

多 CCD 视场拼接宽幅相机在轨几何定标与精度验证

孟伟灿¹, 王太平², 汪雨豪³, 耿泽民²

1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100101;

2. 武汉大学 测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430079;

3. 中国四维测绘技术有限公司, 北京 100408

摘要: 四维高景三号 01 星 (SVN301) 宽幅相机采用 32 片时间延迟积分电荷耦合器件 TDI CCD (Time-Delay Integration Charge-Coupled Device) 器件视场拼接技术, 实现了超大幅宽与亚米级分辨率的有效融合, 兼顾宏观覆盖能力与精细探测能力, 在国土资源普查与应急灾害响应等应用中具有显著优势。在轨几何定标作为光学遥感卫星几何精度保障的核心环节, 对于提升影像绝对定位精度与 CCD 间几何一致性具有关键作用。为实现 SVN301 卫星宽幅相机相邻 CCD 影像间的无缝拼接, 针对该相机多 CCD 视场拼接结构及亚米级成像特性, 本文设计了一种面向多 CCD 视场拼接宽幅相机的在轨几何定标方法, 采用特征匹配结合模板匹配的策略实现狭窄片间重叠区域内的连接点匹配, 利用地面控制点与片间连接点联合解算同一波段各 CCD 的内定标参数, 并利用新疆和河北区域的 SVN301 宽幅相机影像进行了在轨几何定标处理与试验。试验表明, 定标后 SVN301 宽幅影像绝对定位精度优于 3 像素, 相邻 CCD 影像间拼接精度控制在 0.3 像素左右, 从而验证了本文设计的在轨几何定标方法对多 CCD 视场拼接宽幅影像几何质量提升的有效性。

关键词: SVN301 卫星, 亚米级分辨率宽视场相机, 多 CCD 视场拼接, 在轨几何定标, 相对约束, 绝对定位精度, 拼接精度

中图分类号: P237/P2

引用格式: 孟伟灿, 王太平, 汪雨豪, 耿泽民. 2025. 多 CCD 视场拼接宽幅相机在轨几何定标与精度验证. 遥感学报, 29(12): 3723-3734

Meng W C, Wang T P, Wang Y H and Geng Z M. 2025. On-orbit geometric calibration and accuracy verification of a multi-CCD field-stitched wide-field camera. National Remote Sensing Bulletin, 29(12): 3723-3734 [DOI: 10.11834/jrs.20255193]

1 引言

高分辨率光学卫星影像已成为现代对地观测系统的重要数据源, 被广泛应用于环境监测 (Shimada 等, 2010) 城市规划 (Li 等, 2016)、资源调查 (Adiri 等, 2020) 等多个领域。特别是具备高空间分辨率与超大幅宽的高分宽幅 WFV (Wide Field View) 光学卫星, 其能够在单次成像中覆盖更广阔的区域, 因此在大范围对地观测应用中展现出显著优势。已有研究表明, 幅宽超过 100 km 的宽幅光学卫星影像已在森林资源调查 (Peng 等, 2022)、生态环境调查 (Xu 等, 2022) 等领域中得到广泛应用。

四维高景三号 01 星 (SVN301) 于 2024 年 4 月 15 日成功发射, 实现了超大幅宽与亚米级分辨率的有效融合, 兼顾宏观覆盖能力与精细探测能力。如图 1 所示, 与 GF-1 卫星的多相机系统 (Cheng 等, 2017)、GF-6 卫星的 8 片互补金属氧化物半导体集成设计 (Wang 等, 2019a) 不同, SVN301 各波段集成 32 片 TDI CCD, 采用 TDI CCD 器件视场拼接成像技术, 实现了单次曝光获取 130 km 幅宽光学影像的能力。SVN301 宽幅相机的相关参数如表 1 所示。

几何定位精度是光学卫星影像的核心质量指标, 直接决定了影像的可用性和准确性。一种常用的方法是利用定标场中均匀分布的密集地面控制点作为绝对约束, 通过摄影测量空间后方交会方法

收稿日期: 2025-06-03; 预印本: 2025-09-28

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42471481); 中国航天科技集团民用产业自主研发项目 (编号: 2023039)

第一作者简介: 孟伟灿, 研究方向为卫星应用。E-mail: wwss_000@163.com

通信作者简介: 王太平, 研究方向为在轨几何定标及无地面控制区域网平差。E-mail: 2014302590078@whu.edu.cn

解算各 CCD 的系统性几何误差参数。此类方法已广泛应用于 IKONOS (Grodecki 和 Dial, 2002)、OrbView-3 (Bouillon 等, 2003)、SPOT-5 (Bouillon 等, 2003)、ZY-3 (Jiang 等, 2014)、ALOS (Takaku 等, 2022)、Jilin1-KF01B (Wu 等, 2024)、天绘一号 (胡振龙 等, 2017)、高分五号 (王密 等, 2020)、海洋一号 C 卫星 (戴荣凡 等, 2023) 等卫星的定标处理中。基于这种方法, 针对 GF-6 宽幅

相机的焦平面设计特点, Wang 等 (2019a) 提出了基于虚拟 CMOS 的几何定标方法, 并构建了基于双参考波段的多波段相对定标框架, 实现了多光谱影像的无缝拼接, 并将波段间配准精度提升至优于 0.3 像素。上述定标策略通过已定标 CCD 的级联传递方式, 可有效保障相邻 CCD 之间的拼接精度以及不同波段之间的配准精度。

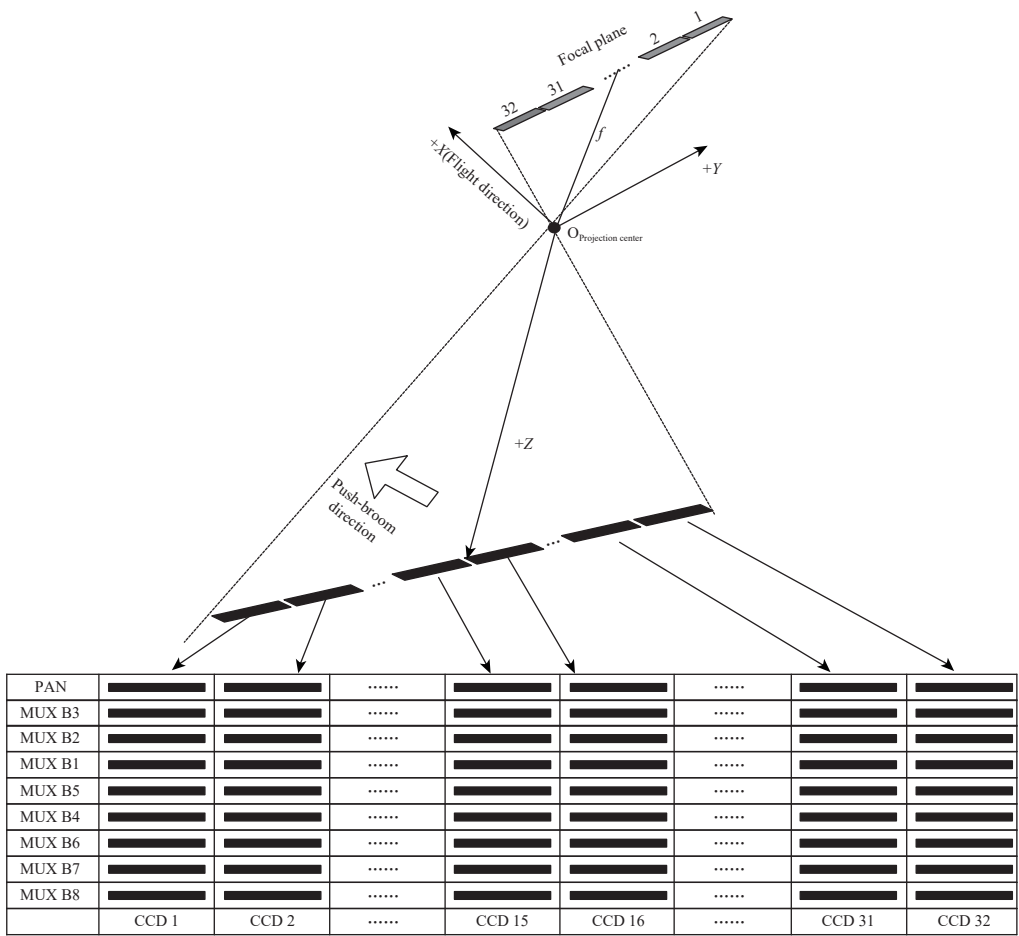


图1 SVN301 宽幅相机焦平面设计
Fig. 1 Design of the focal plane of the SVN301 WFW camera

然而, 该策略在开展 SVN301 卫星所搭载的单波段集成 32 片 CCD 的宽幅相机在轨几何定标时, 其可扩展性受到限制。SVN301 WFW 影像分辨率达到亚米级、影像幅宽达 130 km, 达到同等分辨率的大范围数字正射影像 DOM (Digital Orthophoto Map) 获取成本高、周期长, 导致基于定标场 DOM 密集匹配的定标方法难以满足快速定标要求。

为满足卫星在轨测试阶段几何定标的时效性需求, 在待定标区域布设地面靶标控制点成为可行方案。该方法具备部署灵活、响应迅速的优势,

对高分辨率、大幅宽、多 CCD 成像条件下的几何定标场景具有良好适用性。为保证控制点在物方空间上的均匀分布, 通常将其按一定间距沿影像列 (即垂直轨道方向) 布设, 使其覆盖整个影像区域。尽管此方式可保证控制点在物方及整景影像中分布均匀, 但在各个 CCD 影像中的分布却难以保持一致。针对类似稀疏地面控制条件下的光学卫星几何定标问题, 已有研究 (皮英冬, 2019; Wang 等, 2019b) 提出利用沿 CCD 方向重叠度不低于 50% 的影像对, 结合少量控制点, 实现相机参数的高精度

标定。然而, 此类方法对影像间重叠度要求较高, 在轨测试阶段难以及时获取满足要求的宽幅影像, 制约了其实用性。此外, 相较于GF-1与GF-6等同类宽幅相机, 该相机单波段CCD数量增加至32片, 相邻CCD间仅存在约100像素的狭窄重叠区, 进一步加剧了SVN301 WFV影像无缝拼接的难度。

表1 SVN301宽幅相机参数
Table 1 Main parameters of the SVN301 camera

参数	数值
轨道高度/km	500
幅宽/km	130
波段数	9
单波段CCD数	32
重叠区像素数量/pixels	100
全色像元尺寸/ μm	7
多光谱像元尺寸/ μm	28
全色光谱光谱范围/ μm	0.45—0.8
多光谱光谱范围/ μm	0.450—0.520, 0.520—0.590,
	0.630—0.690, 0.770—0.890,
	0.400—0.450, 0.585—0.625,
	0.705—0.745, 0.860—1.040

为实现SVN301宽幅相机高精度在轨几何定标, 针对该相机TDI CCD器件多、影像幅宽大的成像特点, 本文在基于地面控制点的在轨几何定标方法基础上, 引入相邻CCD间同名光线空间相交的约束条件。首先采用特征匹配与模板匹配结合的策略, 在狭窄重叠区和有限观测条件下获取可靠的片间连接点; 随后, 以均匀分布的地面控制点作为绝对参考, 以CCD间连接点为相对约束, 以期对全部CCD的定标参数进行全局协同优化, 从而同时保证影像的绝对定位精度与多CCD视场的无缝拼接。

2 研究方法

如图2所示, 本文设计的多CCD联合定标方法中的观测值可分为两类: 一类为控制点像点坐标, 用于提升宽幅相机影像绝对几何精度; 另一类为相邻CCD间的连接点像点坐标, 主要通过密集匹配算法在CCD影像的重叠区域内自动匹配获得, 用于构建“探元—探元”的几何约束条件, 从而增强影像间的一致性。例如, 在高分十四号卫星定标中(卢学良等, 2023), 连接点的引入显著改善了双相机影像之间的几何一致性, 使在无地面控制条件下的高程交会精度提升至1.97 m RMS (Root Mean Square)。

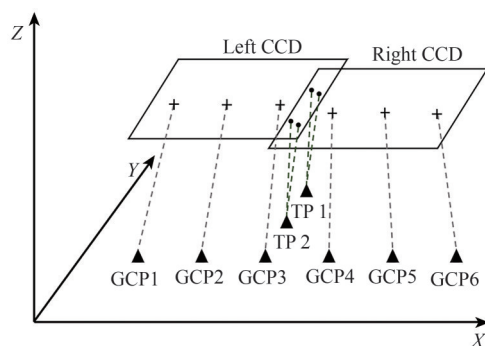


图2 多CCD联合定标方法观测值示意图

Fig. 2 Schematic of observations for multi-CCD joint calibration

如图3所示, 本文方法流程分为6个部分: (1) 利用人工量测方法和密集匹配算法, 获取待定标影像中的控制点和连接点像点坐标; (2) 根据初始几何定标参数和地面控制点, 构建外方位元素定标模型, 解算相机外定标参数; (3) 基于外定标参数、初始相机参数及其他辅助数据构建严格几何成像模型, 计算连接点物方平面坐标初值, 并在DEM中内插连接点的物方高程坐标; (4) 利用获取的控制点像点坐标和连接点像点坐标, 构建基于探元指向角模型的联合内定标模型; (5) 解算各CCD内定标参数, 并对粗差点进行检测与剔除; (6) 重复进行内定标和外定标, 直至精度趋于稳定。

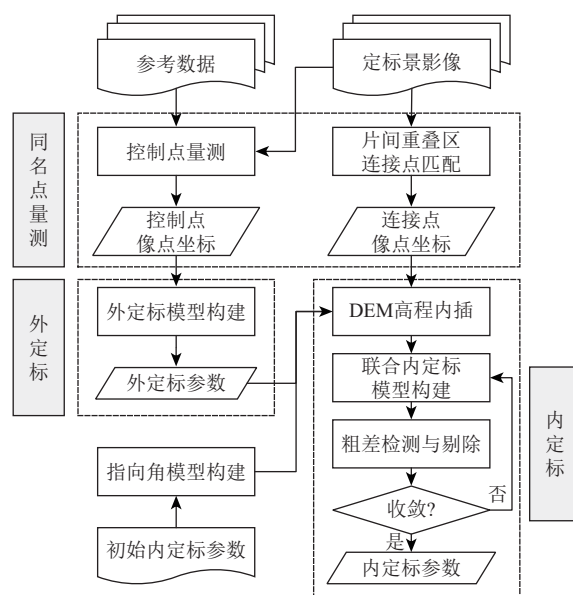


图3 多CCD联合定标方法流程

Fig. 3 Flowchart of the multi-CCD joint calibration method

2.1 窄重叠区同名点匹配

获取待定标影像中的控制点和连接点像点坐

标是实现多CCD多谱段联合定标的基础。本文采用特征匹配结合模板匹配的双重约束策略实现影像间高精度同名像点的获取。在特征匹配阶段,采用SIFT算法提取特征点并进行匹配。具体来说,设影像 I_A 与影像 I_B 的特征点集合分别为 $\{f_i^A\}$ 和 $\{f_j^B\}$,每个特征点包含位置坐标和特征描述子。通过最近邻距离比作为匹配准则获取同名点,即:

$$r = \frac{\|d_i - d_1\|}{\|d_i - d_2\|} \quad (1)$$

式中, d_i 表示查询特征点的描述子, d_1 和 d_2 分别是匹配库中与其欧氏距离最小与次小的两个描述子。当比值 r 小于设定阈值(本文设置为0.8)时,认为匹配有效。

为进一步提高匹配精度,本文在特征匹配的基础上采用基于归一化互相关NCC(Normalized Cross-Correlation)的模板匹配算法进行匹配。设参考影像模板窗口为 $T(x, y)$,搜索影像中的窗口为 $S(x + u, y + v)$,则两者的NCC定义为

$$NCC(u, v) = \frac{\sum_{x, y} (T(x, y) - \bar{T})(S(x + u, y + v) - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{x, y} (T(x, y) - \bar{T})^2 \sum_{x, y} (S(x + u, y + v) - \bar{S})^2}} \quad (2)$$

式中, $\bar{T}$ 和 $\bar{S}$ 分别为模板与搜索窗口的均值。当 $NCC(u, v)$ 取得最大值时,视为最佳匹配位置。

为了对匹配结果中的误匹配点进行剔除,本文引入RANSAC算法估算两影像间的仿射变换模型,设匹配点对为 $\{(x_i, x'_i)\}$,其中 x_i 和 x'_i 分别为参考影像与目标影像中匹配点的坐标,拟合模型为

$$x'_i = Ax_i + t \quad (3)$$

式中, $A \in R^{2 \times 2}$ 为线性变换矩阵, $t \in R^2$ 为平移向量。根据内点比例与残差阈值进行迭代筛选,以实现误匹配点剔除的目的。

2.2 几何定标模型

为保证SVN301宽幅相机影像的几何质量,需要通过在轨几何定标补偿几何成像模型中的系统性误差。通常,成像模型中的系统误差参数可分为外部系统误差参数和内部系统误差参数两类。外部系统误差参数可归纳为卫星本体坐标系与相机坐标系之间的三轴夹角,可通过相机安装矩阵 R_{body}^{cam} 对其进行补偿。内部系统误差涵盖镜头畸变、焦

距变化以及光学畸变等诸多因素,且与外部系统误差存在高度相关性。基于此,倘若采用严格物理模型作为几何定标模型,极易出现过度参数化问题,同时在定标参数解算过程中也会面临病态问题,影响定标结果精度(Wang等, 2017)。

SVN301宽幅相机采用线阵推扫成像方式,其严密成像几何模型以共线方程为基础。因此,本文采用式(4)所示的基于焦距标准化的指向角模型(Yang等, 2020)作为相机的内定标模型来恢复每个探元在相机坐标系下的精确光线矢量。各像元的指向可以表示为

$$(V_{Image})_{cam} = \left(\frac{x}{f}, \frac{y}{f}, -1\right)^T = (\tan \varphi_x, \tan \varphi_y, -1)^T \quad (4)$$

$$\begin{cases} \tan \varphi_x = a_0 + a_1 \times s + a_2 \times s^2 + a_3 \times s^3 \\ \tan \varphi_y = b_0 + b_1 \times s + b_2 \times s^2 + b_3 \times s^3 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $(a_i, b_i)(i = 0, 1, 2, 3)$ 为指向角模型系数; (x, y) 表示相机像元的行、列坐标; f 表示相机焦距; s 表示相机像元的探元号。

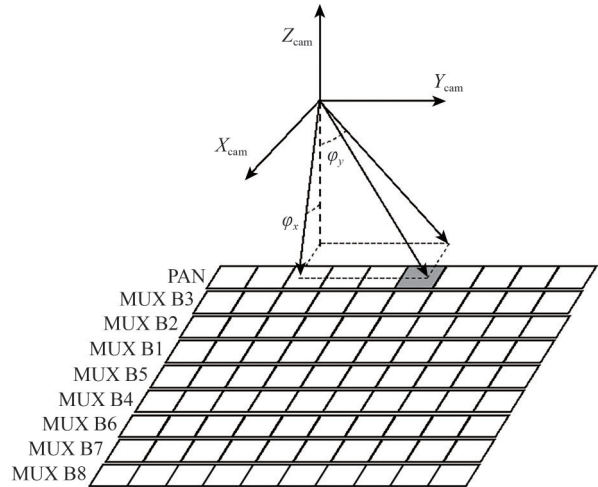


图4 SVN301宽幅相机探元指向角模型

Fig. 4 The detector directional angle model of WFOV camera

基于探元指向角模型构建SVN301宽幅相机的几何定标模型如下:

$$\begin{bmatrix} \tan \varphi_x \\ \tan \varphi_y \\ -1 \end{bmatrix} = \lambda \cdot R_{body}^{cam} \begin{bmatrix} R_{J2000}^{body}(t) R_{WGS84}^{J2000}(t) \begin{bmatrix} X - X_{GPS}(t) \\ Y - Y_{GPS}(t) \\ Z - Z_{GPS}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $(\tan \varphi_x, \tan \varphi_y)$ 为像点指向角; $[X, Y, Z]^T$ 为像点对应物点在 WGS84 坐标系下的位置矢量; $[X_{\text{GPS}}(t), Y_{\text{GPS}}(t), Z_{\text{GPS}}(t)]^T$ 是在成像时刻 t GPS 天线相位中心在 WGS84 直角坐标系的位置矢量; $[D_x, D_y, D_z]^T$ 为 GPS 天线相位中心的偏心矢量在卫星本体坐标系下的坐标; $[d_x, d_y, d_z]^T$ 为相机投影中心在卫星本体坐标系下的坐标; λ 为成像比例尺; $R_{\text{body}}^{\text{cam}}, R_{\text{J2000}}^{\text{body}}(t), R_{\text{WGS84}}^{\text{J2000}}(t)$ 均为 3×3 的方阵, 分别代表成像时刻 t 卫星本体坐标系到相机坐标系、J2000 坐标系到卫星本体坐标系以及 WGS84 坐标系到 J2000 坐标系的旋转矩阵。

2.3 多 CCD 联合定标

本文采用一种附加 CCD 间重叠区域同名光线空间相交约束的在轨几何定标方法, 以控制点像点坐标和 CCD 影像间连接点像点坐标为观测值, 将影像间同名光线空间相交的几何一致性约束纳入在轨几何定标模型, 增强了 CCD 间的相对几何约束条件, 从而实现同一波段 32 片 CCD 内定标参数的协同优化。

(1) 外定标参数解算: SVN301 宽幅相机的每个波段由 32 个 CCD 拼接构成, 单次成像可获取幅宽达 130 km 的影像。尽管该设计显著提升了数据获取效率, 但其宽视场特性也引入了严重的镜头畸变问题。外方位标定的核心目标在于确定相机在空间中的位置与姿态, 从而为后续内方位元素解算建立统一的相机坐标系。由于相机内所有 CCD 共享同一组外方位元素, 仅需选择一片 CCD 进行标定。考虑到焦平面中心区域畸变最小, 本文选取中间位置的第 15 片 CCD 进行外方位标定。该过程仅依赖影像覆盖区域内少量控制点, 通过最小二乘法迭代求解外参数改正值的最优估计 (皮英冬等, 2019)。

(2) 内定标模型构建: 对于连接点而言, 当没有相机内部几何畸变时, 如图 5 所示, 同名光线在空间中应前方交会于物点 A。然而, 由于相机内部畸变的存在, 连接点对应的同名光线可能在物点 B 处交会。因此, 对于连接点像点坐标观测值, 可以构建如式 (7) 所示的几何交会模型:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \tan \varphi_{x_{p_1}} \\ \tan \varphi_{y_{p_1}} \\ -1 \end{bmatrix} = \lambda \cdot R_{\text{body}}^{\text{cam}} \left(R_{\text{J2000}}^{\text{body}}(t_1) R_{\text{WGS84}}^{\text{J2000}}(t_1) \begin{bmatrix} X_{\text{obj}} - X_{\text{GPS}}(t_1) \\ Y_{\text{obj}} - Y_{\text{GPS}}(t_1) \\ Z_{\text{obj}} - Z_{\text{GPS}}(t_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \right) \\ \begin{bmatrix} \tan \varphi_{x_{p_2}} \\ \tan \varphi_{y_{p_2}} \\ -1 \end{bmatrix} = \lambda \cdot R_{\text{body}}^{\text{cam}} \left(R_{\text{J2000}}^{\text{body}}(t_2) R_{\text{WGS84}}^{\text{J2000}}(t_2) \begin{bmatrix} X_{\text{obj}} - X_{\text{GPS}}(t_2) \\ Y_{\text{obj}} - Y_{\text{GPS}}(t_2) \\ Z_{\text{obj}} - Z_{\text{GPS}}(t_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $[\tan \varphi_{x_{p_1}}, \tan \varphi_{y_{p_1}}]^T$ 、 $[\tan \varphi_{x_{p_2}}, \tan \varphi_{y_{p_2}}]^T$ 为同名像点 p_1 、 p_2 对应像元的探元指向角; $[X_{\text{obj}}, Y_{\text{obj}},$

$Z_{\text{obj}}]$ 为同名像点 p_1 、 p_2 前方交会得到的物点在 WGS84 坐标系下的位置矢量。

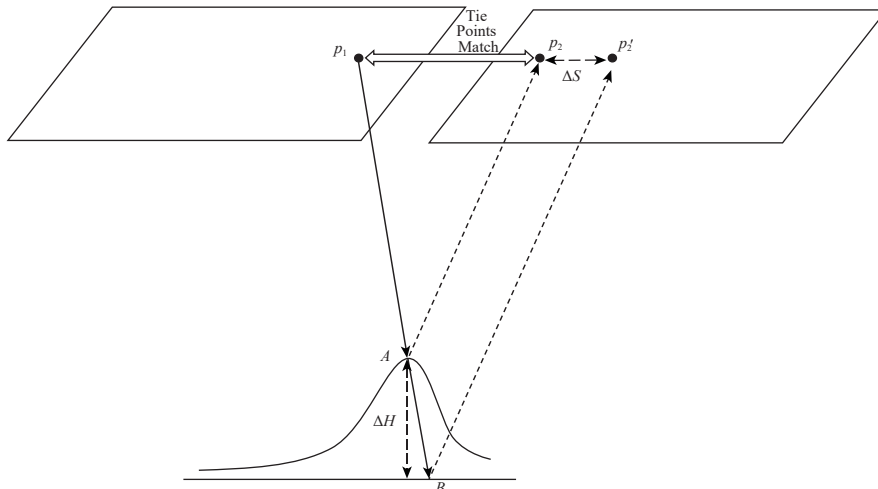


图5 物方空间连接点同名光线空间相交示意图

Fig. 5 Schematic diagram of TP intersection between ccds in object space

因此, 连接点的误差方程可构建为

$$V_{lp}^i = A_{lp}^i x_l + B_{lp}^i t - L_{lp}^i - P_{lp}^i \quad (8)$$

式中, x_l 和 t 为内定标待解算参数, 分别为内定标参数向量和连接点物方坐标改正数向量; A_{lp}^i 、 B_{lp}^i 分别为相应未知数的系数矩阵; L_{lp}^i 和 P_{lp}^i 分别为相应的常数向量和权矩阵。

对于控制点而言, 由于其对应的物点坐标为已知值, 所构建的误差方程式中未知参数仅包括该像点所在 CCD 的内定标参数。其误差方程为线性方程, 可构建为

$$V_{cp}^i = A_{cp}^i x_l - L_{cp}^i - P_{cp}^i \quad (9)$$

式中, x_l 为内定标参数向量; A_{cp}^i 为内定标参数向量的系数矩阵; L_{cp}^i 和 P_{cp}^i 分别为对应的常数向量和权矩阵。

将控制点与连接点两类观测值所构建的误差方程合并, 可得到:

$$V = Ax_l + Bt - L - P \quad (10)$$

式中, $V = [V_{cp} \quad V_{lp}]^T$, $A = [A_{cp} \quad A_{lp}]^T$, $B = [0 \quad B_{lp}]^T$, $L = [L_{cp} \quad L_{lp}]^T$, $P = \begin{bmatrix} P_{cp} & 0 \\ 0 & P_{lp} \end{bmatrix}$ 。

(3) 内定标参数求解: 根据最小二乘平差原理, 可基于所有观测值的误差方程式, 构建多 CCD 多波段联合定标的法方程如下:

$$\begin{bmatrix} A^T P A & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P L \\ B^T P L \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, 待解算的未知参数包括所有待定标 CCD 影像的内定标参数 x_l 和所有连接点物方坐标的改正数 t 共两类。由于连接点物方坐标的改正数 t 的数量远远多于内定标参数 x_l , 为简化解算, 可以先通过消元法消去连接点物方坐标这一类待解参数, 构建仅包含内定标 x_l 的改化法方程, 如下:

$$x_l = M^{-1} W \quad (12)$$

其中,

$$M = A^T P A - A^T P B (B^T P B)^{-1} B^T P A$$

$$W = A^T P L - A^T P B (B^T P B)^{-1} B^T P L$$

以上参数的解算是一个迭代的过程。每次迭代中, 相机内定标参数均会被更新。在此基础上, 通过空间前方交会逐个计算各连接点的物方坐标, 并将其作为输入参与下一次平差解算。当连续两次解算趋于稳定时, 迭代解算结束。

(4) 观测值定权: 权重作为系数参与计算,

确保更可靠的观测值在平差过程中对最终结果产生更大影响。本文所提方法观测值包括控制点像点坐标和 CCD 间连接点像点坐标两类。控制点是保证定标结果绝对几何精度的唯一来源, 需通过高权重使其对定标结果产生主导作用。而对于片间连接点而言, 若其权重过低, 可能无法有效约束影像间的相对关系; 若权重过高, 可能抑制控制点的主导作用。为了保证两类观测值在定标过程中发挥有效作用, 应在待定标过程中根据残差和定标效果分析结果, 适当调整两类观测值的权重。

(5) 高程参考: 本文方法利用连接点增强了 CCD 间的几何一致性约束, 然而 CCD 影像的视场范围较小以及较小的基高比, 导致待定标 CCD 无法构成良好的几何交会结构, 呈现一种弱交会状态 (Teo 等, 2010)。然而, 在针对连接点构建的误差方程中, 未知参数不仅包含待解算的相机内定标参数, 还包括连接点对应的物方坐标, 并且相机内定标参数与连接点对应的高程值高度相关 (Yang 等, 2018)。因此, 当二者在定标解算中均为未知数时, 势必导致改化法方程系数矩阵的秩亏, 造成参数解算无法达到最优估计。另一方面, 在多光谱影像几何定标过程中, 需要利用参考波段进行前方交会得到控制点坐标, 参考 DEM 与实际高程之间的高程误差 ΔH 会导致前向交会中控制点坐标的不准确。因此, 为避免在定标过程中引入额外的误差以及保证内定标结果精度, 本文选取平地区域影像作为待定标影像, 并从参考 DEM (30 m-SRTM) 中插值高程 H , 将其视为连接点对应物点的真实高程。

(6) 粗差剔除: 由于在构建几何定标模型时, 所采用的部分观测值 (片间连接点) 是通过密集匹配算法自动匹配得到的, 在大量的匹配结果中不可避免地会出现误匹配点, 这将导致几何定标的精度和可靠性降低。因此, 必须对存在明显匹配误差的观测值进行检测与剔除。在内定标参数迭代解算过程中, 计算各连接点像点坐标的残差 (v_s 、 v_l), 并在行、列两个维度统计所有残差的平均值 (mean_{vs} 、 mean_{vl}) 和均方根误差 (rmse_{vs} 、 rmse_{vl})。以 3 倍的均方根误差作为阈值, 在每次迭代过程中将残差超过该阈值的观测值予以剔除, 直至待求解参数趋于稳定。粗差剔除

条件如下:

$$\begin{cases} |v_s - \text{mean}_{vs}| > 3 \cdot \text{rmse}_{vs} \\ |v_l - \text{mean}_{vl}| > 3 \cdot \text{rmse}_{vl} \end{cases} \quad (13)$$

3 结果与分析

3.1 实验数据

本文方法旨在解决稀疏地面控制点分布条件下, 集成32片CCD的大幅宽遥感影像在轨几何定标后影像绝对定位精度与片间拼接精度保障的问题。因此, 为验证所设计的几何定标模型与方法的有效性, 本文选取SVN301宽幅相机获取的全色影像数据, 在覆盖区域内利用RTK技术实测292个均匀分布的地面控制点, 开展在轨几何定标实验, 并将所得定标结果应用于其他非定标景影像, 以检验其可靠性与稳定性。本实验采用的定标影像位于中国新疆维吾尔自治区西部地区(42.88°N—43.37°N, 88.48°E—90.16°E), 成像时间为2024年5月23日。用于绝对定位精度检验的验证影像位于中国河北省中部(39.16°N—39.62°N, 115.47°E—117.07°E), 影像及地面控制点分布如图6所示。此外, 为评估相邻CCD间的拼接精度, 还选取了其余4景影像进行分析。

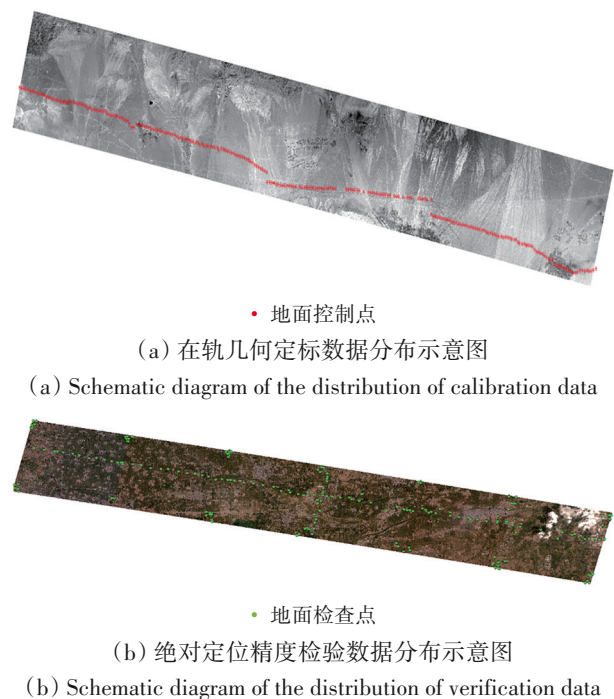


图6 定标与绝对定位精度检验数据分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the distribution of experimental data

3.2 定标精度分析

3.2.1 定标结果及分析

为进行在轨几何定标, 本文选取定标景影像全色波段的第15片CCD作为主片。基于高精度地面控制点, 采用严格几何模型解算卫星的内方位元素(内定标参数)和外方位元素(外定标参数)。其中, 通过地面控制点精确求解得到的外定标参数结果详见表2。分析表2中数据可见, 定标前卫星的姿态安装角存在明显的系统偏差, 特别是yaw角偏差达到了0.15°以上。定标后, 所有外方位元素均得到了显著修正: roll角由0.037245°修正至-0.00511009°; pitch角由-4.50582°修正至-4.64486°; yaw角则由0.155881°大幅修正至-0.0509392°。这表明本文所用方法有效解算了卫星的姿态安装误差, 为后续内定标参数的精确求解奠定了基础。

表2 外定标参数定标前后统计

Table 2 External calibration parameters of WFV camera / (°)

定标前后	外定标参数		
	roll	pitch	yaw
定标前	0.037245	-4.50582	0.155881
定标后	-0.00511009	-4.64486	-0.0509392

内部畸变曲线用于表征内定标结果相对于设计值的变化, 是评估内定标参数精度的常用方法。具体而言, 首先依据定标前的设计参数计算各CCD探元在相机坐标系中的指向角; 随后采用定标后的参数重新计算指向角, 并以定标前指向角为参照, 计算沿轨和垂轨方向的残差分布。考虑到SVN301宽幅相机CCD器件数量较多, 本文以外定标主片的第15片CCD为例, 绘制了内部畸变曲线(图7)及探元指向角正切值曲线(图8)。由图7可见, 定标后第15片CCD垂探元方向畸变基本为零, 而沿探元方向呈近似线性变化, 表明其内部畸变可能主要受在轨运行期间相机主距变化影响, 而高阶光学畸变影响有限。同时, 由图8可见全色波段第15片CCD的指向角正切值在沿探元与垂探元方向均呈现非线性特征。其中沿探元方向的曲线表现出显著的线性下降趋势且整体非线性程度更高, 表明该CCD所对应影像在列方向受光学镜头畸变影响较为明显, 与内部畸变曲线分析结果一致。

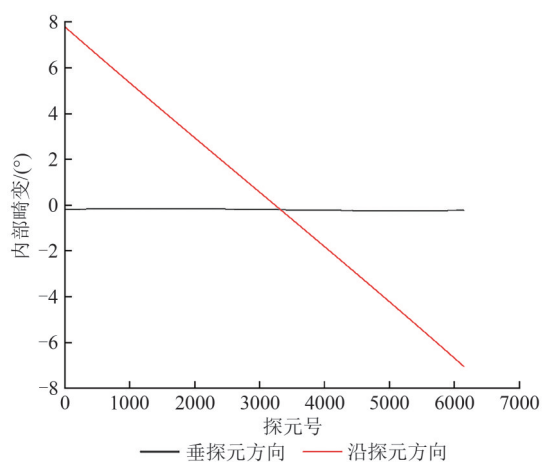


图7 全色波段 CCD 15 内部畸变曲线

Fig. 7 The internal distortion curve of CCD 15 in the panchromatic band

为验证本文方法在提升SVN301宽幅相机几何精度方面的有效性,利用获得的定标结果,采用地形无关的拟合方法为各CCD影像生成修正后的有理多项式系数RPC (Rational Polynomial Coefficients)。在此基础上,通过修正后RPC计算全部地面控制点的像方定位残差,并统计行、列方向的最大值(Max)、最小值(Min)及均方根误差RMSE (Root Mean Square Error),以综合评估定标精度,如图9所示。可以看出,经过在轨几何定标后,全色波

段各CCD在行、列方向上的地面控制点定位残差均方根误差(RMSE)均优于0.35像素,均值误差接近于0,表明宽幅相机全色波段的外部系统误差及各CCD内部畸变误差均已得到有效补偿。图10展示了定标后部分相邻CCD影像接边位置的拼接残差对比。可见定标后,相邻CCD影像在接边区域实现了平滑过渡,视觉上无明显接缝或错位现象,进一步验证了定标方法在提升影像几何一致性方面的有效性。

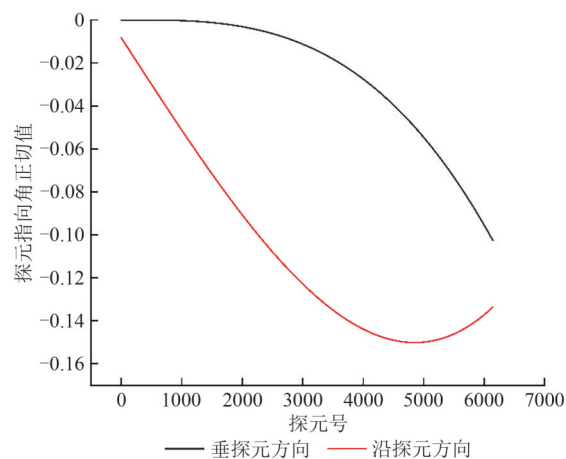
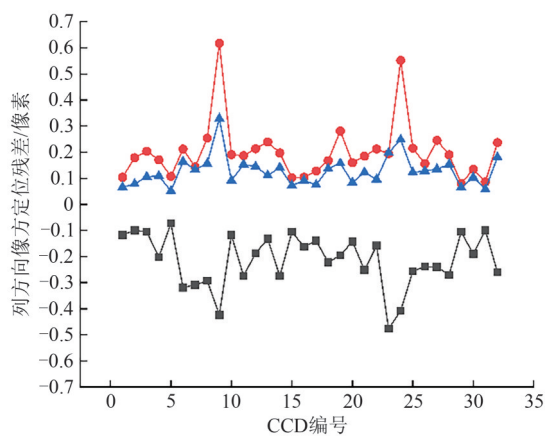


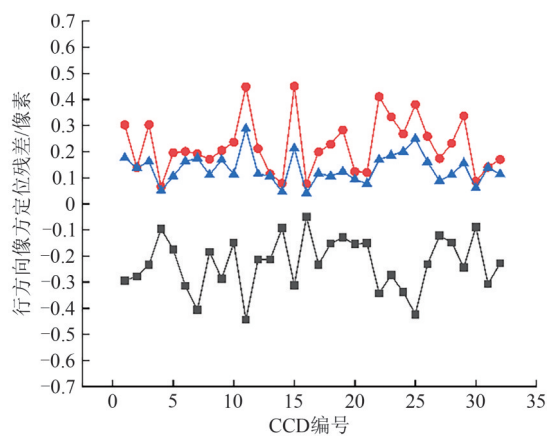
图8 全色波段 CCD 15 探元指向角正切值曲线

Fig. 8 The pointing angle tangent value curves of CCD 15 in the panchromatic band



(a) 列方向残差

(a) Geolocation residuals along The CCD



(b) 行方向残差

(b) Geolocation residuals across the CCD

—■— Min —●— Max —▲— RMSE

图9 不同方向控制点定位残差

Fig. 9 Geolocation residuals of GCPs

3.2.2 几何精度验证

为评估几何定标参数的可靠性与适用性,除对定标景的几何精度进行分析外,本文验证了SVN301

卫星在轨运行期间采集的非定标影像的几何精度。验证过程中,以在轨几何定标所获取的全色波段定标参数为基础,随机选取了5景不同时间成像的

影像验证定标结果的精度。5景影像成像时间的经纬度范围详见表3。如表所示，本文选用的5景验证影像成像时间分布于2024年6月—2025年6月，时间跨度长；地理上覆盖了中国多个不同区域（经度范围约107.5°E—117.1°E，纬度范围约33.8°N—39.7°N）。影像数据在时相和空间分布上的多样性，确保了后续几何精度验证结果的全面性和可靠性。

为保证绝对几何精度验证的代表性，同时考虑地面控制点布设的工作量，在5景验证影像中选取Image 1用于绝对定位精度验证，其余影像用于拼接精度评估。Image 1为经辐射校正、传感器拼接等处理后的一级标准产品。在该影像覆盖区域布设了地面靶标，并采用RTK技术获取高精度控制点坐标，作为几何精度分析的参考。随后，基于控制点实测数据，对Image 1进行了绝对定位精度分析，同时对其余4景影像开展了拼接精度评估。

表4汇总了验证影像Image1的定位精度与拼接精度的统计结果。可见：（1）行列方向绝对定位精度RMSE分别为2.66像素和1.37像素，最大误差分别为4.92像素和2.17像素，最小误差分别为0.02像素和0.38像素，这主要由于卫星在轨运行过程中所处的复杂环境，导致成像模型中引

入一定程度的随机误差，进而导致其绝对定位精度在不同成像时相之间出现波动；（2）CCD间拼接残差在列方向最大为0.29像素，行方向最大仅为0.20像素，整体波动范围较小。列方向和行方向的均方根误差分别为0.18像素和0.12像素，表明拼接整体精度控制较好，具备良好的接缝一致性。

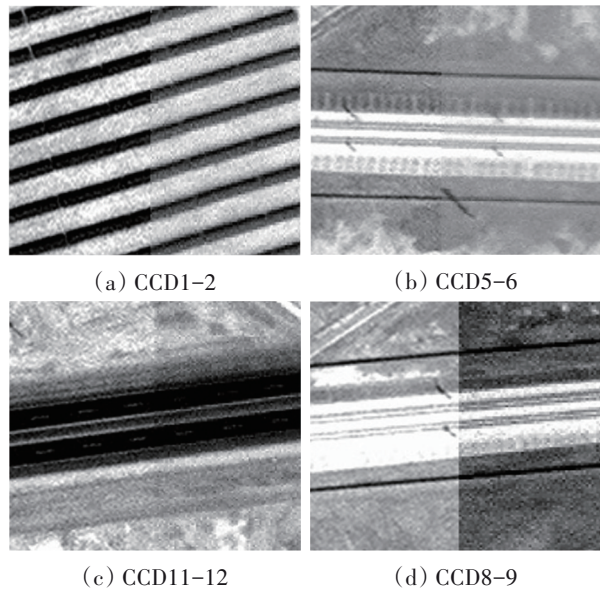


图10 全色波段相邻CCD局部配准效果
Fig. 10 The local effect of adjacent CCD registration in the panchromatic band

表3 验证影像成像时间及地理覆盖范围
Table 3 Imaging time and geographic extent of validation scenes

影像编号	成像日期	地理覆盖范围			
		左上角经度/(°E)	左上角纬度/(°N)	右下角经度/(°E)	右下角纬度/(°N)
Image 1	2024-06-03	115.4667	39.6193	117.0652	39.1623
Image 2	2025-03-17	114.7399	34.2841	116.1212	33.8034
Image 3	2025-05-01	115.4104	39.6251	116.8659	39.151
Image 4	2025-06-04	112.5999	38.0334	114.0487	37.536
Image 5	2025-06-27	107.5584	35.5303	108.9714	35.062

表4 验证影像几何定位精度 Table 4 The positioning accuracy of test images						
评估指标	列方向残差			行方向残差		
	/像素					
	Max	Min	RMSE	Max	Min	RMSE
绝对定位精度	4.92	0.02	2.66	2.17	0.38	1.37
拼接精度	0.29	0.10	0.18	0.20	0.10	0.12

在验证其余4景验证影像的拼接精度时，采用经过辐射校正各CCD分片影像和基于定标结果生

成的RPC参数进行分析，统计结果图11所示。可见，相较于定标影像与验证影像Image 1，这4景影像中各CCD间的拼接精度有所下降，最大拼接误差达到0.67像素。造成该现象的主要原因在于，验证景Image 2—Image 5的成像时间距定标景较远，加之卫星长期处于复杂的空间运行环境中，可能导致成像期间平台状态发生变化，从而在几何模型参数中引入一定误差。

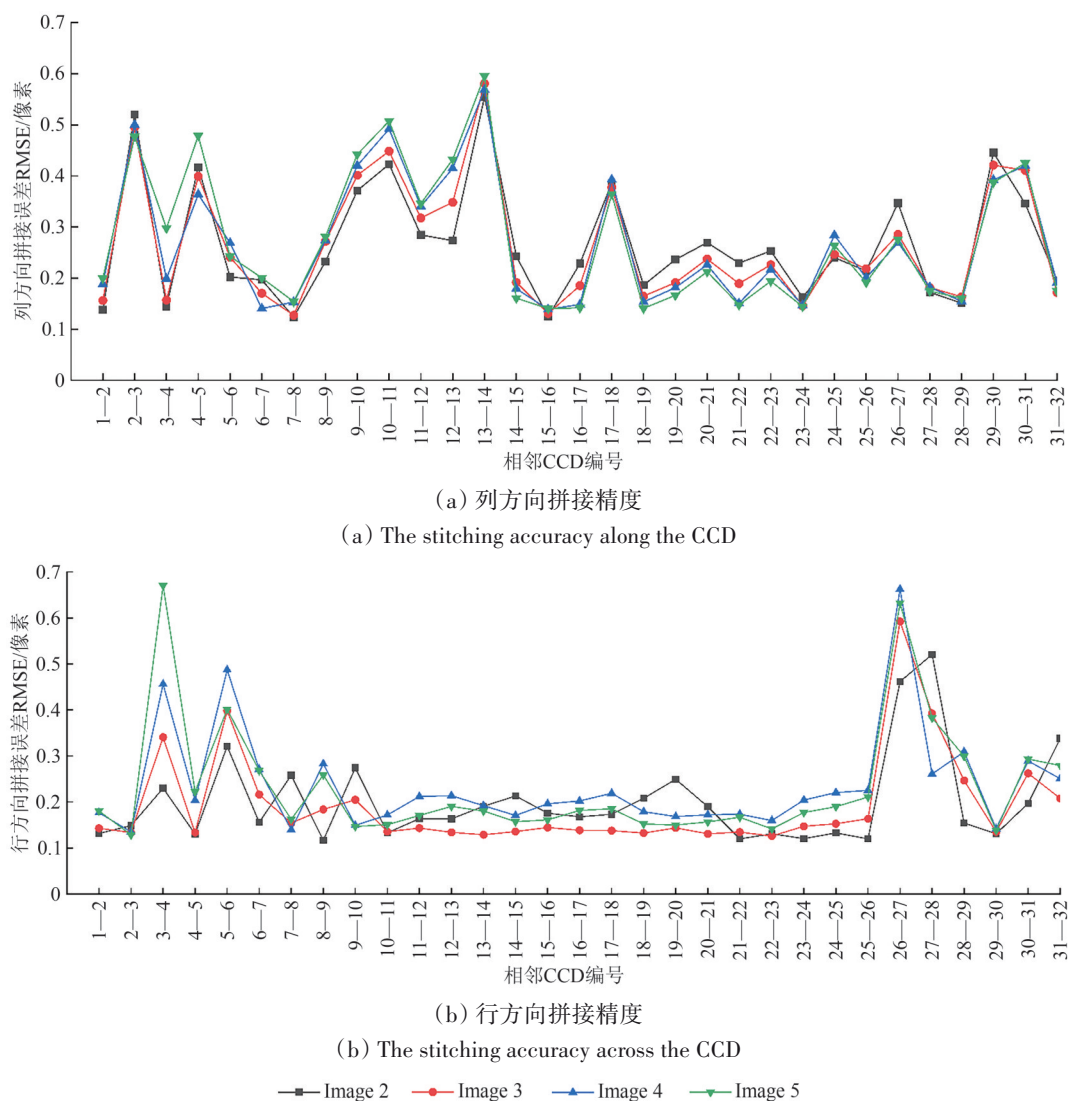


图 11 验证影像拼接精度

Fig. 11 The stitching accuracy of test images

4 结 论

针对SVN301宽幅相机通过32片TDI CCD视场拼接实现大幅宽覆盖的特性,本文以控制点影像坐标与连接点影像坐标为观测值,构建融合绝对控制约束与相对控制约束的多CCD联合定标模型。主要结论如下:

(1) 针对SVN301宽幅相机约100像素的狭窄片间重叠区域,本文所采用的特征匹配结合模板匹配策略,能够克服弱纹理与重复纹理干扰,实现稳定、高精度的片间连接点提取。

(2) 经多时相、多区域的在轨影像数据验证,本文方法可将SVN301宽幅影像的绝对定位精度RMSE提升至优于3像素,相邻CCD影像间拼接精度控制在0.3像素左右,有效消除了片间系统性几

何畸变。

(3) 本文构建的融合绝对与相对约束的联合定标模型,适用于采用32片CCD视场拼接的SVN301宽幅相机在轨几何定标,可有效保障其影像的绝对定位精度与多CCD间的无缝拼接。

结果表明,所提方法能够有效补偿系统几何误差与片间几何畸变误差,具备较高的几何精度和片间一致性,验证了本方法在轨几何定标的有效性。

志 谢 此次野外实验的数据获取得到了中国四维测绘技术有限公司的支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

Adiri Z, Lhissou R, El Harti A, Jellouli A and Chakouri M. 2020. Re-

- cent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: a review of Landsat-8 and Sentinel-2 applications. *Ore Geology Reviews*, 117: 103332 [DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103332]
- Bouillon A, Breton E, De Lussy F, et al. SPOT5 HRG and HRS first in-flight geometric quality results[C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI. SPIE, 2003, 4881: 212-223 [DOI:10.1117/12.462637]
- Cheng Y F, J S Y, Wang M, Zhu Y and Dong Z P. 2017. A new image mosaicking approach for the multiple camera system of the optical remote sensing satellite GaoFen1. *Remote Sensing Letters*, 8(11): 1042-1051 [DOI: 10.1080/2150704X.2017.1349960]
- Dai R F, Han J Y, Wang M, Cao J S, Jin S Y and Sun C R. 2023. On-orbit geometric calibration of HY-1C satellite coastal zone imager. *Journal of Marine Meteorology*, 43(4): 62-70 (戴荣凡, 韩静雨, 王密, 曹金山, 金淑英, 孙从容. 2023. 海洋一号C卫星海岸带成像仪在轨几何定标. *海洋气象学报*, 43(4): 62-70) [DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.007]
- Grodecki J, Dial G. IKONOS geometric accuracy validation[J]. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 2002, 34(1): 50-55
- Hu Z L, Zheng K, Zhang Y and Tao P J. 2017. On-orbit geometric calibration based on digital calibration field for TH-1 satellite. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 38(5): 86-95 (胡振龙, 郑柯, 张勇, 陶鹏杰. 2017. 基于数字检校场的“天绘一号”卫星在轨几何定标. *航天返回与遥感*, 38(5): 86-95) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2017.05.011]
- 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]
- Li M M, Stein A, Bijker W and Zhan Q M. 2016. Urban land use extraction from Very High Resolution remote sensing imagery using a Bayesian network. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122: 192-205 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.10.007]
- Lu X L, Wang J R, Yang X C, Lü Y, Hu Y, Wei Y Q and Cao B C. 2023. High-precision on-orbit geometric calibration of the GF-14 satellite dual-line-array cameras. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(1): 15-21 (卢学良, 王建荣, 杨秀策, 吕源, 胡燕, 魏永强, 曹彬才. 2023. 高分十四号卫星双线阵相机高精度在轨几何标定. *测绘学报*, 52(1): 15-21) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20220347]
- Peng X L, He G J, She W Q, Zhang X M, Wang G Z, Yin R Y and Long T F. 2022. A comparison of random forest algorithm-based forest extraction with GF-1 WFV, Landsat 8 and Sentinel-2 images. *Remote Sensing*, 14(21): 5296 [DOI: 10.3390/rs14215296]
- Pi Y D, Xie B R, Yang B, Zhang Y L, Li X and Wang M. 2019. On-orbit geometric calibration of linear push-broom optical satellite only using sparse GCPs. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(2): 216-225 (皮英冬, 谢宝蓉, 杨博, 张映玲, 李欣, 王密. 2019. 利用稀少控制点的线阵推扫式光学卫星在轨几何定标方法. *测绘学报*, 48(2): 216-225) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180332]
- Shimada M, Tadono T and Rosenqvist A. 2010. Advanced land observing satellite (ALOS) and monitoring global environmental change. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 780-799 [DOI: 10.1109/JPROC.2009.2033724]
- Takaku J, Tadono T, Ohgushi F and Doutsu M. 2022. Geometric calibration and DSM processing for ALOS-3 optical imageries//Proceedings of 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur: IEEE: 4835-4838 [DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884769]
- Teo T A, Chen L C, Liu C L, Tung Y C and Wu W Y. 2010. DEM-aided block adjustment for satellite images with weak convergence geometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(4): 1907-1918 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2033935]
- Wang M, Cheng Y F, Chang X L, Jin S Y and Zhu Y. 2017. On-orbit geometric calibration and geometric quality assessment for the high-resolution geostationary optical satellite GaoFen4. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 125: 63-77 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.01.004]
- Wang M, Cheng Y F, Guo B B and Jin S Y. 2019a. Parameters determination and sensor correction method based on virtual CMOS with distortion for the GaoFen6 WFV camera. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 156: 51-62 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.08.001]
- Wang M, Guo B B, Zhu Y, Cheng Y F and Nie C H. 2019b. On-orbit calibration approach based on partial calibration-field coverage for the GF-1/WFV camera. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 85(11): 815-827 [DOI: 10.14358/pers.85.11.815]
- 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 (in Chinese)*, 24(4): 345-351 (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) [DOI: 10.11834/jrs.20209198]
- Wu H Y, Chen G Z, Bai Y, Peng Y, Ba Q Q, Huang S, Zhong X, Sun H J, Zhang L and Feng F Y. 2024. On-orbit geometric calibration and accuracy validation of the jilin1-KF01B wide-field camera. *Remote Sensing*, 16(20): 3893 [DOI: 10.3390/rs16203893]
- Xu S Q, Li S J, Tao Z, Song K S, Wen Z D, Li Y and Chen F F. 2022. Remote sensing of chlorophyll-a in Xinkai Lake using machine learning and GF-6 WFV images. *Remote Sensing*, 14(20): 5136 [DOI: 10.3390/rs14205136]
- Yang B, Pi Y D, Li X and Wang M. 2018. Relative geometric refinement of patch images without use of ground control points for the geostationary optical satellite GaoFen4. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(1): 474-484 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2750320]
- Yang B, Pi Y D, Li X and Yang Y H. 2020. Integrated geometric self-calibration of stereo cameras onboard the ZiYuan-3 satellite. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 162: 173-183 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.02.015]

On-orbit geometric calibration and accuracy verification of a multi-CCD field-stitched wide-field camera

MENG Weican¹, WANG Taiping², WANG Yuhao³, GENG Zemin²

1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100101, China;

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

3. China Siwei Surveying and Mapping Technology Co. Ltd., Beijing 100408, China

Abstract: The Gaojing-3 01 satellite (SVN301) is equipped with a wide-field-view (WFOV) camera, which integrates 32 time-delay integration charge-coupled devices (TDI CCDs) per spectral band, covering a swath of 130 km with narrow overlaps of approximately 100 pixels between adjacent CCDs. Ensuring high absolute geolocation accuracy and seamless inter-CCD mosaicking under sparse ground control point (GCP) conditions is a critical challenge for wide-field photogrammetric applications. To address this issue, this study proposes a multi-CCD joint on-orbit geometric calibration method that integrates absolute and relative geometric constraints. The method applies a dual-step strategy of feature point matching followed by template-based refinement to automatically extract high-precision tie points in the narrow overlapping regions between CCDs. This approach captures subtle relative geometric discrepancies among CCDs that cannot be fully resolved by template matching alone, particularly in areas with complex surface topography or minor radiometric variations. Subsequently, a joint calibration model is formulated by treating uniformly distributed GCPs as absolute geometric references and the inter-CCD tie points as relative constraints. The model allows global optimization of the interior orientation parameters of all 32 CCDs simultaneously, ensuring a coherent and consistent geometric solution across the entire wide-field imagery.

Extensive experiments are conducted using real SVN301 imagery in combination with high-accuracy RTK-surveyed control points to validate the proposed approach. Results demonstrate that the method effectively compensates for systematic geometric distortions inherent in the camera system and enhances absolute geolocation and relative inter-CCD consistency. After calibration, the absolute positioning accuracy of the SVN301 wide-swath imagery is higher than 3 pixels, confirming reliable georeferencing, and the inter-CCD mosaicking accuracy is controlled within 0.3 pixels, achieving seamless image integration and validating the effectiveness of internal geometric consistency control. The integration of sparse GCPs with inter-CCD tie points provides robust performance even in areas with limited ground reference coverage, highlighting the practical applicability of the method for operational satellite photogrammetry.

In summary, the proposed multi-CCD joint geometric calibration method effectively addresses the challenges associated with wide-field TDI CCD cameras that feature multiple sensors with narrow inter-CCD overlaps. By integrating absolute GCP constraints with relative inter-CCD tie points, the method enables the design and implementation of an effective on-orbit geometric calibration procedure that compensates for systematic camera errors and relative inter-CCD distortions, thus achieving high absolute geolocation accuracy and superior inter-CCD mosaicking precision. Experimental results demonstrate that the method is reliable and feasible, and it can be used for operational on-orbit geometric calibration of wide-swath satellite imagery. This approach has remarkable potential for application in national land resource monitoring, emergency response, and other operational scenarios where geometric accuracy and internal image consistency are critical.

Key words: SVN301, sub-meter resolution Wide-Field-View (WFOV) camera, multi-CCD field-of-view stitching, on-orbit geometric calibration, relative constraints, absolute positioning accuracy, stitching accuracy

Supported by General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 42471481); Independent Research Project of Civil Industry, China Aerospace Science and Technology Corporation (No. 2023039)