

## 运动补偿下双通道星载高光谱成像仪图像配准

赵慧洁<sup>1</sup>, 张晓元<sup>1</sup>, 贾国瑞<sup>1\*</sup>, 邱显斐<sup>1</sup>, 翟亮<sup>2</sup>

- (1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191;
2. 中国测绘科学研究院, 北京 100830)

**摘要:** 最新一代可见近红外 (VNIR) 和短波红外 (SWIR) 双通道星载高光谱成像仪, 多采用视场分离器将 VNIR 和 SWIR 通道分离为多个子视场, 同一时刻各子视场对地成像区域不同, 在采用运动补偿技术提高图像信噪比时, 各子视场对同一地物的观测角不同, 导致图像间失配关系复杂, 无法获取同一地物的 VNIR-SWIR 连续光谱。通过建立运动补偿下的严格成像几何模型, 定量分析了双通道图像的畸变和失配规律, 进而提出了各子视场分别几何定位再相位相关法配准的方案, 并利用东天山区域运动补偿下星载双通道高光谱仿真数据进行验证。结果表明, 传统的基于图像的配准方案精度为 3.9 像元, 仍无法得到同一地物像元的 VNIR-SWIR 光谱曲线, 文中方案配准精度提高到 0.3 像元, VNIR 和 SWIR 重叠波段的反射率光谱重合度误差由 41.5% 降低到 1.2%。

**关键词:** 高光谱成像仪; 运动补偿; 失配分析; 图像配准; 重采样

**中图分类号:** T751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211022

## Image registration of the dual-channel spaceborne hyperspectral imager with motion compensation

Zhao Huijie<sup>1</sup>, Zhang Xiaoyuan<sup>1</sup>, Jia Guorui<sup>1\*</sup>, Qiu Xianfei<sup>1</sup>, Zhai Liang<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Education Ministry of Precision Opto-mechatronics Technology, School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China)

**Abstract:** Latest generation of dual-channel spaceborne hyperspectral imager based on visible near infrared (VNIR) and short wave infrared (SWIR) uses the field slit to separate VNIR and SWIR channels into several sub-fields, and each sub-field image has different ground area at the same time. When using motion compensation technology to improve signal to noise ratio of the instrument, the observation angles of each sub-field are different, which leads to more complicated mismatch of images and make it impossible to get the continuous VNIR-SWIR spectrum of the ground pixel. The rule of image distortion and dual-channel mismatch quantitatively was analyzed by Rigorous imaging model, and the registration scheme by using geometric orientation of each sub-field separately as well as the phase correlation method was proposed on this basis. Verification based on dual-channel spaceborne hyperspectral simulated data of Dongtianshan under motion compensation was performed. The result shows that registration accuracy of traditional scheme based on correlation of images reaches 3.9 pixel, which means the continuous VNIR-SWIR spectrum of the ground pixel is still unavailable. The registration accuracy of the scheme proposed by this paper reaches 0.3 pixel, and the reflectance spectrum overlap ratio error of the overlapping bands of VNIR and SWIR reduces from 41.5% to 1.2%.

收稿日期: 2021-02-18; 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0500502); 长江学者和创新团队发展计划资助 (IRT1203)

**Key words:** hyperspectral imager; motion compensation; mismatch analysis; image registration; resampling

## 0 引言

高光谱成像是遥感卫星中的常用载荷,其中可见近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)双通道成像光谱仪应用广泛。早期星载双通道成像光谱仪如Hyperion<sup>[1]</sup>,两通道共用同一前置光路,利用二向色性元件将入射光分离到VNIR和SWIR两通道,分别进行分光、成像,两通道成像地面视场一致。但在两通道重叠波段(一般为900~1000 nm),由于入射光被分为两路,导致两通道各自的光能量弱,成像信噪比低。最新一代星载双通道成像光谱仪,如德国En-Map<sup>[2]</sup>、我国TG-1的HSI和GF-5的高光谱成像仪<sup>[3]</sup>等,采用视场分离器,使VNIR和SWIR两通道通过不同狭缝对不同地面视场成像,各通道的入射光来自各自对应的视场,成像信噪比高,但两通道同一时刻成像区域不同,通道间图像存在失配。

对于早期星载双通道成像光谱仪,一般针对不同时相的图像进行配准,如基于图像灰度信息利用高斯函数拟合得到匹配控制点,配准不同时相Hyperion全波段图像<sup>[4]</sup>;不同通道间的图像配准研究主要针对亚像素,如采用扩展相位相关法配准Hyperion的VNIR和SWIR通道图像,该方法适于已达到像素级匹配的图像<sup>[5]</sup>。对于新型星载双通道成像光谱仪,一般通过严格成像几何模型对图像进行系统级几何校正<sup>[6]</sup>,而不同通道图像间的高精度拼接配准研究较少。双通道成像光谱仪不同通道成像视场不一致且图像灰度差异大,与该成像特点类似的仪器,一般基于几何关系进行配准,如武奕楠等针对多个CCD交错排列组成的空间相机,根据严格几何模型追踪同一地物在不同通道CCD像面的轨迹,实现不同通道图像拼接配准<sup>[7]</sup>,该方法对卫星和仪器参数精度要求高,很难达到亚像素级配准精度。

随着成像光谱仪空间、光谱分辨率的提高,为保证图像信噪比,通过运动补偿增加积分时间的方法被广泛应用,如TG-1的HSI、GF-5的高光谱成像仪等<sup>[3,8]</sup>。运动补偿成像时,不断变化的补偿角使推扫图像在沿轨方向出现不同程度的畸变,从而导致存在视场分离的双通道图像失配更复杂,王运等研究结果表明沿轨

方向通道间失配量呈现非线性变化<sup>[5]</sup>。在运动补偿引起的畸变效应影响下,传统的基于图像特征、灰度和相位配准的方法可能失效。因此,需要进一步研究运动补偿倍率、视场分离角等因素对双通道图像畸变和失配的影响,进而确定合理的配准方案。

文中通过运动补偿下VNIR和SWIR通道各视场成像几何模型,从图像配准的角度定量分析双通道图像的畸变与失配规律。在此基础上,提出了先基于各通道各子视场成像几何模型粗配准,再基于图像分区域相位相关精配准的方案,并利用运动补偿下东天山星载高光谱仿真数据进行验证,配准精度达0.3像元,VNIR和SWIR重叠波段光谱反射率的重合度误差1.2%。

## 1 运动补偿下双通道成像几何建模

文中研究的成像光谱仪,通过视场分离形成VNIR和SWIR两通道,沿轨方向存在的视场分离角,造成同一时刻两通道成像地物不同。SWIR通道受探测器限制,采用双狭缝成像,每个狭缝对应2个成像探测器,4个探测器交错排列,对应4个子视场:SWIR1-1、SWIR2-1、SWIR1-2和SWIR2-2,子视场间相互重叠拼接形成宽幅视场,如图1所示。SWIR1-1和SWIR1-2通过狭缝S1成像,相对VNIR的视场分离角相同,SWIR2-1和SWIR2-2通过狭缝S2成像,视场分离角相同。经过一段时间推扫,得到的1个VNIR和4个SWIR图像,在沿轨方向上存在失配。

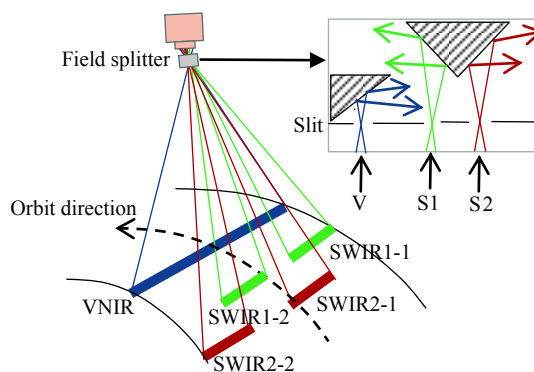


图 1 视场分离原理示意图

Fig.1 Sketch map of field separation

运动补偿原理如图 2 所示,卫星从  $t_1$  时刻开始运动补偿,补偿镜使观测光线相对星下点  $A$  夹角为  $\theta_n$ ,指向  $A_1$ ;控制补偿镜转动, $t_2$  时观测光线相对星下点  $B$  夹角  $-\theta_n$ ,指向  $B_1$ ;  $t_1$  到  $t_2$  完成一次运动补偿, $t_3$  时刻开始下一次运动补偿,补偿倍率为  $n$  时,  $|AB|=n*|A_1B_1|$ 。推扫成像时补偿角不断变化,仪器的运动补偿镜匀角速度转动,起始时刻运动补偿角为:

$$\theta_n = \arcsin\left(\frac{R \sin \alpha}{\sqrt{(R+H)^2 + R^2 - 2R(R+H)\cos\alpha}}\right) \quad (1)$$

式中:  $\alpha=(n-1)|A_1B_1|/2R$ ;  $R$  为地球半径;  $H$  为轨道高度。运动补偿时,图像在连续变化的观测角下获取,但积分时间内角度变化很小,可将运动补偿角等效为积分时间中点的倾斜观测角。第  $i$  推扫行运动补偿角为:

$$\theta_i = \theta_n - (2i - 1) \cdot \theta_n \cdot \tau / \Delta T \quad (2)$$

式中:  $\Delta T$  为成像时长;  $\tau$  为积分时间。

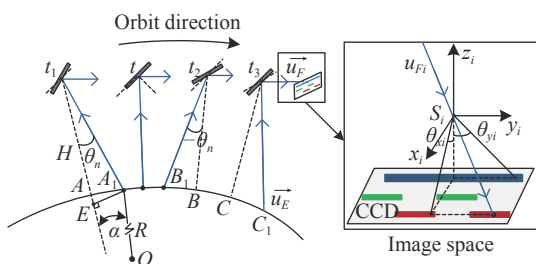


图 2 运动补偿成像原理示意图

Fig.2 Sketch map of imaging with motion compensation

推扫成像时各行的成像关系相互独立,以 VNIR 为基准建立第  $i$  行像空间坐标系  $Fi$ , 原点为投影中心  $Si$ ,  $z$  轴由像面中心指向  $Si$ ,  $y$  轴平行于推扫行,  $x$  轴满足右手法则。像元  $p(i,j)$  的观测光线与 VNIR 中心光线夹角:

$$\begin{cases} \theta_{xi} = \Delta x + \theta_i \\ \theta_{yi} = \arctan\left(\left(j - \Delta y - \frac{N_V - 1}{2}\right) \cdot \frac{\Delta d}{f}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta x$  为视场分离角;  $\Delta y$  为 SWIR 子视场中心相对 VNIR 中心  $y$  方向的偏移量;  $N_V$  为 VNIR 探测器像元个数;  $\Delta d$  为探测器尺寸;  $f$  为系统焦距。运动补偿下,  $p(i,j)$  的像空间观测矢量为:

$$\vec{u}_{Fi} = [\tan\theta_{xi} \quad \tan\theta_{yi} \quad -1]^T \quad (4)$$

$\vec{u}_{Fi}$  通过坐标转换得到地面坐标系观测矢量  $\vec{u}_{Ei}$ , 与国家标准的数字高程模型 (DEM) 产品求交点, 得到

对应地面点经纬度坐标  $P(B_{ij}, L_{ij}, H_{ij})$ <sup>[9]</sup>。推扫成像时间内,依次计算各通道的每一行所有像元的地面点坐标,建立了各通道各子视场的严格成像几何模型。

## 2 运动补偿下的图像失配规律分析

### 2.1 运动补偿下的图像畸变效应

推扫成像时各行图像是在不同时刻得到的,运动补偿时各行的成像观测角度不同,从而导致成像过程中不同行对应的地面分辨率不同。

令轨道高度 708 km, 倾角 98.217°, VNIR、SWIR 探测器像元数:  $N_V=2\ 000$ ,  $N_S=512$ , 瞬时视场角 42.5  $\mu\text{rad}$ , 视场分离角与运动补偿角如表 1 所示,根据 VNIR 和 SWIR 各子视场成像几何模型,确定像元  $p(i,j)$  与地面点  $P(B_{i,j}, L_{i,j}, H_{i,j})$  对应关系。利用相邻像元在沿轨方向  $x$ 、交轨方向  $y$  上对应的地面点距离,表征地面分辨率:

$$\Delta r_x(i,j) = \frac{L_{i+1,j} - L_{i,j}}{\cos\left(\alpha_{i,j} - \frac{\pi}{2}\right)}, \Delta r_y(i,j) = \frac{B_{i,j+1} - B_{i,j}}{\cos\left(\beta_{i,j} - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_{i,j}$  为沿轨方向与经度方向夹角;  $\beta_{i,j}$  为交轨方向与纬度方向夹角。

表 1 视场分离角与运动补偿角

Tab.1 Field separation and motion compensation angles

Field separation angle		Motion compensation angle $\theta_n$		
SWIR1	SWIR2	$n=2$	$n=4$	$n=6$
0.5°	1.0°	2.426°	7.238°	11.932°

运动补偿主要影响沿轨方向的地面分辨率 (Ground Sampling Distance, GSD), 不同补偿倍率下, VNIR 和 SWIR 图像各行中心像元在  $x$  方向地面分辨率如图 3 所示。运动补偿下, VNIR 和 SWIR 图像各行像元的地面分辨率发生非线性变化, 补偿倍率越大地面分辨率变化越大。相同运动补偿倍率下, 由于存在视场分离角, VNIR 和 SWIR 的同一行图像对应地面分辨率不同。

VNIR 通道中心行运动补偿角为 0, 即垂直观测; SWIR 通道由于视场分离角的影响, 垂直观测的推扫行与视场分离角有关。以垂直观测的图像行作为参考行  $m$ , 运动补偿下沿轨方向像元到参考行像元的地面点坐标距离, 与无畸变时地面距离的差值作为畸变量:

$$\delta_x(i, j) = \frac{L_{i,j} - [L_{m,j} + (i-m) \cdot \Delta r_L(m, j)]}{\Delta r_L(m, j)} \quad (6)$$

式中:  $\Delta r_L(m, j) = L_{m+1, j} - L_{m, j}$

VNIR 和 SWIR 子视场图像各行中心像元沿  $x$  方向的畸变曲线如图 4 所示。运动补偿下, VNIR 和 SWIR 图像各行在沿轨方向存在非线性畸变, 且运动补偿倍率越大, 推扫成像行数越多, 畸变越大。6 倍运动补偿, 成像 2 000 行时, VNIR 最大畸变 18 像元, SWIR2 最大畸变达 28 像元。同一运动补偿倍率下, 对比同一时刻的 VNIR 和 SWIR 同一行图像, 两者畸变大小不同, 即推扫得到的 VNIR 和 SWIR 图像畸变不一致。

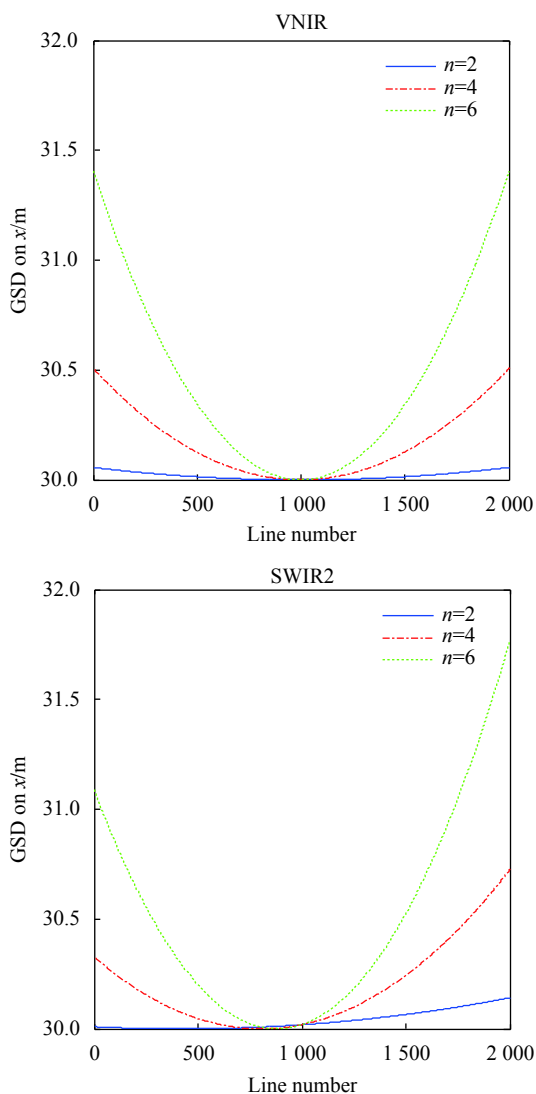


图 3 不同行中心像元地面分辨率曲线 ( $n$  为运动补偿倍率)

Fig.3 Ground sampling distance of middle pixel on different lines ( $n$  is motion compensation ratio)

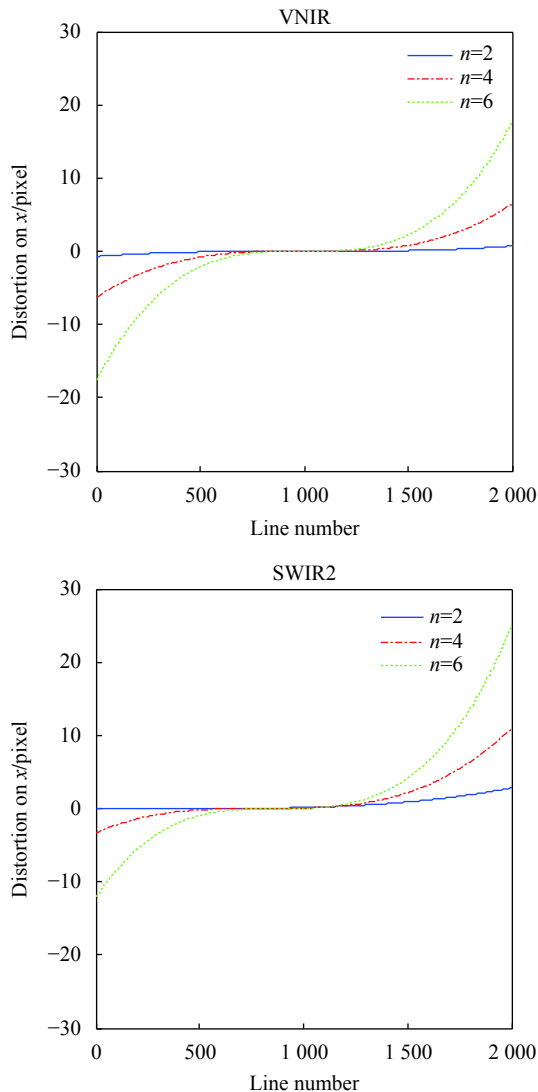


图 4 VNIR 和 SWIR 畸变曲线 ( $n$  为运动补偿倍率)

Fig.4 Distortion curve of VNIR and SWIR ( $n$  is motion compensation ratio)

### 2.2 图像畸变对失配的影响

利用 SWIR 像元相对 VNIR 同一像元的地面点经纬度坐标距离, 表示 SWIR 通道该像元的失配量。VNIR 像元  $p(i, j)$  对应地面点  $P(B_{i,j}, L_{i,j}, H_{i,j})$ , SWIR 像元  $p'(i, j)$  对应地面点  $P'(B'_{i,j}, L'_{i,j}, H'_{i,j})$ , 则 SWIR 像元相对 VNIR 像元的失配量为:

$$\begin{bmatrix} \Delta p_x(i, j) \\ \Delta p_y(i, j) \end{bmatrix} = \frac{1}{\cos(\beta_{i,j} - \alpha_{i,j})} \begin{bmatrix} \cos \beta_{i,j} & \sin \beta_{i,j} \\ -\sin \alpha_{i,j} & \cos \alpha_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{B'_{i,j} - B_{i,j}}{\Delta r_x(i, j)} \\ \frac{L'_{i,j} - L_{i,j}}{\Delta r_y(i, j)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

SWIR 两个子视场图像沿  $x$  方向各行中心像元的失配量曲线如图 5 示。对于 SWIR 图像, 沿  $x$  方向每行的失配量绝对值先减小后增大, 运动补偿倍率越高, 成像行数越多, 失配量越大, 各行的失配量非线性变化。

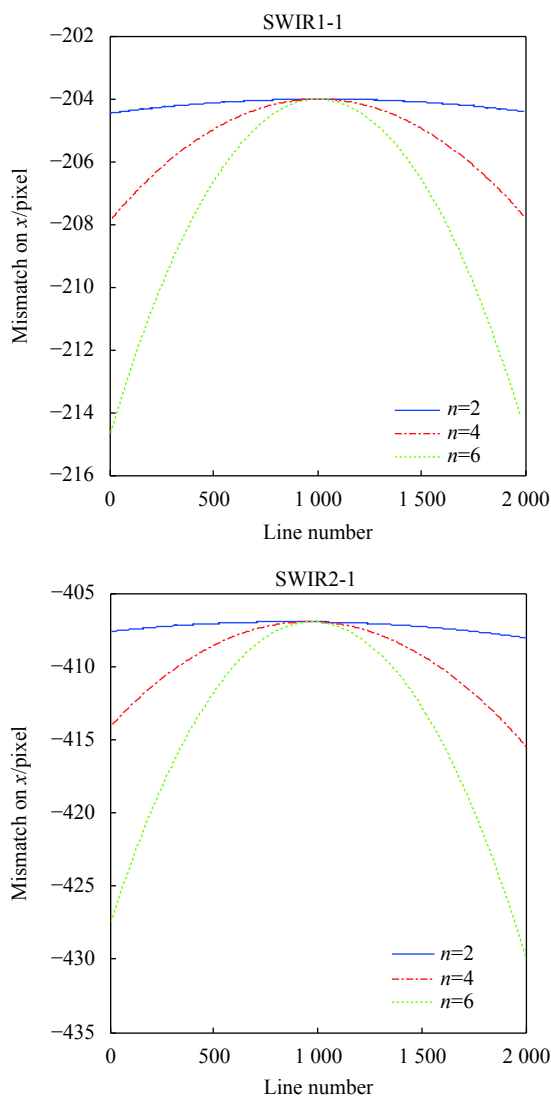


图 5 SWIR 通道失配量变化曲线 ( $n$  为运动补偿倍率)

Fig.5 Mismatch curve of SWIR channel( $n$  is motion compensation ratio)

对比同一 SWIR 子视场不同运动补偿倍率下的失配曲线, 补偿倍率  $n$  越大, 失配量变化曲线的曲率越大, 失配量的变化范围也越大。2 倍运动补偿, 成像 2 000 行时, SWIR2-1 失配量变化在 1 像元内; 6 倍运动补偿时, 相同条件下失配量变化达 23 像元。对比同一运动补偿倍率下, SWIR 两个子视场图像的失配曲线, 在视场分离角影响下, 起始行和终止行失配量不对称。SWIR2-1 的初始视场分离角较大, 同一时

刻两个子视场的同一行图像, SWIR2-1 失配量较大, SWIR2-1 图像的失配量变化范围也大于 SWIR1-1。

综上所述, 运动补偿造成的非线性畸变, 使 SWIR 图像不同区域失配量不同, 边缘失配大中心小。随运动补偿倍率、视场分离角和成像行数增大, 图像的失配量变化范围也迅速增大。设计运动补偿倍率和视场分离角时, 考虑信噪比的同时应结合两者对图像畸变和失配的影响, 根据图像的应用需求具体分析。对于运动补偿下 SWIR 和 VNIR 图像配准, 需要先消除 VNIR 和 SWIR 各视场图像的畸变再配准。

### 3 运动补偿下双通道图像配准方案

利用 VNIR 和 SWIR 的严格成像几何模型, 分别校正图像畸变进行粗配准。对于残留失配量, 采用基于图像的方法精配准。由于地物在不同波长下反射特性不同, 同一地物在 VNIR 和 SWIR 通道成像时灰度特征存在差异。精配准时先预处理得到相似度较高的待配准图像, 采用对灰度依赖较小的相位相关法配准。

#### 3.1 基于严格成像几何模型的粗配准

根据几何定标得到的传感器参数、卫星姿轨数据和运动补偿角度等, 建立 VNIR 通道和 SWIR 通道各子视场的成像几何模型, 得到像元  $p(i, j)$  对应的地面点坐标  $P(B_{i,j}, L_{i,j}, H_{i,j})$ 。经纬度坐标  $(B_{i,j}, L_{i,j}, H_{i,j})$  投影到地图坐标系, 像元坐标  $p(i, j)$  和地图投影坐标  $P(X_{i,j}, Y_{i,j})$  一一对应。以 VNIR 中心像元的地面分辨率为采样间隔  $r_x, r_y$ , 得到地图坐标系下几何校正后图像像元坐标  $p(I, J)$ :

$$I = \frac{X_{i,j} - X_{\min}}{r_x}, J = -\frac{Y_{i,j} - Y_{\max}}{r_y} \quad (8)$$

式中:  $r_x, r_y$  相等;  $X_{\min}$  和  $Y_{\max}$  为校正后图像左上点像元的地图投影坐标。

采用双线性插值确定  $(X_{i,j}, Y_{i,j})$  到  $(I, J)$  的插值关系, 重采样得到像元  $p(I, J)$  灰度值, 依次对 VNIR 和 SWIR 子视场图像几何校正, 四个 SWIR 子视场图像按地理坐标拼接。

#### 3.2 基于图像相位的精配准

##### (1) 图像预处理

剔除吸收峰、边缘波段等低信噪比波段, 计算 VNIR 和 SWIR 剩余有效波段图像间的灰度互相关值, 分别

选取相关性好的连续 10 个波长, 进行最小噪声分量变换 (MNF), 变换后第一分量包含绝大多数特征且信噪比高, 选取 VNIR 和 SWIR 第一分量作为参考图和待配准图。

(2) 像素级失配量估计

VNIR 图像  $f_V(x, y)$  和 SWIR 图像  $f_S(x-\Delta x, y-\Delta y)$  的离散傅里叶变换为  $FV$  和  $FS$ , 则相位相关函数为<sup>[5]</sup>:

$$C(x, y) = F^{-1} \left( \frac{FS \cdot \overline{FV}}{|FS \cdot \overline{FV}|} \right) \quad (9)$$

式中:  $C(x, y)$  为脉冲函数, 根据脉冲峰值位置可确定 SWIR 相对 VNIR 图像的失配量  $\Delta x$  和  $\Delta y$ 。

(3) 亚像素级失配量估计

传统相位相关法只能确定像元级失配量, 在相位相关峰值邻域利用函数拟合可将精度扩展到亚像素, sinc 函数是常用的精度较高的拟合函数<sup>[5]</sup>。将 VNIR 和 SWIR 划分成有重叠的图像块  $f_V(x_m, y_m)$  和  $f_S(x_m-\Delta x_m, y_m-\Delta y_m)$ , 图像块间的相位相关函数为  $C(x_m, y_m)$ 。用 sinc 函数在  $C(x_m, y_m)$  峰值邻域拟合, 并在  $x, y$  方向上分离变量:

$$C_\eta(x_m) = \alpha_{xm} \frac{\sin \pi(x_m - \Delta x_m)}{\pi(x_m - \Delta x_m)} + \gamma_{xm} \quad (10)$$

$$C_\eta(y_m) = \alpha_{ym} \frac{\sin \pi(y_m - \Delta y_m)}{\pi(y_m - \Delta y_m)} + \gamma_{ym}$$

式中:  $\alpha_{xm}, \alpha_{ym}$  为相关系数;  $\gamma_{xm}, \gamma_{ym}$  为噪声项。通过最小二乘法, 得到图像块中心在  $x, y$  方向失配量  $\Delta x_m$  和  $\Delta y_m$ 。将图像块中心失配量, 采用三次样条插值得到每个像元的亚像素失配量。

根据 SWIR 的像素级失配量移动图像, 再利用亚像素级失配量, 对 SWIR 图像空间重采样。

4 配准实验与分析

4.1 VNIR-SWIR 图像配准实验

利用东天山 HyMap 高光谱数据, 仿真得到运动补偿下双通道高光谱辐亮度数据。为验证运动补偿的影响分析以及配准方案有效性, 选择高倍率运动补偿图像: 4 倍补偿, SWIR1、SWIR2 视场分离角 0.5° 和 1°, 成像 1335 行时得到 VNIR 和 SWIR 四个子视场图像, 如图 6 所示。

建立 VNIR、SWIR 几何校正模型, 校正图像畸变, 将 SWIR 子视场按地理坐标拼接, 如图 7 所示。

选择 VNIR 波段: band14~band23, SWIR 波段: band31~band40, 通过 MNF 变换得到参考图和待配准图。利用

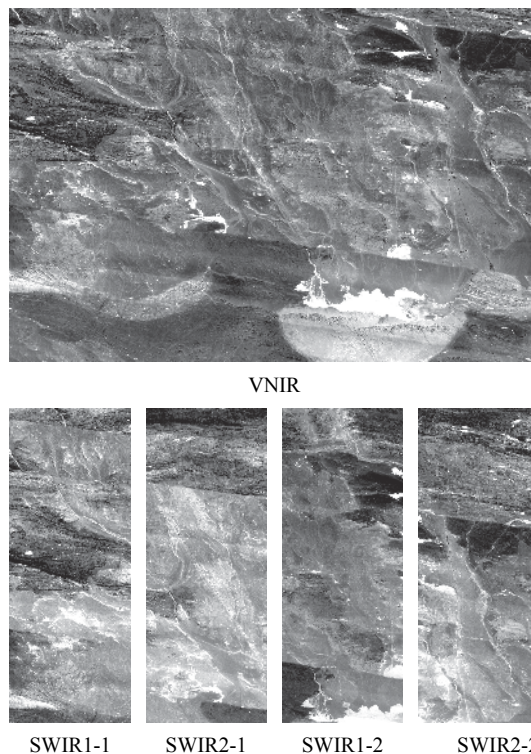


图 6 原始高光谱图像 (第 30 波段)

Fig.6 Original hyperspectral images (band30)

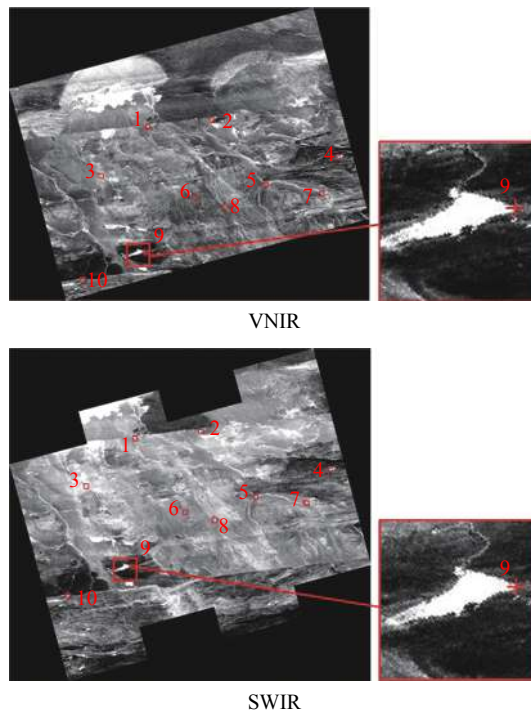


图 7 几何校正结果 (第 30 波段)

Fig.7 Result of geometric correction (band30)

相位相关法得到图像整体像素级失配量  $\Delta x=-1$  pixel,  $\Delta y=1$  pixel。将 VNIR 和 SWIR 划分成  $100 \times 100$  图像块, 中心间隔 50, 扩展相位相关法得到各像元的亚像素失配量  $\Delta x_m: -0.4 \sim 0.4$  pixel,  $\Delta y_m: -0.3 \sim 0.4$  pixel。对 SWIR 图像空间重采样, 完成双通道图像配准。

#### 4.2 配准结果对比分析

为验证配准的几何精度, 选取 10 个特征地物作

为控制点, 如图 7 所示。利用控制点  $11 \times 11$  邻域的灰度值求质心坐标, 有效波长下质心坐标均值作为特征地物几何位置。传统方法直接基于 SIFT 特征配准图像<sup>[10]</sup>, 与文中方案配准结果对比如表 2 所示。运动补偿下 VNIR 和 SWIR 不同区域失配差别大, 基于 SIFT 配准后仍存在平均 3.9 像元的误差, 而文中方案的精度为 0.3 像元。

表 2 特征地物几何位置误差

Tab.2 Geometric errors of feature ground objects

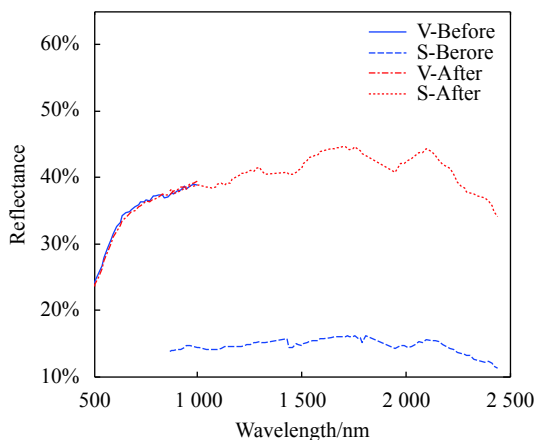
SIFT		Proposed method								
Object coordinate VNIR	Object coordinate SWIR	Error/pixel			Object coordinate VNIR	Object coordinate SWIR	Error/pixel			
		x	y	Distance			x	y	Distance	
1	(896.49,1214.57)	(891.30,1213.94)	5.2	0.6	5.2	(764.34,892.07)	(764.52,892.44)	0.2	0.4	0.4
2	(807.72,801.63)	(803.68,802.30)	4.0	0.8	4.1	(721.48,1308.15)	(721.63,1308.43)	0.1	0.3	0.3
3	(683.18,1581.33)	(678.90,1582.21)	4.1	0.9	4.2	(1080.13,591.93)	(1080.47,592.32)	0.3	0.4	0.5
4	(415.23,98.09)	(417.95,96.88)	2.7	1.2	2.9	(964.61,2115.28)	(964.95,2114.86)	0.3	0.4	0.5
5	(385.33,592.64)	(389.34,592)	4.0	0.6	4.0	(1125.58,1641.73)	(1125.42,1641.49)	0.3	0.2	0.4
6	(413.81,1045.86)	(416.40,1046.47)	2.6	0.6	2.7	(1217.77,1190.68)	(1217.63,1190.51)	0.1	0.2	0.2
7	(230.92,252.77)	(234.06,251.92)	3.4	0.8	3.5	(1194.58,2019.39)	(1194.84,2019.07)	0.3	0.3	0.4
8	(309.25,868.61)	(312.89,869.13)	3.6	0.5	3.7	(1275.79,1390.07)	(1275.88,1390.28)	0.1	0.1	0.1
9	(168.55,1439.82)	(173.13,1440.84)	4.6	1.0	4.7	(1569.27,872.26)	(1569.46,872.17)	0.2	0.1	0.2
10	(93.60,1874.59)	(97.04,1875.85)	3.4	1.3	3.6	(1747.45,470.69)	(1747.35,470.54)	0.1	0.1	0.1
Average			3.8	0.8	3.9	Average		0.2	0.3	0.3

为验证配准后 VNIR-SWIR 光谱的一致性, 将配准后的 VNIR-SWIR 辐亮度数据经过 FLAASH 大气校正, 得到地物光谱反射率曲线, 通过重叠波段的光谱反射率重合度误差评价:

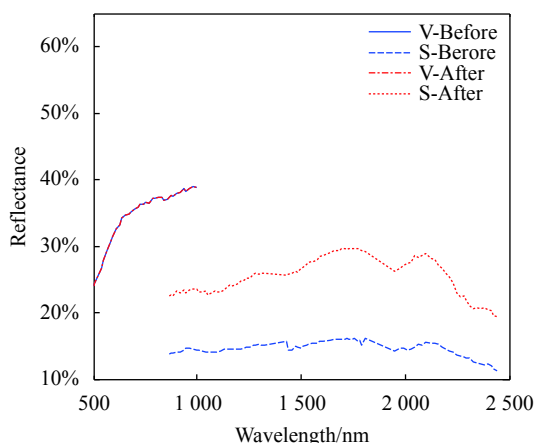
$$ORE(p) = \left( \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} \frac{R_S(\lambda_{Si}, p)}{R_V(\lambda_{Si}, p)} - OR_0 \right) \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $N_o$  为 SWIR 通道重叠波段数目;  $OR_0=1$  为理想情况下的光谱重合度;  $R_S(\lambda_{Si}, p)$  为 SWIR 通道波长  $\lambda_{Si}$  处像元  $p$  的光谱反射率;  $R_V(\lambda_{Si}, p)$  为 VNIR 通道的光谱反射率。VNIR 和 SWIR 通道光谱分辨率不同, 分别为 4.6 nm 和 9.7 nm, 故 VNIR 通道的  $R_V(\lambda_{Si}, p)$  由  $\lambda_{Si}$  附近波长插值得到。

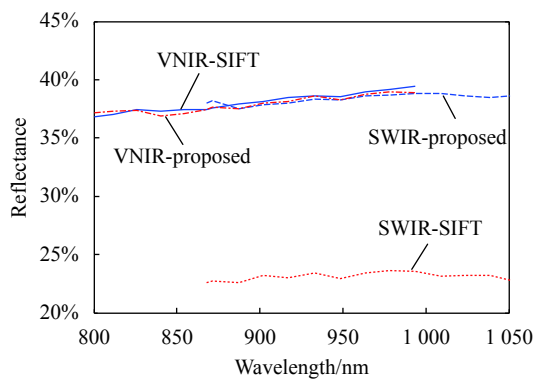
分别采用文中方案和 SIFT 特征配准前后, VNIR 图像中特征地物 9 的光谱反射率曲线如图 8(a) 和 (b) 所示, 文中方案配准后能够得到特征地物的 VNIR-SWIR 连续光谱曲线, SIFT 特征法配准后 VNIR 和 SWIR 光谱曲线不属于同一地物像元, 因而不能衔接。图 8(c) 为两种方法配准后重叠波段的光谱反射率曲线, 采用文中方案配准后重叠波段 VNIR 和 SWIR 的光谱反射率曲线基本重合, 明显优于 SIFT 特征配准结果。计算 10 个特征地物的 ORE, SIFT 特征法重合度误差为 41.5%, 文中方案重合度误差为 1.2%。



(a) Proposed method



(b) SIFT method



(c) Overlap bands

图 8 特征地物点的反射率光谱曲线

Fig.8 Spectral reflectance curves of feature ground point

## 5 结 论

运动补偿下存在视场分离的 VNIR-SWIR 双通道星载高光谱成像仪,两通道图像在沿轨方向产生了一致的非线性畸变,造成图像之间随区域变化的非线性失配。畸变和失配量变化随运动补偿倍率、视场分

离角、成像行数增大而增大,6 倍运动补偿,1°视场分离角,成像 2 000 行时,两通道图像不同区域失配量变化达 23 像元。针对这一失配规律,提出先基于严格成像几何模型粗配准,再基于相位相关精配准的配准方案。利用东天山高光谱仿真数据进行验证,结果表明图像配准精度达 0.3 像元,两通道重叠波段光谱反射率曲线重合度误差为 1.2%,在几何定位和光谱一致性方面,相对传统方案均有显著提升。

## 参考文献:

- [1] Marshall M, Thenkabail P. Advantage of hyperspectral EO-1 Hyperion over multispectral IKONOS, GeoEye-1, WorldView-2, Landsat ETM+, and MODIS vegetation indices in crop biomass estimation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2015, 108: 205-218.
- [2] Guanter L, Kaufmann H, Segl K, et al. The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(7): 8830-8857.
- [3] Zhang L. Perspectives on Chinese developments in spaceborne imaging spectroscopy: What to expect in the next 5-10 years[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016.
- [4] Gao Ya, Zhou Jialin, Hou Xue, et al. Registration algorithm for hyperspectral image based on Gaussian fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S223002. (in Chinese)
- [5] Wang Yun. Study on systematic geometric correction and image registration of hyperspectral Images[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [6] Liu Zhiwen, Liu Dingsheng, Wei Jingbo. Rigorous geometric model of Tiangong-1 hyperspectral spectrometer [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(S1): 62-67. (in Chinese)
- [7] Wu Yinan, Li Guoning, Zhang Ke, et al. Registration model based on homologous points tracking of space camera assembly imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0326002. (in Chinese)
- [8] Wang Yueming, Jia Jianxin, He Zhiping, et al. Key technologies of advanced hyperspectral imaging system [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 850-857. (in Chinese)
- [9] Jia G, Zhao H, Shang H. Pixel-size-varying method for simulation of remote sensing images [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083551. (in Chinese)
- [10] Zhang Hongwei, Fan Xiang, Zhu Bin, et al. Dual-band infrared image registration with the introduction of outliers rejection mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 23-28. (in Chinese)





**第一作者简介:** 赵慧洁 (1966-), 教授, 博士生导师, 政府特殊津贴专家。主要从事新型光学遥感探测、星载高光谱建模与仿真、视觉检测等方面研究工作, 获得国家科技进步二等奖 1 项、国家科技发明二等奖 1 项, 机械工业部科学技术奖一等奖 1 项, 国土资源部科学技术奖一等奖 1 项, 国防科技进步二等奖 2 项, 国防科技发明三等奖 1 项; 参与编写专著 3 部; 发表 SCI 检索论文 100 余篇; 获国家发明专利授权 80 余项。Email: hjzhao@buaa.edu.cn



**通讯作者简介:** 贾国瑞 (1984-), 副教授, 博士生导师, IEEE 高级会员。主要从事高光谱成像建模、仿真和数据预处理等方面研究工作, 发表论文 40 余篇 (其中 SCI 31 篇), 获发明专利授权 25 项, 登记软件著作权 5 项, 获国防技术发明三等奖 1 项, 获评科技部国家遥感中心“遥感青年科技人才创新资助计划”。Email: jiaguorui@buaa.edu.cn

## 国际先进光纤激光研讨会

### Advanced Fiber Laser Conference, AFL2021

<https://b2b.csoe.org.cn/meeting/AFL2021.html>

2021 年 11 月 5-7 日, 成都

会议议题方向 (不限于此):

**Topic 1: Fiber and fiber based device**

- > 激光光纤设计与制备
- > 特种光纤设计、制备及表征
- > 高功率光纤器件

**Topic2: High power fiber laser**

- > 高功率连续以及脉冲光纤激光技术
- > 高功率拉曼光纤激光技术
- > 高功率窄线宽以及单频光纤激光技术
- > 其他类型高功率光纤激光技术
- > 高功率光纤激光器中的模式不稳定
- > 高功率光纤激光器的光束表征与操控技术
- > 高功率光纤激光器的泵浦技术

**Topic3: Ultrafast fiber laser and nonlinear fiber optics**

- > 超快光纤激光技术
- > 光纤非线性效应及动力学
- > 拉曼光纤激光技术

**Topic 4: Mid-infrared fiber laser and fiber SC**

- > 1.9~3 微米区间的中红外连续和脉冲光纤激光技术
- > 3~5 微米区间的中红外连续和脉冲光纤激光技术
- > 中红外波段的二维材料及其在中红外光纤激光器中的应用
- > 中红外超连续谱和孤子自频移的产生技术
- > 中红外玻璃光纤的设计和制备
- > 新型的中红外光纤器件

**Topic 5: Beam combination of fiber lasers**

- > 高功率光纤激光相干合成技术
- > 高功率光纤激光光谱合成技术
- > 其他新型高效光纤激光合成技术
- > 高性能合成器件技术研究

**Topic 6: Fiber laser application**

- > 高能光纤激光器在激光制造和材料加工中的应用
- > 单频光纤激光器在传感、测量、激光雷达及激光制冷中的应用
- > 光纤激光器在成像、照明和空间光通信中的应用
- > 特种光纤激光的应用。

投稿网址: <https://b2b.csoe.org.cn/submission/AFL2021.html>, 第一轮截止时间 2021 年 4 月 30 日。