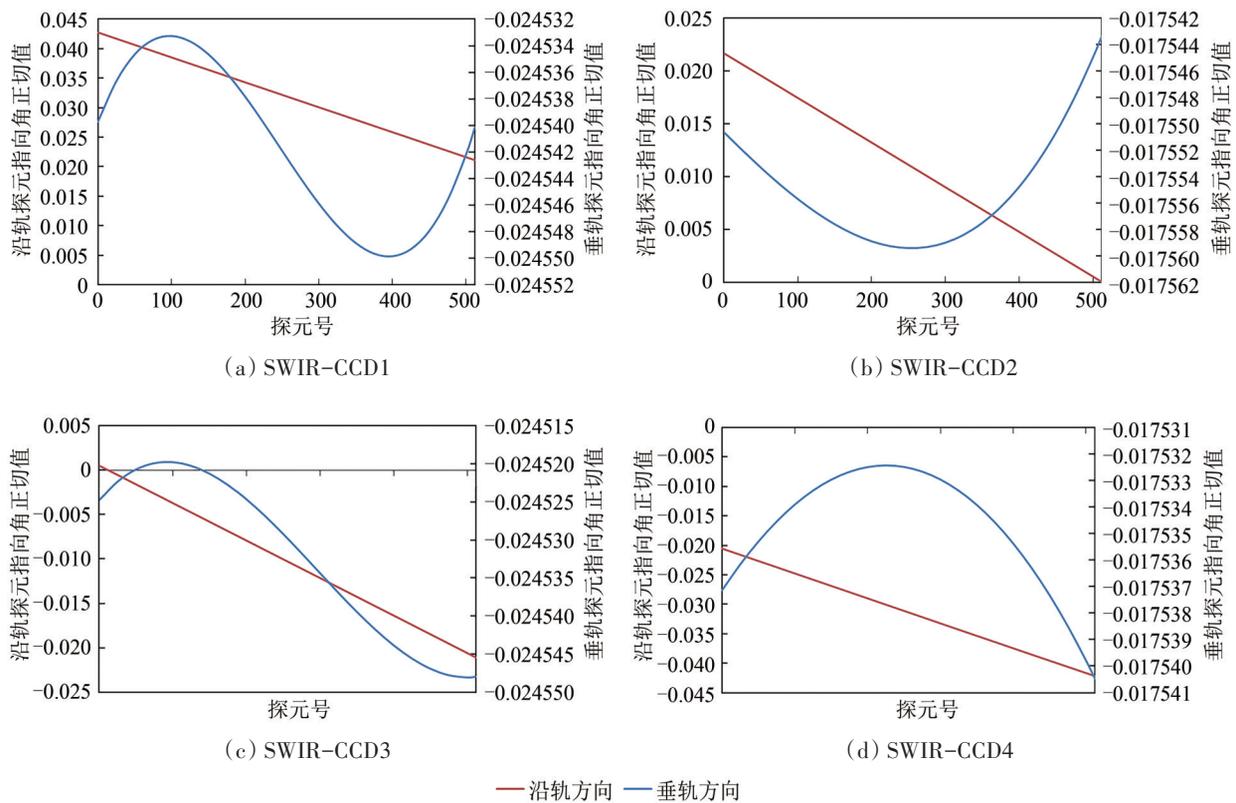


图4 SWIR 探元指向角正切值曲线

Fig.4 The pointing angle tangent value curves of SWIR

(2) 图3、图4分别表示VNIR与SWIR 4片探测器沿轨和垂轨方向的探元指向角正切值曲线, 反映了VNIR、SWIR影像内部的几何畸变情况。从图中可以看出, 可见光近红外波段与短波红外波段探测器的内部几何畸变曲线在垂轨方向多为非线性畸变, 沿轨方向多为线性畸变。由此可见光学镜头畸变对影像垂轨方向的影响较大。

4.2 几何定位结果分析

为了验证和评价定标结果对影像几何精度改善的有效性, 将定标参数作为输入, 生产1A级影像进行定位精度验证。选取2018年10月—2019年4月半年内的15景影像进行几何精度验证。实验影像分布世界不同区域, 且覆盖了山地、丘陵、

平原等地形, 覆盖城镇、农田、戈壁等地物类型, 实验数据情况如表5所示。

利用实验影像和参考影像自动匹配均匀分布的同名点, 每景测试影像分布120个点左右, 分别统计每一景影像沿轨和垂轨方向的无控绝对定位精度和影像内部精度, 并对山地、丘陵、平原3类地形的结果定位精度进行分类统计与分析, 统计结果如表6所示。

从统计结果可以看出, 山地、丘陵和平原平均无控定位精度分别为40.22 m、35.11 m和33.15 m, 定位精度基本在一个量级, 山区无控定位精度较丘陵和平原地区略低, 平原地区定位精度最高; 对于内部精度, 山地影像垂轨和沿轨平均精度为

0.42 和 0.41 个像素, 丘陵地区垂轨和沿轨平均精度为 0.48 和 0.45 个像素, 平原地区垂轨和沿轨平均精度为 0.37 和 0.36 个像素, 3 类影像的内部精度均优于 0.5 个像素, 其中平原地区内精度最高。对所有数据统计平均值, 验证数据的无控定位精度为 36.16 m, 内部精度垂轨 0.42 个像素, 沿轨 0.40 个像素。

表 5 实验数据基本信息

Table 5 Basic information of experimental data

序号	地形	成像日期	中心经纬度	
			经度	纬度
1	山地	2018-10-23	126.41°E	50.14°N
2	山地	2018-10-27	118.04°E	36.10°N
3	山地	2018-11-11	88.79°E	39.20°N
4	山地	2018-06-15	118.39°E	35.72°N
5	山地	2018-10-18	118.36°E	43.10°N
6	丘陵	2018-11-14	106.37°W	33.99°N
7	丘陵	2018-11-17	113.08°W	32.01°N
8	丘陵	2019-04-06	113.49°E	34.25°N
9	丘陵	2019-04-17	118.81°E	37.70°N
10	丘陵	2019-04-17	118.20°E	39.67°N
11	平原	2018-10-31	112.05°E	43.65°N
12	平原	2018-11-18	83.45°W	32.14°N
13	平原	2018-11-20	88.35°E	42.35°N
14	平原	2019-03-11	117.94°E	37.21°N
15	平原	2019-04-06	114.42°E	30.79°N

对于高光谱影像, 其波段配准效果直接影响后期影像应用, 所以波段间的配准精度也是衡量几何定标重要指标之一。结合载荷设计特点, 本文中的波段配准主要针对 VNIR 前 150 个波段与 SWIR 后 180 个波段间。为了保证验证的有效性, 选取了 VNIR 波段和 SWIR 波段中辐射特性相接近的两个波段进行波段配准精度验证, 同时选取了 8 景影像参与了精度验证, 结果如表 7 所示。

由统计结果可知, 不论山地、丘陵还是平原地区, 波段配准精度在垂轨方向均优于 0.2 个像素, 沿轨方向优于 0.3 个像素, 垂轨和沿轨两个方向的平均波段配准精度分别为 0.148 个像素和 0.232 个像素。

通过上述实验可以得出以下结论:

(1) 在轨几何定标后, 无地面控制点条件下, 可见短波红外高光谱影像的平面绝对定位精度均稳定在 60 m (2 个像素) 以内, 同时, 定标后影像

内精度均优于 0.5 个像素, 说明影像内部畸变得到了有效补偿。

表 6 几何精度验证统计结果

Table 6 The statistics of the geometric accuracy

序号	地形	无控绝对定位精度			影像内部精度	
		/m			/像素	
		垂轨	沿轨	平面	垂轨	沿轨
1	山地	26.55	40.26	48.23	0.43	0.46
2	山地	34.17	37.71	50.89	0.43	0.32
3	山地	11.91	32.49	34.60	0.32	0.50
4	山地	31.92	27.33	42.00	0.46	0.34
5	山地	15.54	20.07	25.38	0.48	0.44
	平均值	24.02	31.57	40.22	0.42	0.41
6	丘陵	18.84	26.91	32.85	0.54	0.44
7	丘陵	30.21	19.17	35.78	0.53	0.40
8	丘陵	19.83	13.44	23.94	0.37	0.42
9	丘陵	36.78	16.26	40.20	0.48	0.49
10	丘陵	39.93	15.36	42.78	0.47	0.48
	平均值	29.12	18.23	35.11	0.48	0.45
11	平原	10.74	16.17	19.41	0.33	0.36
12	平原	13.89	34.71	37.39	0.36	0.40
13	平原	20.01	9.90	22.33	0.44	0.28
14	平原	25.41	26.25	36.54	0.35	0.40
15	平原	42.45	26.58	50.10	0.35	0.34
	平均值	22.50	22.72	33.15	0.37	0.36
	总体平均值	25.21	24.17	36.16	0.42	0.40

表 7 波段配准精度统计结果

Table 7 The statistics of the band-to-band registration accuracy

序号	地形	波段配准精度/像素	
		垂轨	沿轨
1	山地	0.115	0.240
2	山地	0.133	0.208
3	山地	0.141	0.249
4	丘陵	0.159	0.241
5	丘陵	0.198	0.223
6	平原	0.124	0.235
7	平原	0.188	0.261
8	平原	0.125	0.200
	平均值	0.148	0.232

(2) 通过相对定标, 可见光近红外波段与短波红外波段之间垂轨和沿轨两个方向的波段配准精度均优于 0.3 个像素, 完全满足应用需求。

5 结 论

本文基于高分五号可见短波红外高光谱相机设计特点, 提出了可见短波红外高光谱相机的在轨几何定标方法, 采用先外定标再内定标的定标策略, 利用高精度的参考数据, 对其进行了在轨几何定标实验, 并对定标后的影像几何精度进行了分析和验证。实验结果表明, 本文采用的几何定标模型与方法, 能够显著提高高分五号可见短波红外高光谱影像的无控几何定位精度、影像内精度, 同时波段间配准精度也满足了影像实际应用的指标要求。

志 谢 本文在实验过程中得到了中国资源卫星应用中心、中国科学院上海技术物理研究所等单位的支持, 在实验数据、论文材料和项目实施过程中都给予了极大的热情帮助, 在此表示感谢!

参考文献(References)

- Baltsavias E, Zhang L and Eisenbeiss H. 2006. DSM generation and interior orientation of IKONOS images using a testfield in Switzerland. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, (1): 41-54
- Bouillon A, Bernard M, Gigord P, Orsoni A, Rudowski V and Baudoin A. 2006. SPOT 5 HRS geometric performances: using block adjustment as a key issue to improve quality of DEM generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(3): 134-146 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2006.03.002]
- Crespi M, Colosimo G, De Vendictis L, Fratarcangeli F and Pieralice F. 2010. GeoEye-1: analysis of radiometric and geometric capability//Sithampanathan K, Marchese M, Ruggieri M and Bisio I, eds. *Personal Satellite Services*. Berlin, Heidelberg: Springer: 354-

- 369 [DOI: 10.1007/978-3-642-13618-4_27]
- Jacobsen K. 2006. Calibration of optical satellite sensors//International Calibration and Orientation. Castelfelfels: Workshop EuroCOW
- Jiang Y H, Zhang G, Tang X M, Li D R, Huang W C and Pan H B. 2014. Geometric calibration and accuracy assessment of ZiYuan-3 multispectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(7): 4161-4172 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2280134]
- Jiang Y H, Zhang G, Tang X M, Zhu X Y, Qin Q Q, Li D R and Fu X K. 2013. High accuracy geometric calibration of ZY-3 three-line image. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 42(4): 523-529, 553 (蒋永华, 张过, 唐新明, 祝小勇, 秦前清, 李德仁, 付兴科. 2013. 资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校. *测绘学报*, 42(4): 523-529, 553)
- Li D R and Wang M. 2012. On-orbit geometric calibration and accuracy assessment of ZY-3. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 33(3): 1-6 (李德仁, 王密. 2012. “资源三号”卫星在轨几何定标及精度评估. *航天返回与遥感*, 33(3): 1-6) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2012.03.002]
- Li D R. 2012. China's First civilian three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 41(3): 317-322 (李德仁. 2012. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星. *测绘学报*, 41(3): 317-322)
- Liu Y N. 2018. Visible-shortwave infrared hyperspectral imager of GF-5 satellite. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(3): 25-28 (刘银年. 2018. “高分五号”卫星可见短波红外高光谱相机的研制. *航天返回与遥感*, 39(3): 25-28) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.003]
- Yang B and Wang M. 2013. On-orbit geometric calibration method of ZY-1 02C panchromatic camera. *Journal of Remote Sensing*, 17(5): 1175-1190 (杨博, 王密. 2013. 资源一号02C卫星全色相机在轨几何定标方法. *遥感学报*, 17(5): 1175-1190) [DOI: 10.11834/jrs.20132265]
- Yang B, Wang M, Xu W, Li D R, Gong J Y and Pi Y D. 2017. Large-scale block adjustment without use of ground control points based on the compensation of geometric calibration for ZY-3 images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134: 1-14 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.10.013]

Geometric calibration for GF-5 AHSI camera

WANG Mi, QIN Kailing, CHENG Yufeng, ZHU Ying, GUO Beibei

State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The advanced hyperspectral imager of GF-5 is a high spectral resolution camera, and it has outstanding recognition and classification ability for complex features and environments. The high accuracy geometric calibration is the key factor for the geometrical quality of satellite imagery. The geometric calibration model based on the pointing angle of the probe is used in this paper. The internal and external calibration parameters are solved step by step and some typical images are selected for experimental verification. The results indicated that the absolute positioning accuracy of AHSI can be stably better than 60 m (2 pixels) and the internal positioning accuracy is better than 0.5 pixels, the bands registration accuracy can be better than 0.3 pixels.

Key words: GF-5 satellite, hyperspectral camera, strict geometric model, geometric calibration, positioning accuracy

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.91838303)