

文章编号 1004-924X(2023)09-1390-14

基于高频修正姿态的高分辨率光学卫星全色与 多光谱影像几何定位一致性修正

白 杨^{1,2}, 武红宇^{1*}, 王灵丽¹, 巴倩倩¹, 彭 颖¹, 钟 兴¹, 叶中付², 陈关州³

(1. 长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130000;

2. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 安徽 合肥 230026;

3. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要:针对具有高姿态测量精度、高姿态稳定度且探测器采用机械式交错拼接的光学卫星受到微量高频姿态误差影响时,所产生的全色数据与多光谱数据间微小几何定位误差问题,提出了基于高频修正姿态的高分辨率光学卫星全色与多光谱影像几何定位一致性修正方法。在推扫式光学遥感卫星成像原理的基础上建立严密成像几何模型,利用机械式交错拼接成像探测器的分时成像特性,结合几何定位约束及金字塔影像搜索策略的同名点匹配方法获取同名点数据,再利用同名点数据解算卫星成像过程中的高频姿态数据。最后,将解算得到的高频姿态用于对应多光谱影像的传感器几何校正处理中,得到基于高频修正姿态的多光谱影像数据。实验结果表明:该方法有效消除了由微量高频姿态误差引起的全色数据与多光谱数据间微小的几何定位偏差,使传感器几何校正后的多光谱数据与全色数据具有高精度几何定位一致性,将具有高姿态测量精度、高姿态稳定度且探测器采用机械式交错拼接的高分辨率推扫模式成像光学卫星的全色数据与多光谱数据间行方向的相对几何定位误差提升至0.15个多光谱像元,以为后续高精度影像融合产品的生产奠定基础。

关键词: 高分辨率光学卫星;机械式交错拼接;微量高频姿态误差;几何定位一致性

中图分类号:P237 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20233109.1390

High-resolution optical satellite panchromatic and multispectral image geometric positioning consistency correction based on high frequency correction attitude

BAI Yang^{1,2}, WU Hongyu^{1*}, WANG Lingli¹, BA Qianqian¹, PENG Ying¹, ZHONG Xing¹,

YE Zhongfu², CHEN Guanzhou³

(1. Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd., Changchun 130000, China;

2. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, China;

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

* Corresponding author, E-mail: wuhongyu@whu.edu.cn

Abstract: There are small geometric positioning errors between panchromatic data and multispectral data

收稿日期:2022-07-16;修订日期:2022-08-22.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFE0127000)

when optical satellites, which have high attitude measurement accuracy, high attitude stability, and detectors using mechanical staggered stitching, are affected by slight high-frequency attitude errors. In this paper, a high-resolution optical satellite panchromatic and multispectral image geometric positioning consistency correction method based on the high-frequency corrected attitude is proposed to address this problem, and the proposed method is validated by in-orbit satellite data. First, a rigorous geometric model is realized according to the principle of the push-broom satellite. Second, the time-sharing imaging characteristics between mechanical staggered stitching detectors are used to obtain the homonymous image point data by combining geometric positioning constraints and the matching method of the pyramid image search strategy, and the homonymous image point data are used to obtain the high-frequency attitude data in the satellite imaging process. Finally, the obtained high-frequency attitude data are used in the sensor geometry correction processing of multispectral images to obtain multispectral image data corrected by the high-frequency corrected attitude. The results indicate that the proposed method effectively eliminates the small geometric positioning error between panchromatic and multispectral data caused by the slight high-frequency attitude error, so that the geometrically corrected multispectral and panchromatic data have high-precision geometric positioning consistency. The proposed method can improve the relative geometric positioning error in the row direction between the panchromatic and the multispectral data to better than 0.15 pixel of the multispectral image, which lays a solid foundation to produce high-precision image fusion products for high-resolution optical satellites with high attitude measurement accuracy, high attitude stability, and mechanical staggered stitching detectors.

Key words: high-resolution optical satellite; mechanical staggered stitching; slight high-frequency attitude errors; geometric positioning consistency

1 引言

高分辨率卫星影像是国土资源普查、地形测绘、灾害应急、国防建设等国家重大任务的信息支撑,我国对高分辨率光学遥感卫星影像数据有着旺盛需求^[1]。高精度几何定位是发挥高分辨率卫星性能的前提^[2],国际上已经逐步实现了高分辨率卫星遥感影像的高精度几何定位,法国 SPOT 卫星无控定位精度达到了 50 m^[3],美国的 IKONOS 卫星无控定位精度达到了 12 m^[4],Geoeye-1 以及 WorldView-1-3 无控定位精度优于 4 m^[5-7]。在国家“高分专项”等项目的支持下,我国遥感卫星在轨几何定位精度也取得了重大进展。杨博等实现了资源一号 02C 卫星全色相机无控定位精度 100 m 左右^[8];蒋永华等实现了三号无控定位精度优于 20 m^[9];王密等将高分五号可见短波红外高光谱影像的无控定位精度提升到 60 m^[10];武红宇等将吉林一号宽

幅 01 星宽幅相机影像无控定位精度提升到 20 m 以下^[11]。

无控定位精度的提高得益于卫星设计与制造工艺的提升、星敏与 GPS 测量器件精度的提升以及地面数据处理算法的完善,但目前高分辨率遥感卫星仍然面临着姿态下传频率较低(0.25~8 Hz)的问题,同时多数卫星平台的姿态稳定度仅能控制在 0.001 (°)/s,无法被采样的姿态变化造成高频姿态误差。高频姿态误差的来源主要包括卫星姿态量化精度低、姿态测量频率低和卫星平台震颤等。其中,王密等对平台震颤姿态确定、姿态误差检测与建模以及震颤畸变校正等关键技术进行了阐述^[12]。朱映等利用多光谱影像分时成像特性检测资源三号卫星平台震颤,证明了资源三号卫星存在约 0.6 Hz 的平台震颤,该震颤引起波段间周期性配准误差^[13]。王密^[14]、胡堃^[15]、许斌等^[16]通过星载高频角位移器对遥感卫星进行了高频姿态补偿。李山山等定量分析了

Landsat-8 对高频抖动姿态对谱段间配准造成的误差^[17]。蒋永华利用机械拼接相邻探测器间分时成像特性,进行了高频姿态探测与补偿,实现了 ZY1-02C 相机数据的无缝拼接^[18]。

对于采用机械拼接的卫星,品字型探测器设计使得相机对地成像时同一时间获取的影像不共线,相邻探测器获取的相同地物的影像具有一定的时间差,是在卫星处于不同位置、时间、姿态及视角下获取的,若成像过程中存在高频误差则会导致全色与多光谱影像内部相邻探测器影像间存在拼接缝、多光谱影像存在伪彩色以及全色影像与多光谱影像间存在几何定位偏差,因此,采用机械拼接的卫星更易受到高频姿态误差的影响。

随着卫星技术的发展,卫星的姿轨测量精度与整星稳定度得到了大幅提升,具有高姿态测量精度和平台稳定度的卫星受高频误差的影响较小,可以保证数据产品无拼接缝,且全色与多光谱数据具有一致的几何定位精度。但当卫星姿态测量精度下降或卫星受到偶发扰动时,其数据产品中全色影像会出现约 1~2 个全色像元的拼接缝,与此同时,该高频误差对多光谱数据图像质量无影响,即多光谱数据无拼接缝且具有高精度的谱段间配准精度(优于 0.5 个多光谱像元),但全色与多光谱数据间存在随时间变化的微小几何定位偏差。本文将这种高频误差定位为微量高频误差,针对具有高姿态测量精度、高姿态稳定度且探测器采用机械式交错拼接的光学卫星存在的微量高频误差提出基于高频修正姿态的高分辨率光学卫星全色与多光谱影像几何定位一致性修正方法,用以消除微量高频误差对多光谱数据隐性的几何定位精度影响,即消除全色数据与多光谱数据间存在的时变性微小几何定位偏差,并通过在轨卫星数据证明了本文提出方法的有效性。

2 原理

基于高频修正姿态的高分辨率光学卫星全色与多光谱影像几何定位一致性修正方法的整

体流程如图 1 所示。该方法利用全色影像相邻探测器分时成像特性提取高频姿态,并将该姿态用于全色与多光谱数据的传感器几何校正,一次性解决由微量高频误差引起的全色影像拼接缝以及全色数据与多光谱数据间存在的时变性微小几何定位偏差。

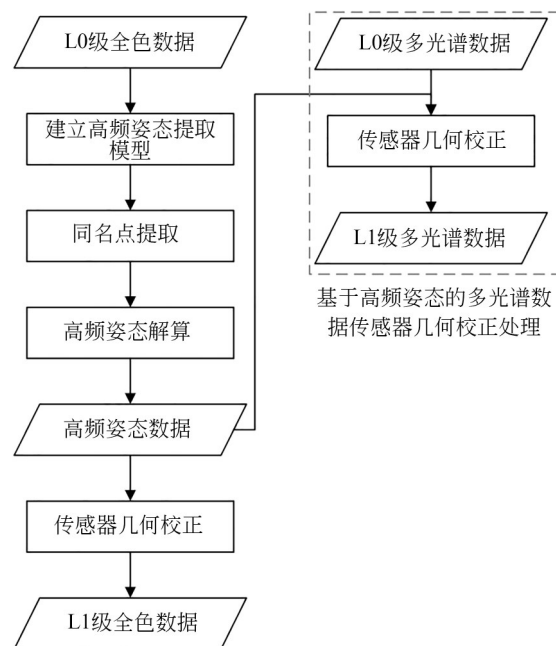


图 1 基于高频修正姿态的高分辨率光学卫星全色与多光谱影像几何定位一致性修正方法流程

Fig. 1 Flow chart of high resolution optical satellite panchromatic and multispectral image geometric positioning consistency correction method based on high frequency correction attitude

2.1 基于全色影像相邻探测器分时成像的高频姿态提取

卫星探测器采用机械式交错拼接,品字型设计使得相机对地成像时同一时间获取的影像不共线,如图 2 所示。相邻探测器间获取的相同地物 P 的影像 P_1 与 P_2 存在一定的时间差,即 P_1 与 P_2 为卫星处于不同的位置、时间、姿态及视角下拍摄的 P 点的像。依据卫星严密几何模型,利用 P_1 与 P_2 可以分别求解出 P 点的物方坐标,如下:

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}_{t_0} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}_{t_0} + m \left(\mathbf{R}_{J2000}^{WGS84} \mathbf{R}_{body}^{J2000} \right)_{t_0} \mathbf{R}_u \mathbf{R}_{camera}^{body} \begin{bmatrix} x_{p_1} \\ y_{p_1} \\ -f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

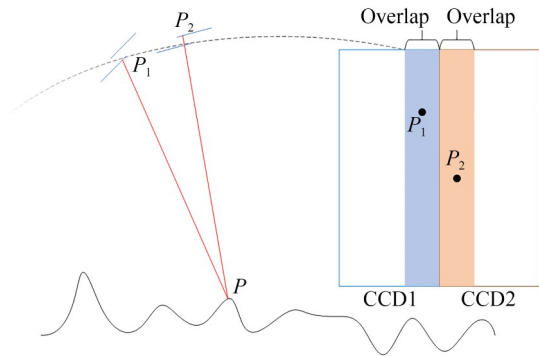


图 2 探测器搭接区域成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging process of overlap area between adjacent detectors

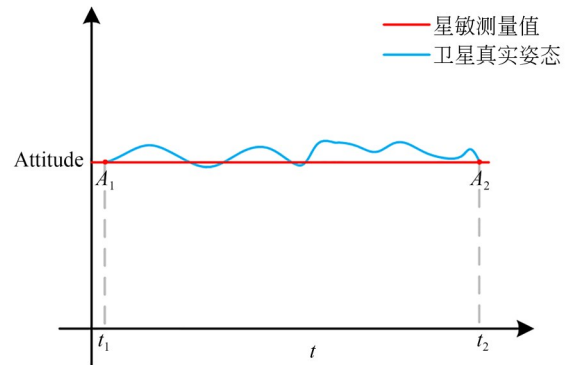


图 3 姿态测量误差

Fig. 3 Attitude measurement error

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}_{t_1} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}_{t_1} + m \left(R_{J2000}^{WGS84} R_{body}^{J2000} \right)_{t_1} R_u R_{camera}^{body} \begin{bmatrix} x_{p_2} \\ y_{p_2} \\ -f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $[X_s \ Y_s \ Z_s]_{t_0}^T, [X_s \ Y_s \ Z_s]_{t_1}^T$ 分别是 t_0 和 t_1 时刻 GPS 相位中心在 WGS84 坐标系下的位置矢量, $(R_{J2000}^{WGS84})_{t_0}, (R_{J2000}^{WGS84})_{t_1}$ 分别是 t_0 和 t_1 时刻 J2000 坐标系到 WGS84 坐标系的旋转矩阵, $(R_{body}^{J2000})_{t_0}, (R_{body}^{J2000})_{t_1}$ 分别是 t_0 和 t_1 时刻卫星本体坐标系到 J2000 坐标系的旋转矩阵, R_u 是通过在轨几何定标获得的常量偏置矩阵, R_{camera}^{body} 是相机坐标系到卫星本体坐标系的旋转矩阵, $[x_{p_1} \ y_{p_1} \ -f]^T, [x_{p_2} \ y_{p_2} \ -f]^T$ 分别是 P_1 与 P_2 在相机坐标系下的坐标, f 是相机主距, 最后得到的 $[X \ Y \ Z]_{t_0}^T, [X \ Y \ Z]_{t_1}^T$ 是利用 P_1 与 P_2 点相关信息求解得到的 P 点在 WGS84 坐标系下的位置矢量。

当卫星受到扰动或卫星姿态变化未被记录时, $t_0 \sim t_1$ 时刻卫星的姿态变化将无法恢复, 如图 3 所示。 $[X \ Y \ Z]_{t_0}^T, [X \ Y \ Z]_{t_1}^T$ 不再对应同一个物方点, 即 $[X \ Y \ Z]_{t_0}^T \neq [X \ Y \ Z]_{t_1}^T$, 这会引入多探测器拼接影像上出现拼接缝, 如图 4 所示。

为了消除定位误差, 则需要补偿 $t_0 \sim t_1$ 间未测量到的姿态变化, 因此以 t_0 时刻求解的 $[X \ Y \ Z]_{t_0}^T$ 作为物方控制点, 对 P_2 点建立带有



图 4 拼接缝示意图

Fig. 4 Schematic diagram of splice seam

姿态补偿模型的严密几何模型, 如下^[18-19]:

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}_{t_0} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}_{t_1} + m \left(R_{J2000}^{WGS84} R_{body}^{J2000} \right)_{t_1} R_{correct} R_u R_{camera}^{body} \begin{bmatrix} x_{p_2} \\ y_{p_2} \\ -f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: $R_{correct}$ 为 t_1 时刻的姿态补偿矩阵, 其形式如下:

$$R_{\text{correct}} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{t_1} & 0 & \sin \varphi_{t_1} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_{t_1} & 0 & \cos \varphi_{t_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_{t_1} & -\sin \omega_{t_1} \\ 0 & \sin \omega_{t_1} & \cos \omega_{t_1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \kappa_{t_1} & -\sin \kappa_{t_1} & 0 \\ \sin \kappa_{t_1} & \cos \kappa_{t_1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中： φ_{t_1} 、 ω_{t_1} 、 κ_{t_1} 分别为 t_1 时刻卫星本体坐标系下绕 y 轴、绕 x 轴、绕 z 轴的姿态补偿旋转角。为求解 R_{correct} 需在地面点 P 在相邻探测器成像时刻 t_0 与 t_1 的影像上获得 2 个以上的同名点，用于求解 R_{correct} ，因此，通过影像匹配获得同名点成为高频姿态误差求解的关键。

2.2 基于几何定位约束及金字塔影像搜索策略的同名点匹配

为了求解 R_{correct} ，需要通过对相邻探测器间搭接区域的影像进行匹配获得同名点，搭接区如图 5 所示。本文采用基于几何定位约束的方式获取重叠区的沿轨错位和垂轨重叠，如图 6 所示，在探测器边缘选取一系列点，并对点集合内的点逐一建立严密几何定位模型，结合 DEM 数据通过式(5)实现相邻探测器间的坐标转换，即：

$$(x_1 \ y_1) \rightarrow (Lon \ Lat \ H) \rightarrow (x'_1 \ y'_1). \quad (5)$$

式中： x_1 和 y_1 分别为探测器 1 图像坐标系下像点的列坐标与行坐标， Lon, Lat, H 分别为像点对应物方坐标系下的经度、纬度与高程值， x'_1 和 y'_1 分

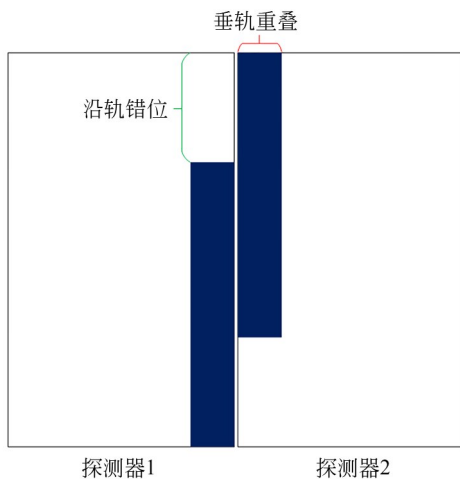


图 5 相邻探测器间重叠区影像

Fig. 5 Overlap area between adjacent detectors

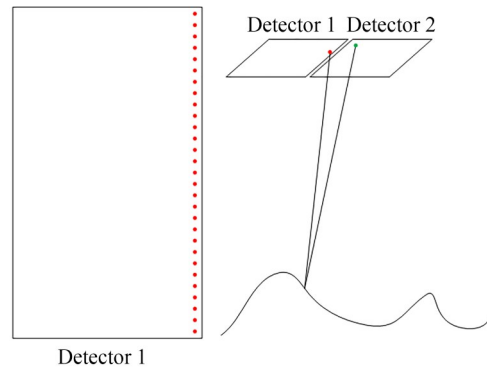


图 6 重叠区影像坐标转换示意图

Fig. 6 Coordinate conversion of overlapping area image

别为计算得到的探测器 2 图像坐标系下像点的列坐标与行坐标。最终对点集合的计算结果取均值得到沿轨错位和垂轨重叠，进而提取出重叠区影像用于匹配得到同名点。

受限于探测器机械拼接成像时的视角差和基于几何约束获取沿轨错位和垂轨重叠的解算误差，获取的重叠区影像间相同地物在图像间存在一定的偏差。当偏差大于后续的匹配搜索窗口时则匹配失败，因此，本文通过对重叠区影像建立金字塔影像进行由粗到细的快速匹配，获得重叠区影像间在列方向与行方向的整体偏移量 x_{offset} 和 y_{offset} 作为匹配窗口的先验值。

如图 7 所示，基于几何定位约束及金字塔影像搜索策略的同名点匹配步骤如下：

(1) 按照一定间隔取探测器边缘图像点坐标构成点集合；

(2) 对点集合内的点逐点构建严密几何模型，结合 DEM 数据实现相邻探测器间的坐标转换，得到沿轨重叠与垂轨错位值，进而获得相邻探测器间的重叠区影像；

(3) 对重叠区影像进行基于金字塔影像的影像匹配，获得重叠区影像间在列方向与行方向的整体偏移量 x_{offset} 和 y_{offset} ；

(4) 对重叠区影像提取 Harris 特征点 (x_i, y_i) ，以 $(x_i + x_{\text{offset}}, y_i + y_{\text{offset}})$ 为待匹配点搜索中心，进行基于灰度相关匹配；

(5) 对基于灰度相关匹配获得同名点进行最小二乘匹配，得到最终的子像素级匹配点。

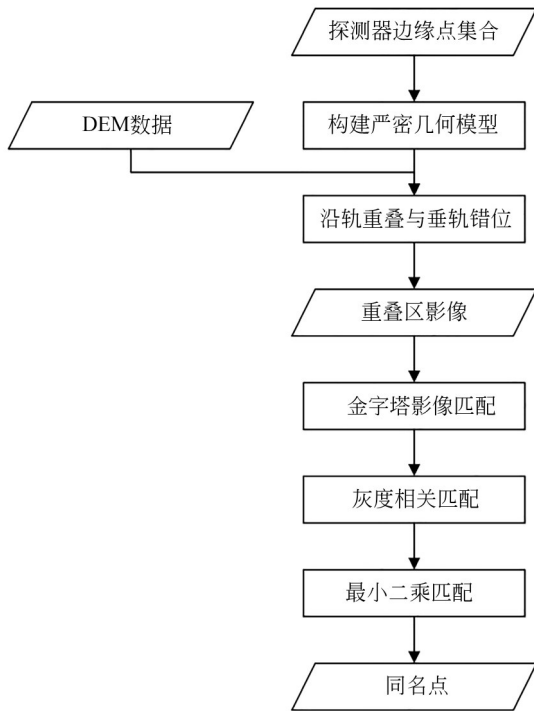


图 7 相邻探测器重叠区同名点提取流程

Fig. 7 Flow chart of extracting homonymous image points from overlapping area of adjacent detectors

2.3 基于高频姿态的多光谱数据几何定位误差修正

高姿态测量精度、高姿态稳定度的机械拼接高分辨率遥感卫星在受到微量高频误差影响时,其多光谱影像仍能实现无缝拼接及高精度的谱段间配准精度,但多光谱影像与全色影像间存在时变性的微小几何定位偏差,因此在多光谱传感器校正产品中,用基于全色影像分时成像特性提取的高频姿态数据取代星上下传低频姿态数据进行传感器几何校正,处理流程如图 8 所示。该流程中利用高频姿态数据来逐行构建多光谱数据的严密几何成像模型,并将模型用于多光谱数据的传感器几何校正中,获得多光谱传感器几何校正产品及对应的 RPC 几何定位模型。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据

为了验证本文方法的正确性,选取某型号卫星的数据进行实验,该卫星探测器采用机械拼接

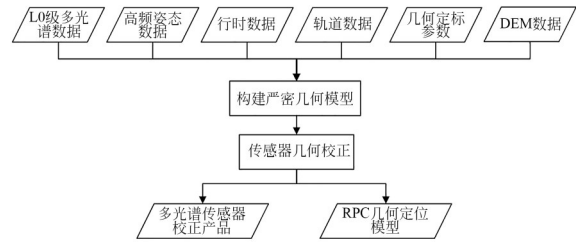


图 8 基于高频姿态的多光谱数据几何校正流程

Fig. 8 Flow chart of geometric correction of multispectral data based on high-frequency attitude

方式,姿态稳定度优于 $0.000\ 067\ (^{\circ})/s$,能够保证日常获取的影像质量,但在偶然受到微量高频误差影响时,全色与多光谱数据会产生微小的几何定位偏差,如图 9 所示。

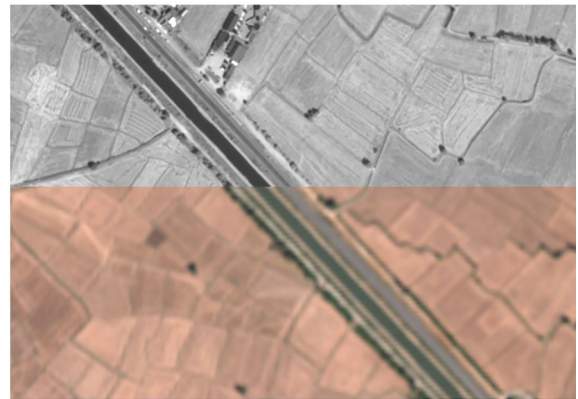


图 9 全色与多光谱数据微小几何定位偏差

Fig. 9 Tiny geometric positioning errors between panchromatic and multispectral data

实验采用受到微量高频误差影响的两组数据,如表 1 所示。如图 10 所示,两组实验数据中全色数据存在轻微拼接缝(约 1~2 个全色像元),多光谱数据不存在拼接缝,且谱段间具有高精度的谱段间配准精度(优于 0.3 个多光谱像元),如表 2 所示,该现象符合本文定义的微量高频误差。

表 1 实验数据信息

Tab. 1 Experimental data information

数据 ID	成像日期	侧摆角/ ($^{\circ}$)	中心点经纬度
1	2021-09-05	0.00	(4.625, 43.695)
2	2022-01-08	2.99	(111.317, 21.6135)

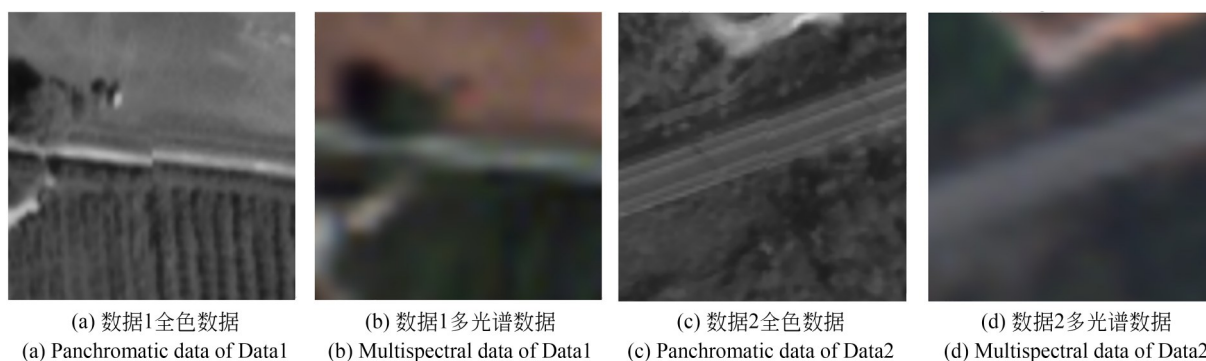


图 10 相邻探测器拼接缝

Fig. 10 Splice seam between adjacent detectors

表 2 波段间配准精度统计

Tab. 2 Statistics of band-to-band registration accuracy

(pixel)

数据 ID	红-蓝		红-绿		红-近红	
	垂轨	沿轨	垂轨	沿轨	垂轨	沿轨
1	0.079 268	0.079 918	0.057 143	0.057 347	0.183 665	0.183 384
2	0.066 024	0.066 238	0.048 061	0.048 472	0.153 841	0.151 959

对两组数据的全色与多光谱数据进行影像匹配获得同名点,再通过几何定位模型求得两者的相对定位误差,结果如图 11 和图 12 所示。从图中可以看出,两组数据在列方向相对定位误差均匀分布,但行方向上的相对定位误差随时间偏移,表明几何定位存在时变性偏差。其中,数据 1 列方向的相对定位误差为 0.375 9 个多光谱像素,数据 2 列方向的相对定位误差为 0.202 6 个多光谱像素。

3.2 实验结果及分析

本文通过基于全色影像相邻探测器分时成像特性提取高频姿态,用于补偿由于微量高频误差造成的未能被定姿系统测量记录的姿态数据,并将该姿态数据用于全色影像与多光谱影像的传感器几何校正。两组数据提取的高频姿态和星上下传的原始姿态如图 13 和图 14 所示,从图中可以看出,高频姿态整体上与星上下传姿态的趋势一致,通过 y 轴姿态角局部细节发现高频姿态反映了未测量到的细小波动。使用高频姿态

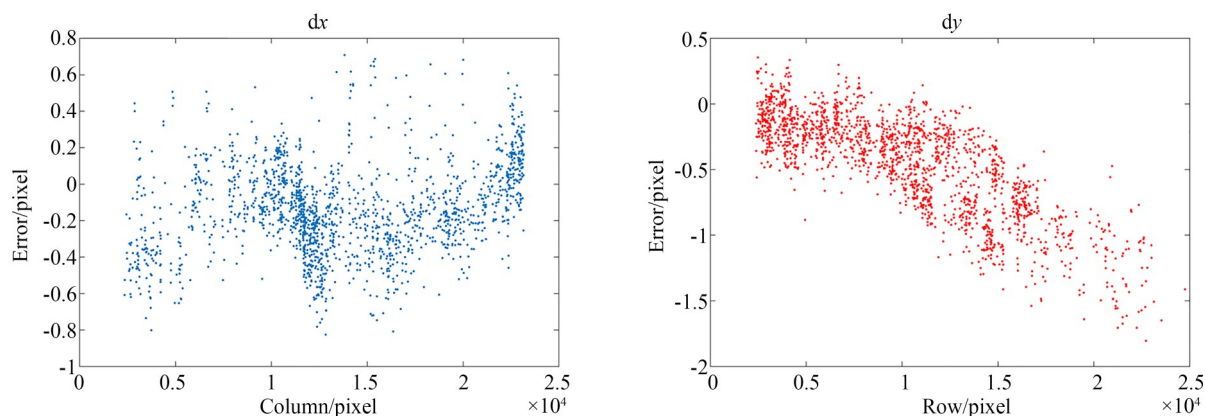


图 11 数据 1 全色数据与多光谱数据间的相对定位误差

Fig. 11 Relative positioning error between panchromatic data and multispectral data of Data 1

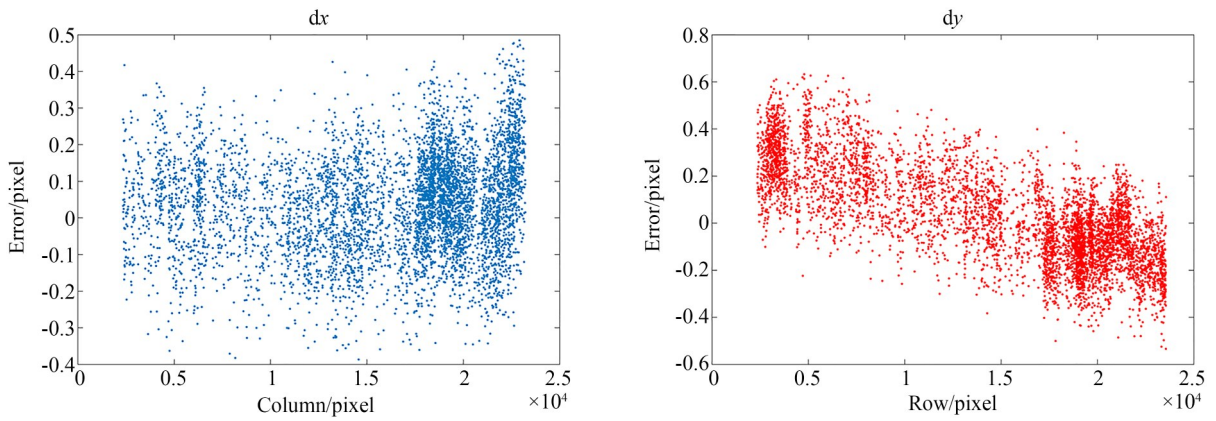


图 12 数据 2 全色数据与多光谱数据间的相对定位误差

Fig. 12 Relative positioning error between panchromatic data and multispectral data of Data 2

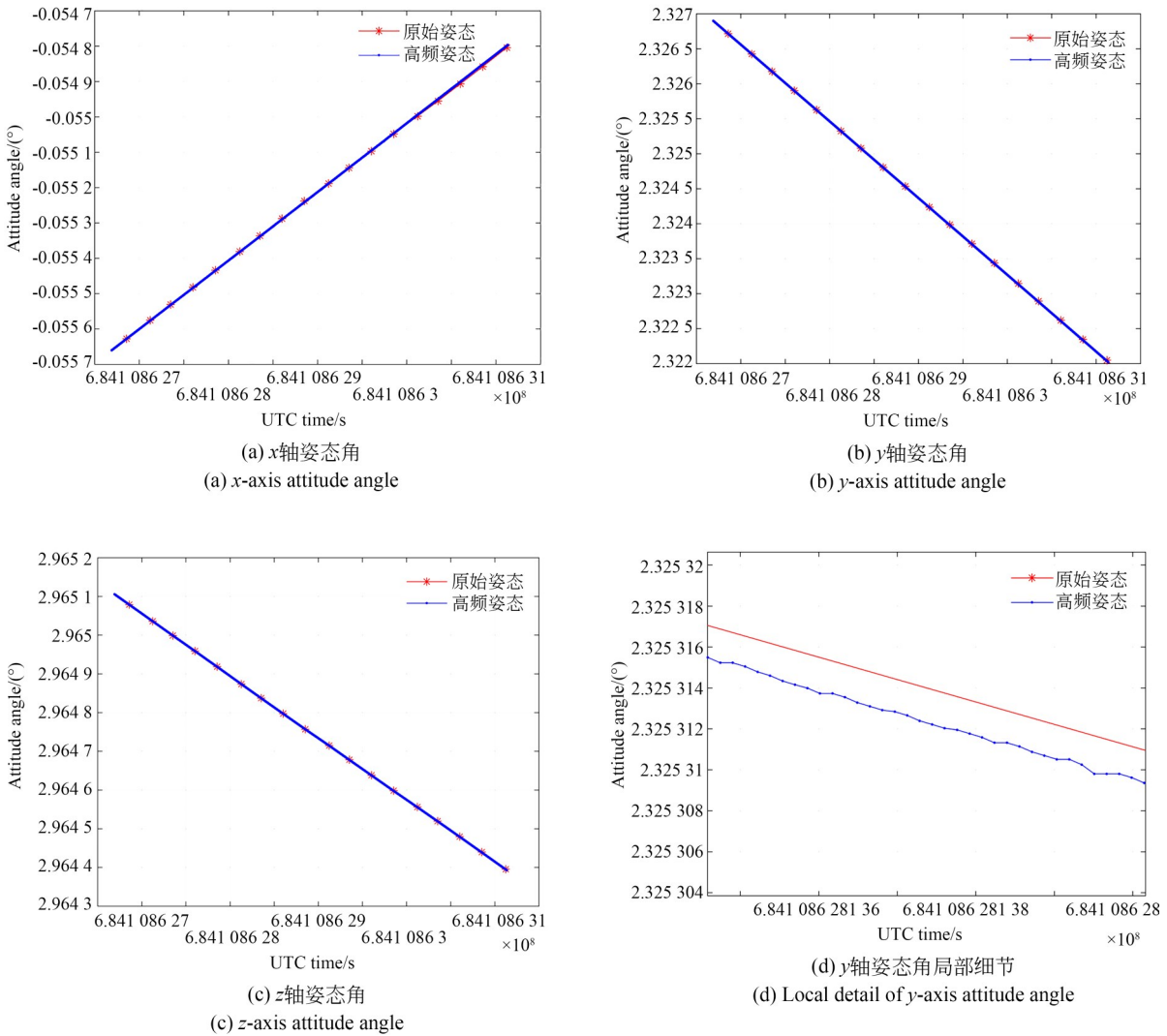


图 13 数据 1 测量姿态与高频姿态对比

Fig. 13 Comparison of measured attitude with high frequency attitude of Data 1

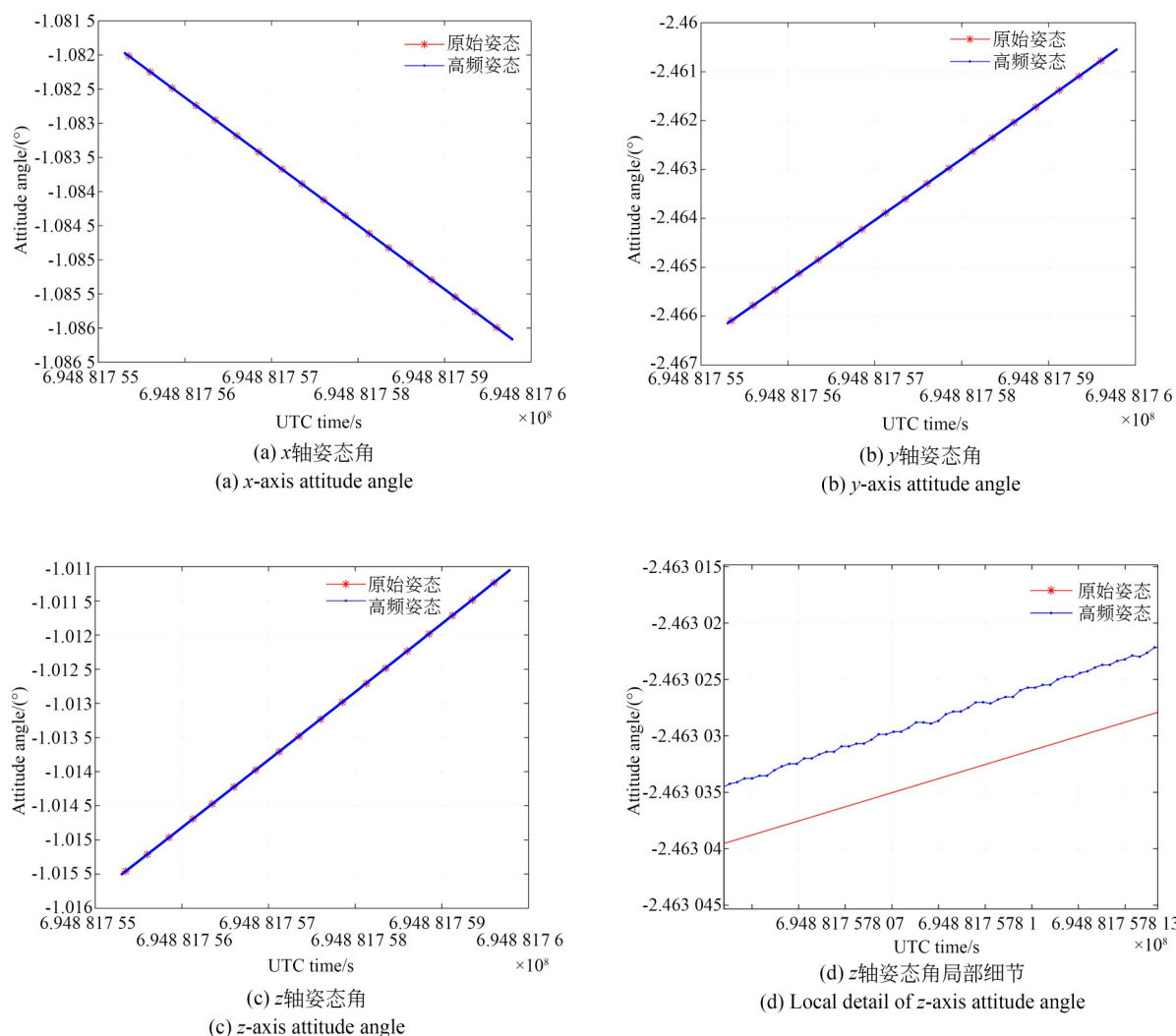


图 14 数据 2 测量姿态与高频姿态对比

Fig. 14 Comparison of measured attitude with high frequency attitude of Data 2

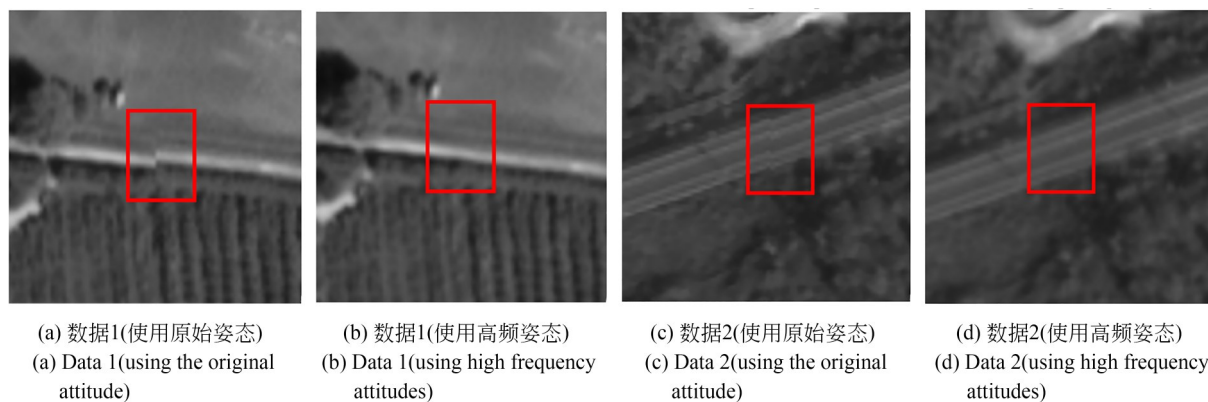


图 15 相邻探测器的影像拼接结果

Fig. 15 Stitching results of adjacent detectors

对全色数据进行传感器校正,有效消除了相邻探测器间重叠区域影像间的轻微拼接缝,处理结果如图 15 所示。该结果表明,基于全色影像相邻探测器分时成像的高频姿态提取方法可有效提取准确的高频姿态数据。

数据 1 和数据 2 的多光谱数据如图 16 所示。图中,区域 A 和区域 B 使用高频姿态数据进行传感器校正,结果如图 17~图 20 所示。可以看出, A 区域使用星上下传数据和提取的高频姿态数据处理后,南北方向与东西方向的几何定位偏差均变小;B 区域使用星上下传数据处理有非常明显几何定位引起的错位,使用高频数据处理有效地消除了隐含在多光谱数据中的微小几何定位

误差,且区域 A 与区域 B 间的定位偏差幅度不同,这与图 11 和图 12 中现象相一致。

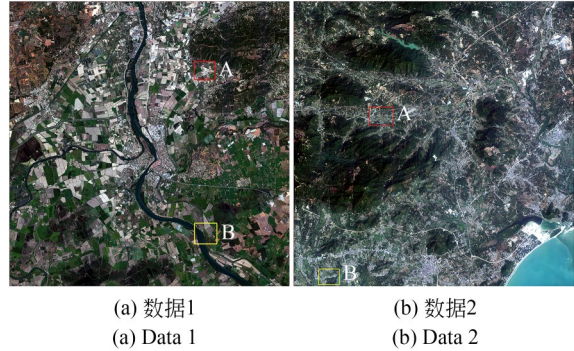


图 16 多光谱数据示意图

Fig. 16 Schematic diagram of multispectral data

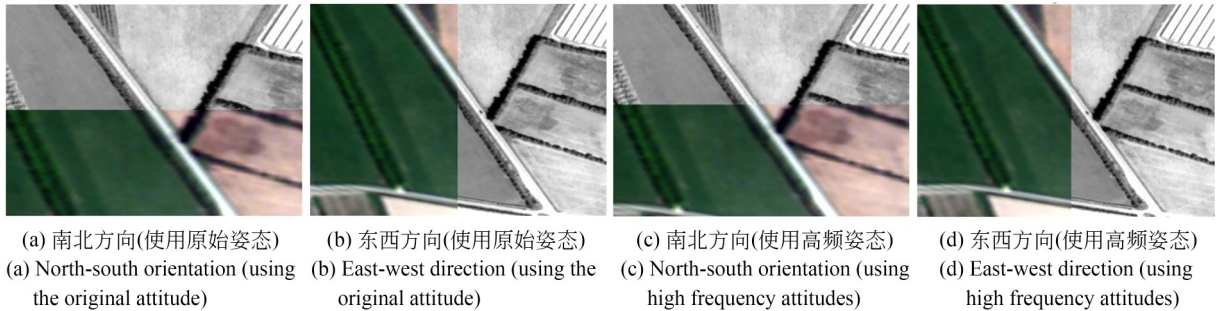


图 17 数据 1 区域 A 处理前后的几何定位偏差对比

Fig. 17 Comparison of geometric positioning deviation before and after treatment in area A of Data 1

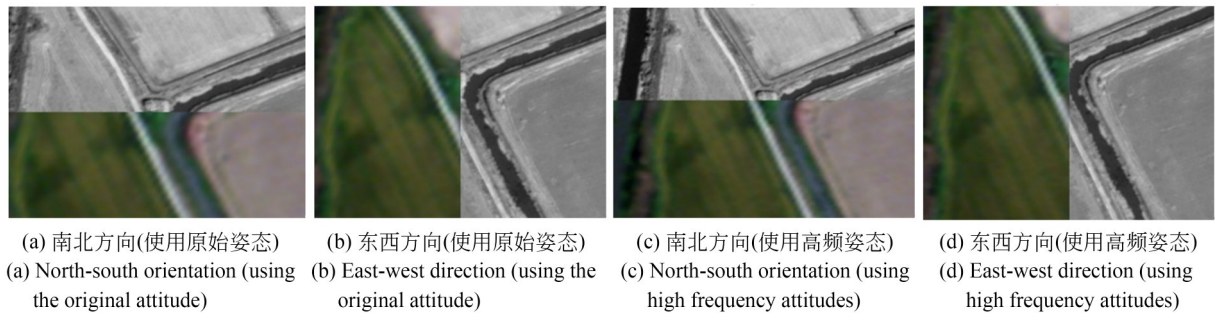


图 18 数据 1 区域 B 处理前后的几何定位偏差对比

Fig. 18 Comparison of geometric positioning deviation before and after treatment in area B of Data 1

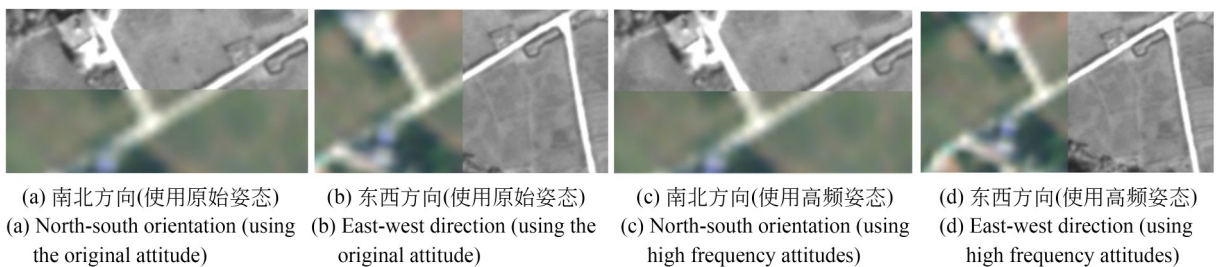


图 19 数据 2 区域 A 处理前后的几何定位偏差对比

Fig. 19 Comparison of geometric positioning deviation before and after treatment in area A of Data 2

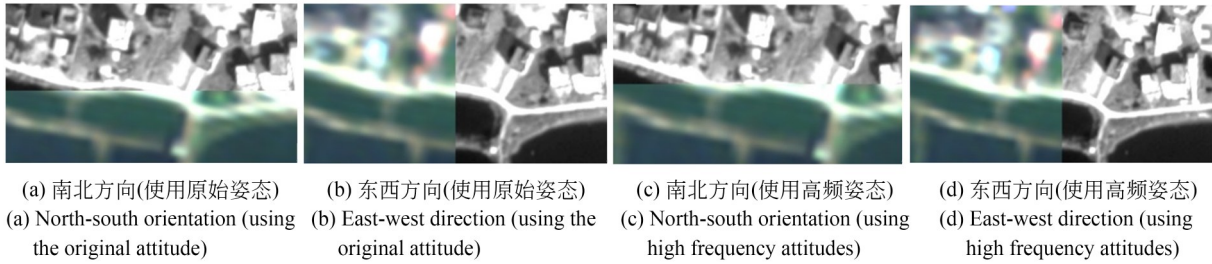


图 20 数据 2 区域 B 处理前后的几何定位偏差对比

Fig. 20 Comparison of geometric positioning deviation before and after treatment in area B of Data 2

对使用高频姿态数据处理后的两组数据的全色与多光谱数据进行影像匹配获得同名点,再通过几何定位模型求得两者的相对定位误差,结果如图 21 和图 22 所示。从图中可以看出,两组数据在列方向和行方向的相对定位误差分布均匀,图 11 与图 12 中行方向上随时间偏移的相对

定位误差得到消除,表明全色数据与多光谱数据间已不存在几何定位时变性偏差。其中,数据 1 的列方向相对定位误差由 0.375 9 个多光谱像素提升至 0.147 6 个多光谱像素,数据 2 的列方向相对定位误差由 0.202 6 提升至 0.127 8 个多光谱像素。实验结果表明,提取的高频姿态消除

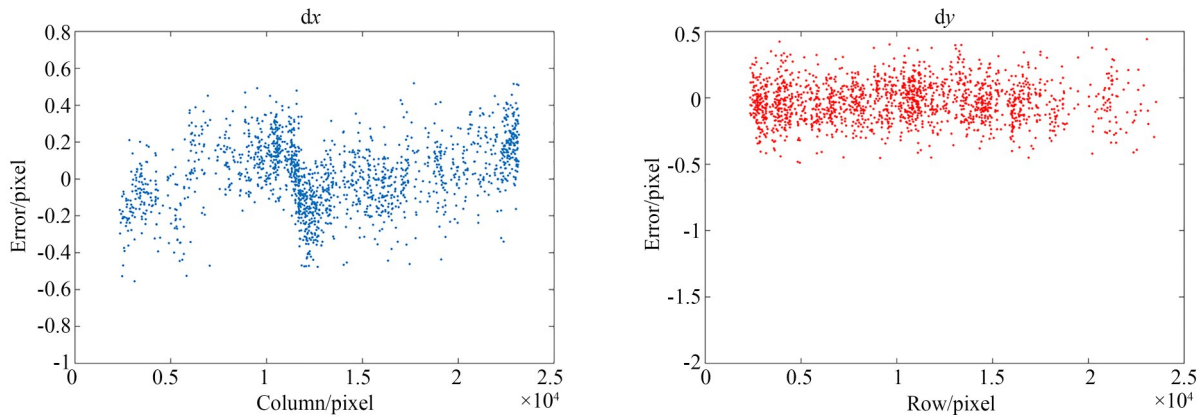


图 21 数据 1 使用高频数据修正后全色数据与多光谱数据间的相对定位误差

Fig. 21 Relative positioning error between panchromatic data and multispectral data after correction using high frequency of Data 1

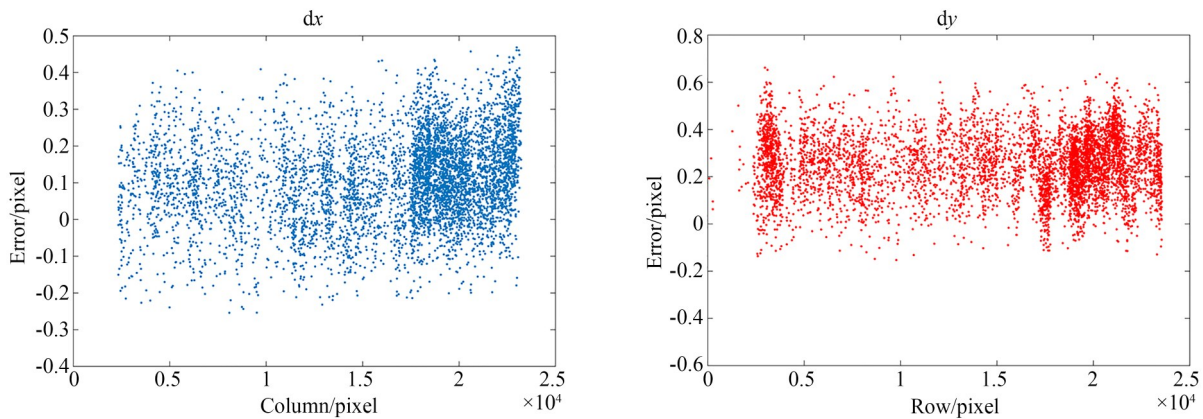


图 22 数据 2 使用高频数据修正后全色数据与多光谱数据间的相对定位误差

Fig. 22 Relative positioning error between panchromatic data and multispectral data after correction using high frequency of Data 2

了全色数据与多光谱数据间的微小几何定位偏差。

为了验证经本文算法处理后数据的实际应用效果,对算法处理前后的影像分别进行融合处理,局部融合效果如图23所示。选取偏差系数^[20]

作为融合影像质量的评价指标。该指标用于评价融合影像对多光谱特性的保持能力,其数值越小代表融合效果越好,偏差系数的计算结果如表3所示。结果表明,融合影像质量得到了有效的提升。

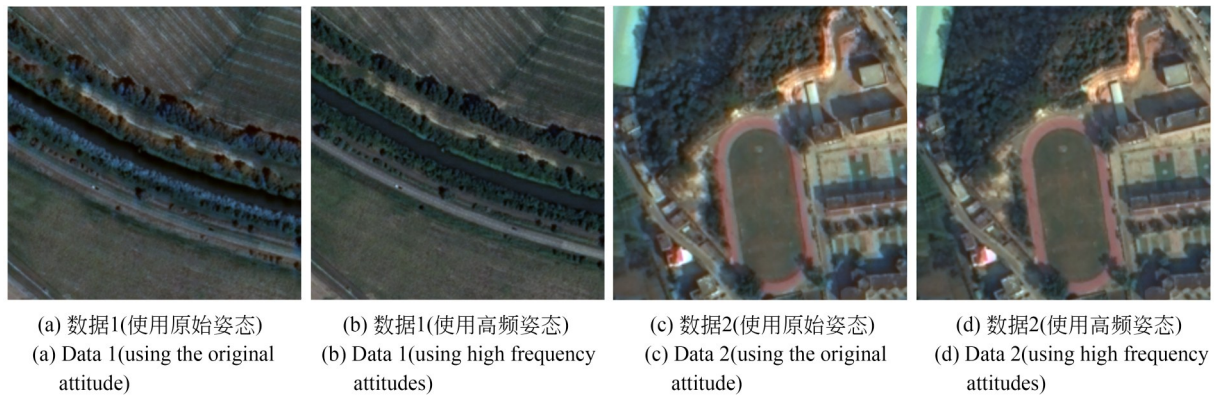


图23 数据融合结果对比

Fig. 23 Comparison of fusion images

表3 融合数据的偏差系数统计

Tab. 3 Statistic of distortion index of fusion images

偏差系数	数据1		数据2	
	使用原始姿态	使用高频姿态	使用原始姿态	使用高频姿态
红谱段	7.556	7.384	9.773	9.189
绿谱段	8.434	8.284	7.863	7.629
蓝谱段	8.182	7.934	6.919	5.916

4 结论

本文针对新一代具有高姿态测量精度、高姿态稳定度的采用机械式交错拼接的光学卫星受到微量高频误差影响时,所产生的全色数据与多光谱数据间存在的微小几何定位误差问题,提出了基于高频修正姿态的高分辨率光学卫星全色

与多光谱影像几何定位一致性修正方法。该方法利用机械拼接相邻探测器间所具有的分时特性,通过几何定位约束及金字塔影像搜索策略的同名点匹配方法,提取卫星成像过程中的高频姿态数据,并将该姿态数据用于影像数据传感器的几何校正,消除了微量高频误差引起的全色数据与多光谱数据间的微小几何定位偏差。最后,通过在轨卫星实测数据对本文提出的算法进行了验证。实验结果表明,本文提出的算法将全色数据与多光谱数据间行方向相对几何定位中误差提升至优于0.15个多光谱像元,有效消除了主体为行方向的时变性定位偏差,解决了因微量高频误差引起的全色数据与多光谱数据间的微小几何定位偏差。经处理的多光谱数据与全色数据具有高精度几何定位一致性,从而为后续高精度影像融合产品的生产打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 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.
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. (in Chinese)
- [2] 王密,田原,程宇峰. 高分辨率光学遥感卫星在轨几何定标现状与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1580-1588.
WANG M, TIAN Y, CHENG Y F. Development of on-orbit geometric calibration for high resolution

- optical remote sensing satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42 (11): 1580-1588. (in Chinese)
- [3] BOUILLON A, BERNARD M, GIGORD P, *et al.* SPOT 5 HRS geometric performances: using block adjustment as a key issue to improve quality of DEM generation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(3): 134-146.
- [4] BOUILLON A, BRETON E, DE LUSSY F, *et al.* SPOT5 geometric image quality[C]. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477)*. July 21-25, 2003, Toulouse, France. IEEE, 2004: 303-305.
- [5] BALTSAVIAS E, LI Z, EISENBEISS H. DSM generation and interior orientation determination of IKONOS images using a testfield in Switzerland [J]. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2006, 2006(1): 41-54.
- [6] AGUILAR M A, DEL MAR SALDAÑA M, AGUILAR F J, *et al.* Comparing geometric and radiometric information from GeoEye-1 and WorldView-2 multispectral imagery [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2014, 47(1): 717-738.
- [7] BARAZZETTI L, RONCORONI F, BRUMANA R, *et al.* Georeferencing accuracy analysis of a single worldview-3 image collected over Milan [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B1: 429-434.
- [8] 杨博, 王密. 资源一号 02C 卫星全色相机在轨几何定标方法[J]. *遥感学报*, 2013, 17(5): 1175-1190. YANG B, WANG M. On-orbit geometric calibration method of ZY-1 02C panchromatic camera[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(5): 1175-1190. (in Chinese)
- [9] 蒋永华, 张过, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校[J]. *测绘学报*, 2013, 42(4): 523-529, 553. JIANG Y H, ZHANG G, TANG X M, *et al.* High accuracy geometric calibration of ZY-3 three-line image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 523-529, 553. (in Chinese)
- [10] 王密, 秦凯玲, 程宇峰, 等. 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[J]. *遥感学报*, 2020, 24(4): 345-351. WANG M, QIN K L, CHENG Y F, *et al.* Geometric calibration for GF-5 AHSI camera[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(4): 345-351. (in Chinese)
- [11] 武红宇, 白杨, 王灵丽, 等. 吉林一号宽幅 01 星宽幅相机在轨几何定标及精度验证[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(8): 1769-1781. WU H Y, BAI Y, WANG L L, *et al.* On-orbit geometric calibration and accuracy verification of Jilin1-KF01A WF camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1769-1781. (in Chinese)
- [12] 王密, 朱映, 范城城. 高分辨率光学卫星影像平台震颤几何精度影响分析与处理研究综述[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 1899-1908. WANG M, ZHU Y, FAN C C. Development of platform jitter geometric analysis and processing for high-resolution optical satellite imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1899-1908. (in Chinese)
- [13] 朱映, 王密, 潘俊, 等. 利用多光谱影像检测资源三号卫星平台震颤[J]. *测绘学报*, 2015, 44(4): 399-406, 413. ZHU Y, WANG M, PAN J, *et al.* Detection of ZY-3 satellite platform jitter using multi-spectral imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(4): 399-406, 413. (in Chinese)
- [14] WANG M, FAN C C, PAN J, *et al.* Image jitter detection and compensation using a high-frequency angular displacement method for Yaogan-26 remote sensing satellite[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130: 32-43.
- [15] 胡堃, 黄旭, 张永军, 等. 基于高频角位移数据的卫星平台颤振检测与影像几何质量补偿[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(7): 1525-1531. HU K, HUANG X, ZHANG Y J, *et al.* Satellite platform jitter detection and image geometric quality compensation based on high-frequency angular displacement data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(7): 1525-1531. (in Chinese)
- [16] 许斌, 雷斌, 范城城, 等. 基于高频角位移的高分光卫星影像内部误差补偿方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 301-308. XU B, LEI B, FAN CH CH, *et al.* Internal error compensation method based on high-frequency an-

- gular displacement for high-resolution optical satellite images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 301-308. (in Chinese)
- [17] 李山山, 冯钟葵, 彭嫄. Landsat-8姿态抖动对多光谱影像配准影响[J]. *遥感信息*, 2016, 31(3): 9-15.
LI SH SH, FENG ZH K, PENG M. Impact analysis of multispectral image registration for landsat-8 caused by satellite attitude jitter[J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(3): 9-15. (in Chinese)
- [18] JIANG Y H, ZHANG G, TANG X M, *et al.* Detection and correction of relative attitude errors for ZY1-02C [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(12): 7674-7683.
- [19] ZHANG G, GUAN Z. High-frequency attitude jitter correction for the Gaofen-9 satellite [J]. *The Photogrammetric Record*, 2018, 33 (162) : 264-282.
- [20] 陈超, 秦其明, 王金梁, 等. 农地遥感图像融合质量评价方法比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 95-100.
CHEN CH, QIN Q M, WANG J L, *et al.* Comparison of quality evaluation methods for image fusion of farmland remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 95-100. (in Chinese)

作者简介:



白 杨(1983—),女,辽宁鞍山人,博士,研究员,2006年于东北师范大学获得学士学位,2011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,现为长光卫星技术有限公司数据中心二室主任,主要从事卫星遥感数据处理等方面的研究。E-mail: baiy776@163.com

通讯作者:



武红宇(1989—),男,吉林省吉林市人,助理研究员,2013年、2016年于武汉大学分别获得学士、硕士学位,主要从事卫星数据几何校正方面的研究。E-mail: wuhongyu@whu.edu.cn