引文格式:戴荣凡,王密,陈儒,等.GF5A-WTI超大幅宽摆扫序列影像物方几何拼接处理研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):767-781.DOI:10.13203/j.whugis20240073

Citation: DAI Rongfan, WANG Mi, CHEN Ru, et al.Geometric Stitching Processing of GF5A-WTI Ultra-Width Whiskbroom Sequence Images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(4): 767-781. DOI: 10.13203/j. whugis20240073

GF5A-WTI超大幅宽摆扫序列影像物方几何拼接处理研究

戴荣凡[1] 王 密[1] 陈 儒[2] 金淑英[2]

1 武汉大学国家网络安全学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:高分五号01A卫星(GF5A)宽幅热红外成像仪(wide-swath thermal infrared imager, WTI)通过对地线阵摆扫进行大范围观测成像,分辨率为100 m,幅宽达1 500 km。GF5A-WTI在大范围摆扫过程中依次经历大倾角侧视成像-垂直对地成像-大倾角侧视成像,造成不同扫描行成像时的观测视角与成像物距均不相同且变化范围较大,使得原始影像存在变分辨率与大畸变的特点,导致了相邻帧影像存在复杂的重叠关系,在影像边缘两侧重叠大、中心区域重叠小甚至无重叠,这使得传统有理函数模型和图像拼接方法难以适用于GF5A-WTI超大幅宽摆扫影像处理。因此,提出了一种适用于超大幅宽摆扫序列影像的物方几何拼接方法。该方法通过像点加密地理查找表的直接法校正过程精准恢复了原始影像与目标影像的像点准确对应关系。对于序列影像的拼接处理,建立了物方拼接虚拟面模型,逐帧计算原始影像空间范围、星下点空间分辨率和起始地理空间坐标,并通过灰度重采样将多帧原始影像直接投影至虚拟拼接平面上,从而实现了超大幅宽摆扫影像的物方几何拼接处理。实验结果表明,所提方法处理的GF5A-WTI影像产品帧间拼接精度优于0.6个像素,内部几何精度优于1.5个像素,满足了高质量大区域成图需要,并被成功应用于GF5A-WTI业务化处理系统。

关键词:GF5A-WTI;超大幅宽摆扫成像;严格几何成像模型;像点加密处理;物方几何拼接

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-03-05

DOI:10.13203/j.whugis20240073 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0767-15

Geometric Stitching Processing of GF5A-WTI Ultra-Width Whiskbroom Sequence Images

DAI Rongfan[1] *WANG Mi*[1] *CHEN Ru*[2] *JIN Shuying*[2]

1 School of Cyber Science and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

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

Abstract: **Objectives**: The Wide-swath thermal infrared imager (WTI) of the Gaofen-5A satellite (GF5A) can obtain ultra-width images with the width of 1 500 km and the spatial resolution of 100 m by performing whiskbroom imaging. During the imaging process, it undergoes large-angle side-view imaging, imaging-vertical ground imaging, and large-angle side-view imaging in sequence, resulting in different observation angles and imaging object distances during different scanning rows, with a large range of variation, making the original image characterized by variable resolution and large distortion. This makes traditional correction models and image stitching methods difficult to apply to GF5A-WTI processing. **Methods**: To address these issues, we propose an object-space geometric stitching method for ultra-width whiskbroom sequence images. First, for the complex light transmission during the imaging process, an accurate mapping from im-

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3902804)。

第一作者:戴荣凡,博士生,研究方向为光学遥感卫星数据处理。dairongfan@whu.edu.cn

通信作者:王密,博士,教授。 wangmi@whu.edu.cn

age-plane coordinates to object-space coordinates is achieved by constructing a physical strict imaging model for the line-array wiskbroom system. Then, an navigation lookup table is constructed to determine the accurate correspondence between corrected image points and original image points. Finally, for the stitching of sequence images, an object-space stitching virtual plane model is established, where the spatial range, spatial resolution of the sub-satellite point, and starting geographic spatial coordinates of the original images are calculated frame by frame. Multiple frames of original images are then directly projected into the virtual stitching plane through grayscale resampling. **Results**: After the object-space geometric stitching process, the effective-area pixels of the output image are all covered by grayscale values, eliminating the issues of variable resolution and large distortion in the images. Simultaneously, seamless stitching is achieved in the complex overlapping areas between frames. **Conclusions**: The stitching accuracy of GF5A-WTI image products using the proposed method is better than 0.6 pixel, and the internal geometric accuracy is better than 1.5 pixel, meeting the needs of high-quality large-area mapping and successfully applied to the GF5A-WTI operational processing system.

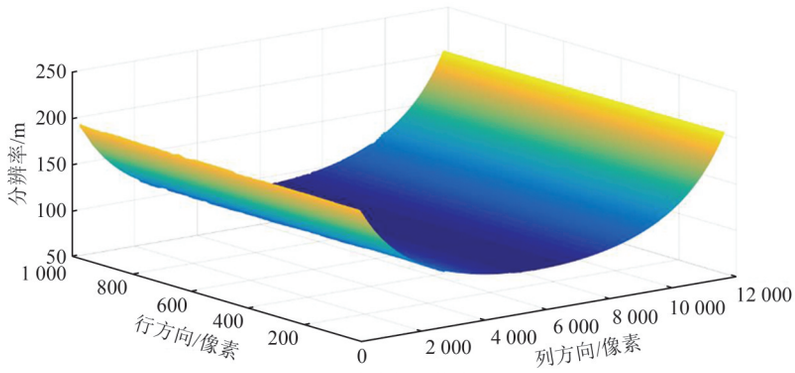
Key words: GF5A-WTI; ultra-width whiskbroom imaging; physical strict imaging model; image point encryption processing; object-space geometric stitching

2022年12月9日,高分五号01A卫星(Gaofen-5A, GF5A)在中国太原卫星发射中心成功发射,其搭载的宽幅热红外成像仪(wide-swath thermal infrared imager, WTI)采用线阵摆扫成像体制,可实现全球地区全天时地表精确温度探测,对中国生态环境、自然资源和应急减灾等行业有着重要应用。GF5A-WTI在成像过程中,旋转扫描镜旋转到偏离近地点-46.25°时开始采集地面图像,当扫描镜旋转到+46.25°时结束地面图像采集。在某个旋转位置,线列感光耦合组件(charge-coupled device, CCD)探测器可以在采样时刻获取一行扫描图像。这样,在每旋转一周后就可以获取一次完整的图像采集[1]。

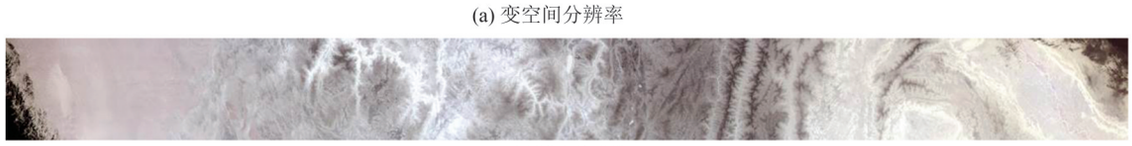
GF5A-WTI这种线阵摆扫成像方式可以实现1 500 km超大幅宽的对地观测[2],但也带来了诸多几何处理上的难题[3-5],主要表现在3个方面:(1)变空间分辨率。摆扫影像空间分辨率随采样位置有着复杂的变化关系,如图1(a)所示。在影像边缘处空间分辨率较星下点空间分辨率相差数倍,行列方向上的最小空间分辨率为92 m,而在行列方向上的最大空间分辨率达到了203 m。这就需要在几何畸变校正过程中对空间分辨率进行归一化处理,如图1(b)所示,否则,难以进行遥感应用。(2)严重的几何畸变。旋转扫描镜在不同的扫描位置对应的瞬时视场是不同的,加之超大幅宽成像受地球曲率影响严重,影像存在严重的几何变形。(3)复杂的重叠关系。一个扫描周期获取的完整影像对应地面范围为1 500 km(沿轨方向)×102 km(垂轨方向),为了满足高质量成图应用需求,需要对多帧扫描影像进行几何拼接,在沿轨方向形成更大的成像视场。由于摆扫影像的变空间分辨率、卫星平台的微抖动影响,在相邻扫描影像之间有着微小的重叠和错位关系(如图2所示),加之热红外图像的纹理较弱,常规图像拼接算法难以稳健地匹配足够的连接点,难以满足无缝拼接要求。

构建严格几何成像模型(physical strict imaging model, PSM)是遥感影像实现高精度定位的关键,也是影像几何处理的重要基础[6-9]。目前,光学遥感卫星普遍通过构建PSM来真实反映卫星物理成像关系,如高分四号(GF4)、资源三号(ZY3)、资源六号(GF6)、高分十一号(GF11)等卫星[10-14]。在线阵摆扫卫星成像过程中,由于旋转扫描机构的引入,光线的传递和成像过程更为复杂。国内外许多研究学者对PSM进行了改进[15-18],在HY1C/D、DaQi-1、SDGSAT-1等摆扫卫星上取得了有效应用。经过严格几何定位后,超大幅宽摆扫影像仍存在严重的几何畸变和复杂的帧间重叠问题难以满足应用需求,需进一步开展几何校正和多帧拼接处理,即物方几何拼接处理。

目前,遥感卫星几何校正方法主要分为一般多项式、有理函数模型(rational function model, RFM)等通用多项式模型和严格几何成像模型校正。其中,通用多项式模型是利用多项式直接对严格几何成像模型进行拟合,具有形式简单、通用较强,且能避免卫星关键参数泄漏等优点[19],在ZY3、GF4等卫星的实验表明,RFM可实现拟合严格几何模型满足子像素精度[20-21]。但对于数千千米以上的超大幅宽摆扫影像,由于影像内



(a) 变空间分辨率



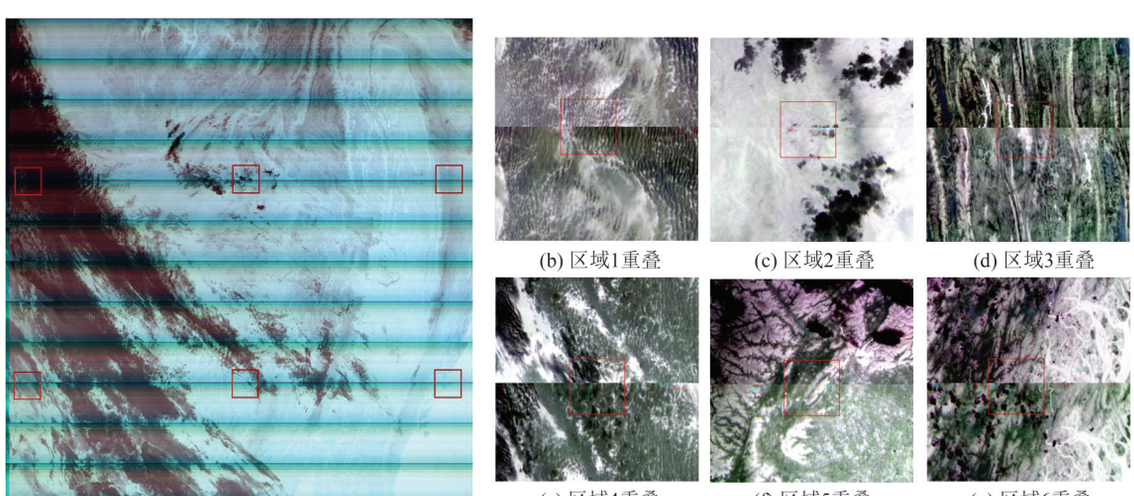
(b) 单帧原始影像



(c) 空间分辨率归一化影像

图1　GF5A-WTI影像的特点

Fig. 1　Characteristics of GF5A-WTI Image



(a) 原始整景影像　(b) 区域1重叠　(c) 区域2重叠　(d) 区域3重叠　(e) 区域4重叠　(f) 区域5重叠　(g) 区域6重叠

图2　GF5A-WTI相邻帧影像复杂的重叠关系

Fig. 2　Complex Overlapping Relationship of GF5A-WTI Adjacent Frames

部空间分辨率尺度差异显著,存在十分严重的几何畸变,会造成多项式模型参数出现病态方程、在非控制点发生振荡等问题,这无法满足影像高精度几何处理的需求。基于摆扫严格几何成像模型的几何校正方法,可以准确描述地面物点与相对应的像点的几何关系,具有精度高的特点,但其建模过程复杂,像点到物点的坐标反算困难,计算量大,难以在实际工程中应用。文献[22]针对无人机线阵摆扫CCD的几何成像模型,提出了严格几何校正的详细算法和流程,得到了正确、带地理编码的航空摆扫正射影像。文献[23]针对航空面阵摆扫相机,提出了首选基于光矢量确定物点在WGS84坐标系的位置,并根据实际空间分辨率反解算重采样至等经纬度格网,实现对每一帧影像的几何校正,然后利用图像拼接算法对大区域进行拼接,最后通过虚拟控制点进行二次几何精校正,显著改善了平面相对几何误差精度,但由于航空影像的视场远小于卫星影像,几何畸变的特点差异较大,导致该方法不能直接适用于摆扫式卫星影像。文献[24]提出线阵摆扫卫星的严格成像模型几何校正方法,利用相机参数、姿轨数据、数字高程模型(digital eleva-

tion model, DEM)等数据,通过间接法逐像点计算纠正后影像在原影像上的坐标和灰度值,采用双线性内插的方法得到当前点的灰度值,并在模拟影像上进行了实验。在大幅宽影像拼接方面,现有方法大多是基于线阵推扫成像的大视场拼接[25-28],在重叠关系复杂的摆扫影像上研究相对较少。文献[29]提出在构建单帧影像的严格几何成像模型的基础上,将序列帧摆扫影像投影至平面后进行拼接,通过构建整体大影像RFM进行坐标反算,从而实现高精度几何校正,该方法已得到了工程化应用,但难以适用于数千千米畸变严重的超大幅宽影像。文献[30]提出基于摆扫卫星成像的视场逐像素点进行空间分辨率计算,并通过对空间分辨率进行归一化,完成对原始影像的像素重采样,利用图像匹配算法准确计算出摆间影像的重叠位置,从而实现多帧影像的高精度拼接。这类方法过分依赖于匹配算法的可靠性,当相邻帧影像之间连接点稀少,或者在重叠区域内出现云雪覆盖、水域、纹理匮乏等现象时,难以保证多帧影像无缝拼接。

针对GF5A-WTI在摆扫成像过程中存在变空间分辨率、严重几何畸变和帧间影像复杂重叠关系的问题,本文提出了一种超大幅宽摆扫序列影像物方几何拼接处理方法:与传统几何校正和图像拼接处理相比较,简化了处理流程,在几何校正的同时直接完成了多帧影像的拼接;提出了像点加密地理查找表的直接校正方法,使目标影像与原始影像具有严格的对应关系,从而消除了影像畸变和空间分辨率尺度差异显著的问题;构建了物方拼接虚拟面模型,建立了原始序列影像和物方拼接影像的坐标映射关系,有效解决了复杂重叠关系带来的拼接难题。实验结果表明,本文方法的处理精度能够满足大区域影像的高精度成图需求。

1 摆扫成像无控几何定位

光学卫星遥感影像的无控几何定位是在无控制点的情况下,通过光学成像的基本原理准确地计算目标点在遥感影像中的空间位置。其中,严格几何成像模型利用摄影测量中的共线条件方程,构建出像平面坐标及其对应地面点的物方空间坐标之间的数学映射关系,这也是卫星影像物方几何拼接的基础。

摆扫成像相较于推扫成像在几何成像模型上更为复杂,主要表现在:(1)光路成像复杂,目标光线在旋转扫描镜、K镜和成像探元之间多次转换,相机坐标系到本体坐标系的旋转角度时刻发生变化;(2)摆扫成像几何定位是以每子帧为单元来构建几何成像模型,GF5A-WTI子帧成像时间达1.9 s,在卫星高速复杂运动平台下,需准确计算子帧影像的每一个采样位置的时刻、旋转角度、姿态观测值和轨道观测值。

1.1 摆扫严格几何成像模型

对于带有摆镜的光学遥感卫星,由于摆镜的反射作用,像点、投影中心和物点不再共线,导致像方矢量和物方矢量之间存在一定的夹角。在处理这种光学卫星的成像模型时,如果仍采用传统的共线方程进行处理,就会引入镜像误差,给后续几何处理带来问题。因此,需要采用新的方法来构建摆扫卫星严格几何成像模型。

在摆扫卫星成像过程中,光线在旋转扫描镜、K反射镜和线阵CCD探测器之间存在复杂的传递过程,可以等效视为线阵CCD探测器的严格摆扫成像[14]。

因此,在像方矢量和物方矢量共线的基础上,通过引入一个带摆角的旋转矩阵$\boldsymbol{R}_{\text{mirror}}^{\text{cam}}$,从而建立摆扫卫星的严格几何成像模型:

$$\boldsymbol{V}_{\text{obj}}=\lambda\boldsymbol{R}_{\text{img}}^{\text{obj}}\boldsymbol{R}_{\text{mirror}}^{\text{cam}}\boldsymbol{V}_{\text{img}} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{V}_{\text{img}}$为像方矢量;$\boldsymbol{V}_{\text{obj}}$为物方矢量;$\boldsymbol{R}_{\text{img}}^{\text{obj}}$为像方矢量到物方矢量的旋转矩阵;$\boldsymbol{R}_{\text{mirror}}^{\text{cam}}$为摆扫旋转坐标系至相机坐标系的旋转矩阵;$\lambda$为比例系数。在$\boldsymbol{R}_{\text{mirror}}^{\text{cam}}$确定的旋转坐标系$O$-$XYZ$中,坐标原点$O$为相机投影中心,$X$轴沿旋转扫描镜的扫描轴方向,$Z$轴垂直于旋转平面指向地面点,$Y$轴可由右手法则确定。

像方矢量是以成像投影中心(x_0,y_0)为起点、像点(x,y)为终点的矢量,考虑到在实际成像过程中会受到相机畸变$(\Delta x,\Delta y)$和焦距f的影响,$\boldsymbol{V}_{\text{img}}$可以表示为:

$$\boldsymbol{V}_{\text{img}}=\begin{bmatrix}x+x_0+\Delta x\\ y+y_0+\Delta y\\ f\end{bmatrix} \tag{2}$$

为了降低模型的复杂程度,消除模型参数之间的相关性,可采用主距归一化的处理方式,而无需顾及具体的主距值。描述线阵CCD上每个探元在相机坐标系下的指向角模型为:

$$\boldsymbol{V}_{\text{img}}=\left[\frac{x}{f}\ \frac{y}{f}\ 1\right]^{\text{T}}=\left[\tan\varphi_x\ \tan\varphi_y\ 1\right]^{\text{T}} \tag{3}$$

式中,f是焦距;探元p的二维指向角为(φ_x,φ_y)。该模型可进一步采用三次多项式模型进行拟合:

$$\begin{cases}\tan\varphi_x = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 \\ \tan\varphi_y = b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3\end{cases} \tag{4}$$

式中,a_0、a_1、a_2、a_3和b_0、b_1、b_2、b_3为多项式的系数。

物方矢量是以投影中心为起点、像点对应物方点为终点的矢量$\boldsymbol{V}_{\text{obj}}$,在WGS84坐标系中为:

$$\boldsymbol{V}_{\text{obj}} = \begin{bmatrix}X_s \\ Y_s \\ Z_s\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}}\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中,$[X_s \ Y_s \ Z_s]^{\text{T}}$为像点对应地物点在物方坐标系下的坐标矢量;$[X_{\text{GPS}} \ Y_{\text{GPS}} \ Z_{\text{GPS}}]^{\text{T}}$为成像投影中心坐标矢量,通过GPS观测值获得。

一般情况下,卫星平台姿态是在J2000直角坐标系中的观测值,而$\boldsymbol{V}_{\text{obj}}$是在WGS84坐标系中的物方矢量,像方坐标系到物方坐标系的旋转矩阵可分解为:

$$\boldsymbol{R}_{\text{img}}^{\text{obj}}(t) = \boldsymbol{R}_{\text{J2000}}^{\text{WGS84}}(t) \cdot \boldsymbol{R}_{\text{body}}^{\text{J2000}}(t) \cdot \boldsymbol{R}_{\text{cam}}^{\text{body}} \tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{R}_{\text{J2000}}^{\text{WGS84}}(t)$为J2000坐标系到WGS84坐标系的旋转矩阵,由地球自转参数确定;$\boldsymbol{R}_{\text{body}}^{\text{J2000}}(t)$通过时间内插姿态四元数获得;$\boldsymbol{R}_{\text{cam}}^{\text{body}}$表示相机坐标系与卫星本体坐标系间的旋转矩阵,由相机在卫星平台上的3个安装角$(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$确定的通过实验室测量或者在轨几何定标获得,在相当长时间内可认为是一个常数。

根据式(1)和式(6),摆扫卫星的严格几何成像模型可以进一步表示为:

$$\begin{bmatrix}X_s - X_{\text{GPS}} \\ Y_s - Y_{\text{GPS}} \\ Z_s - Z_{\text{GPS}}\end{bmatrix} = m\boldsymbol{R}_{\text{J2000}}^{\text{WGS84}}(t)\boldsymbol{R}_{\text{body}}^{\text{J2000}}(t)\boldsymbol{R}_{\text{cam}}^{\text{body}}\boldsymbol{R}_{\text{mirror}}^{\text{cam}}(t)\begin{bmatrix}\tan\varphi_x \\ \tan\varphi_y \\ 1\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{R}_{\text{mirror}}^{\text{cam}}(t)$为摆扫旋转坐标系到相机的旋转矩阵,可由线阵CCD传感器在成像坐标系的旋转角度确定。

1.2　几何定位计算过程

由于卫星轨道、姿态、摆角等测量系统是在不同的坐标系统下进行观测的,由式(7)可知摆扫卫星遥感影像的严格成像几何成像模型涉及不同成像坐标系的相互转换,具体过程见图3。

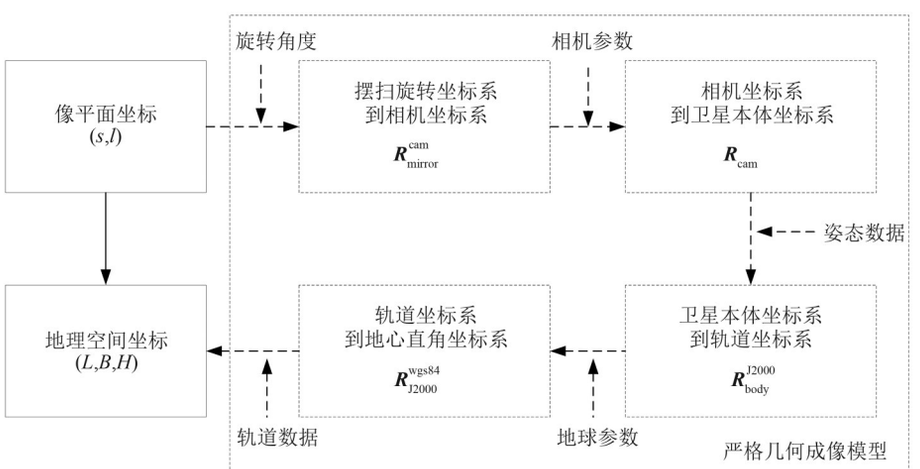


图3　摆扫成像几何定位过程

Fig. 3　Geometric Positioning Process of Whiskbroom Imaging

不同于推扫成像,摆扫成像在每一列都有个对应的采样时刻,不同的采样位置其姿态和轨道观测值不一样。因此,获取每一个扫描位置的精准成像时刻T是几何定位计算的基础:

$$T = T_0 + \Delta T \times n + \frac{\Delta t}{N} \times m \tag{8}$$

式中,T_0为该景成像的起始时刻;ΔT为各帧影像成像的时间间隔;Δt为子帧对地成像的时间;n为子帧序号;m为探元序号;N为并扫探元总数。

在给定了目标点的像平面坐标(s, l)后,根据列号s和行号l可以确定每个像元的成像时刻,从而对摆扫旋转角度、姿态、轨道进行数学建模,恢复出每一个成像时刻下旋转角度、姿态角度和轨道位置。式(7)中,在已知行列坐标、姿态轨道参数、旋转角度和相机参数时,利用DEM参考数据,根据地球椭球的性质可以准确计算出影像像点在对应WGS84坐标系下的空间位置(X, Y, Z),并将其转换到地理空间坐标(L, B, H)。

值得注意的是,在无控制点定位过程中,高程H通常是由DEM内插得到。在初始经纬度未知的情况下,可以选取平均高程$H_0 = 500.0$作为

初值,将其代入定位解算模型中,计算得到经纬度(L_0,B_0),再从DEM内插出更精确的高程H_1。这样,经过逐步迭代的方式可以获取更高精度的经纬度和高程。在迭代过程中,本文设置了两次迭代前后高程差阈值为0.5以及最大迭代次数为5。若在正常情况下,一般迭代2~3次即可实现高精度的定位解算;若影像定位误差较大,利用超过迭代次数终止循环,可以防止迭代不收敛造成的问题。

2 严格物方几何拼接

GF5A-WTI摆扫影像内不同像元成像的角度差异较大,不同位置的空间分辨率差异显著,最大可达2~3倍。在摆扫影像边缘处,由于大角度侧视成像和地形起伏等因素导致影像产生严重的几何畸变,而且几何畸变在影像上分布没有固定规律,现有的几何校正模型难以描述其分布特点。此外,单次摆扫影像在摆扫方向上的地面覆盖范围往往很大,而在沿轨方向上的地面覆盖范围往往较小,需要将多帧影像进行高精度几何拼接与校正处理才能够满足实际应用需求。针对这些问题,在GF5A-WTI精确成像几何建模和定位的基础上,本文提出了超大幅宽摆扫卫星物方几何拼接方法,具体过程如图4所示。

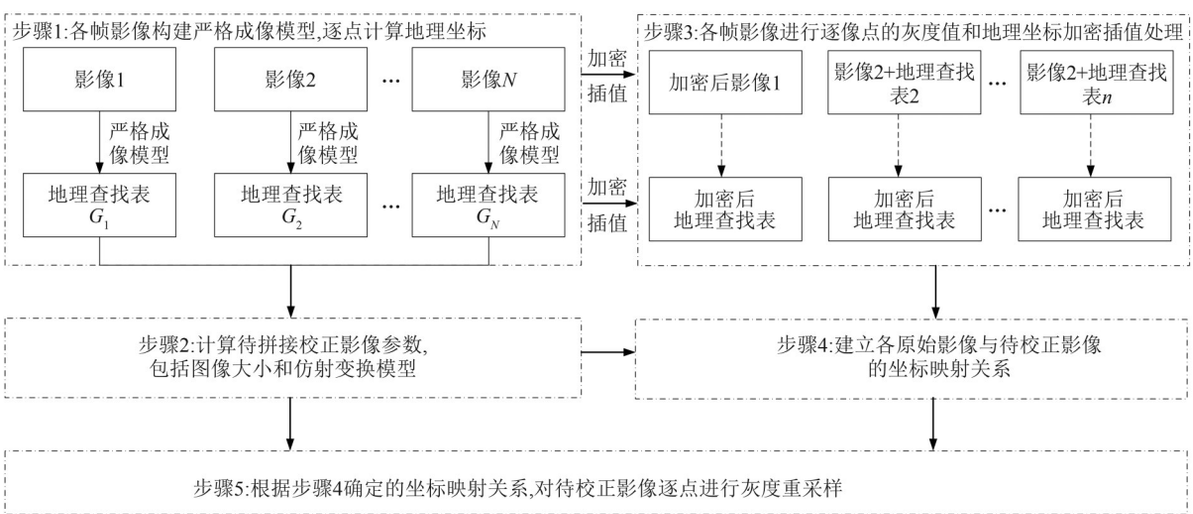


图4 严格物方几何拼接处理流程

Fig. 4 Flowchart of Strict Geometric Stitching Processing in Object-Space

2.1 拼接虚拟面确定

构建物方拼接虚拟面是实现从序列帧原始影像到物方拼接影像处理的关键环节。图5中描述了以相邻2帧原始影像确定物方拼接平面的确定过程。其中,$P_0P_1P_3P_2$、$P_2P_3P_5P_4$分别为子帧1、子帧2对应的原始影像边界范围,$Q_0Q_1Q_3Q_2$是将子帧1、子帧2投影至物方平面后的外接矩形边界范围。物方拼接平面参数包括空间分辨率、经纬度分辨率和拼接影像大小。确定物方拼接虚拟面的过程如下:

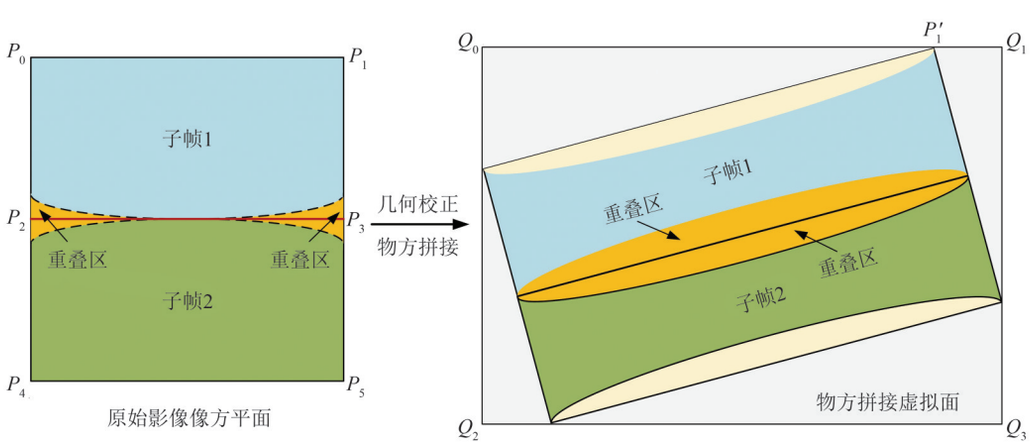


图5 物方拼接虚拟面确定过程示意(以相邻两帧影像为例)

Fig. 5 Diagram of Determination Process for Virtual Plane in Object-Space Stitching (Example of Two Adjacent Images)

1)确定单帧待校正影像空间分辨率。不同于推扫成像,摆扫成像边缘区域和中心区域分辨率差异很大,需要对单帧影像所有像元进行空间分辨率归一化处理。考虑到摆扫影像最高空间分辨率的位置为星下点中心区域,因此,本文通过计算其中心区域的空间分辨率作为单帧待校正影像的空间分辨率。设单帧摆扫影像探元数为m(行方向像数),采样点数为n(列方向像数),在GF5A-WTI上m远小于n,则中心区域的四角点T_0、T_1、T_2、T_3的计算公式为:

$$\begin{cases} T_0=((n-m)/2,0) \\ T_1=((n+m)/2,0) \\ T_2=((n+m)/2,m-1) \\ T_3=((n-m)/2,m-1) \end{cases} \tag{9}$$

这样,在确定中心区域空间范围后,可计算出单帧影像的空间分辨率(g_λ,g_φ):

$$\begin{cases} g_\lambda=\dfrac{\lambda_{\max}-\lambda_{\min}}{w} \\ g_\varphi=\dfrac{\varphi_{\max}-\varphi_{\min}}{h} \end{cases} \tag{10}$$

式中,$\lambda_{\max}$、$\lambda_{\min}$与$\varphi_{\max}$、$\varphi_{\min}$分别为中心区域的经度、纬度的最大值和最小值;w、h分别为中心区域的长、宽像素数。

2)确定拼接影像参数。准确计算出物方拼接虚拟面的参数是后续几何拼接的基础。设有N帧影像待拼接,对各帧影像四角点的空间坐标进行比较,确定出拼接影像的空间坐标范围($L_{\max}$,$B_{\max}$,$L_{\min}$,$B_{\min}$)。拼接影像的空间分辨率(g_L,g_B)可以通过各帧影像的空间分辨率进行取平均得到。这样在确定了拼接影像的空间地理坐标范围和空间分辨率后,可计算出拼接影像的行列像素数大小:

$$\begin{cases} M=\dfrac{L_{\max}-L_{\min}}{g_L} \\ N=\dfrac{B_{\max}-B_{\min}}{g_B} \end{cases} \tag{11}$$

这样,对于拼接影像的像平面坐标和地理空间坐标可以通过仿射变换(affine transformation,AT)来进行映射:

$$\begin{cases} L=L_{\min}+g_L\times x,0\leqslant x<M \\ B=B_{\min}+g_B\times y,0\leqslant y<N \end{cases} \tag{12}$$

式中,(x,y)为拼接影像的像平面坐标;(L,B)为该点对应的地理空间坐标。

2.2　坐标映射过程

摆扫影像内部几何畸变十分严重,RFM难以严格拟合地理坐标和像点坐标关系。因此,针对GF5A-WTI这种空间分辨率尺度差异大的特点,本文提出基于像点加密的方法来解决原始影像和待校正影像坐标不适配的问题。原始影像和待校正影像坐标映射与采样流程如图6所示,具体过程如下:

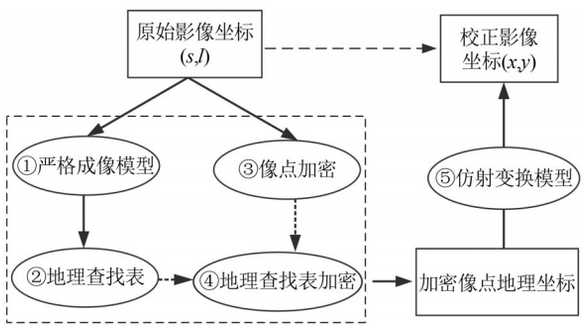


图6　几何坐标映射过程

Fig. 6　Geometric Coordinate Mapping Process

1)构建PSM。对原始影像像点$I(s,l)$,列号s确定探元指向角,行号l确定成像时间以及旋转扫描镜角度,根据成像时间内插确定成像时刻的姿态和轨道位置,从而建立严格几何成像模型。

2)计算子帧地理查找表(geographical lookup table, GLT)。通过步骤1)的严格几何成像模型,逐像点$I(s,l)$计算对应的空间坐标(L,B,H),将其结果记录在GLT中:

$$\begin{cases} \mathrm{GLT}[0](s,l)=L \\ \mathrm{GLT}[1](s,l)=B \\ \mathrm{GLT}[2](s,l)=H \end{cases} \tag{13}$$

3)像点加密处理。超大幅宽摆扫影像存在严重的空间分辨率尺度差异问题,若直接进行校正会造成校正影像上大范围的像元缺失。为了保证校正后影像的所有像元灰度值都有覆盖,提出对原始影像像点$I(s,l)$按如下处理,可以得到加密后的像点$I'(s',l')$:

$$\begin{cases} s'=s+\dfrac{1}{K}i,0\leqslant i<K \\ l'=l+\dfrac{1}{K}j,0\leqslant j<K \end{cases} \tag{14}$$

式中,K为加密格网大小,其值不小于影像边缘分辨率$g_{\max}$和星下点分辨率$g_{\min}$的比值:

$$K=\mathrm{int}(g_{\max}/g_{\min}) \tag{15}$$

式中,int表示取整运算。本文取$K=2$(GF5A-WTI最大空间分辨率203 m,最小空间分辨率92 m)。这样,可以保证校正后的影像每个像素在原始影像对都有对应像素的灰度覆盖。

4)地理坐标插值。如图7所示,假设格网加

密后$I'(s',l')$整像素附近点分别为I_0、I_1、I_2、I_3,根据步骤2)建立了GLT后,可以准确知道I_0、I_1、I_2、I_3对应的空间坐标。对于像点加密后的空间坐标计算,采用的是重采样插值处理。

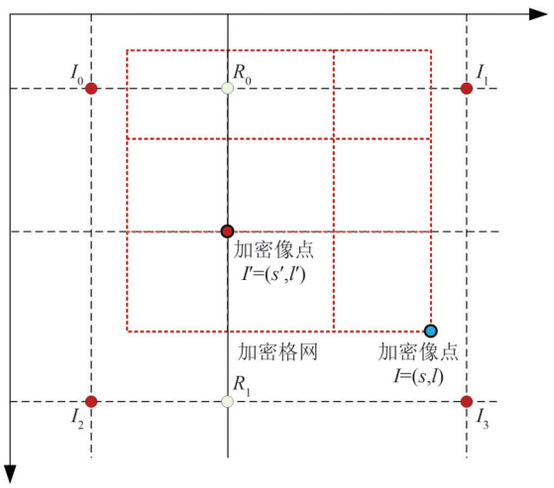


图7 像点加密计算过程

Fig. 7 Encryption Calculation Process of Image Point

考虑到效率和精度,本文采用双线性插值法,需要在垂轨和沿轨两个方向上分别进行线性插值。虽然每一步在采样值和位置上都是线性的,但总体上插值不是线性的,而是二次的。首先在垂轨方向上插值:

$$\begin{cases} R_0(L,B)=I_0(L,B)+(I_1(L,B)-I_0(L,B))(s'-\text{int}\,s') \\ R_1(L,B)=I_2(L,B)+(I_3(L,B)-I_2(L,B))(s'-\text{int}\,s') \end{cases} \tag{16}$$

通过计算出的R_0和R_1两点经纬度值,经过线性插值即可求得I'点的经纬度坐标:

$$I'(L,B)=R_1(L,B)+(R_2(L,B)-R_1(L,B))(l'-\text{int}\,l') \tag{17}$$

5)灰度值插值。利用§2.2确定的拼接影像仿射变换模型,计算出加密格网地理坐标在校正后影像的坐标位置(x,y)。灰度值可根据格网加密点(s',l')与原始像点(s,l)的灰度值关系确定,采用的是和GLT插值的相同双线性插值法。

6)坐标和灰度值映射。物方几何拼接就是实现序列帧原始影像和物方拼接虚拟影像的二维坐标和灰度值映射过程。

如图7所示,加密像点(s',l')的灰度值和对应的地理经纬度坐标(L,B)经过步骤3)和步骤4)都是确定的,再根据式(12)计算的AT模型的逆变换AT^{-1}模型,可以求出其在拼接影像中的坐标。

$$\begin{cases} U_k(s',l')=v \\ \text{GLT}_k(s',l')=(L,B) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (x,y)=\text{int}\,\text{AT}^{-1}(L,B) \\ L_2(x,y)=v \end{cases} \tag{18}$$

式中,v为第k帧影像U_k在加密像点(s',l')处的灰度值;$L_2(x,y)$为加密像点在2级影像(L2A)上的对应整像素坐标。本文的几何拼接与校正过程是完全基于地理坐标一致性约束,即将原始影像某经纬度坐标下的灰度值插入到2级影像相同经纬度坐标的灰度值,若2级影像同一经纬度坐标对应原始多个单帧影像上相同的经纬度坐标,则其灰度值取其平均值。这样,通过羽化处理可以消除相邻帧影像在重叠区的相对辐射差异。

7)重复上述流程,可以建立校正影像坐标和原始影像坐标之间的灰度映射关系。

每一帧原始影像到物方几何拼接影像处理过程中涉及到的所有像元的像点加密和灰度插值步骤,均可以映射至图形处理器上进行并行加速处理,可显著提高算法的处理效率。

3 几何拼接处理实验与分析

3.1 实验数据

本文选用了6组不同成像时间、不同地区的GF5A-WTI L0A数据进行实验,每组均由12帧影像拼接而成,覆盖了水域、山区、沙漠、云雪等场景,影像空间分辨率为100 m,每帧影像大小12 027×1 024像素。经过本文物方几何拼接处理,最终生成L2A影像(见图8)。其中,GF5A-WTI产品体系说明如下所示。

1)L0A:经过解码后得到的原始影像数据和卫星辅助数据(姿态、轨道和成像时间等)。

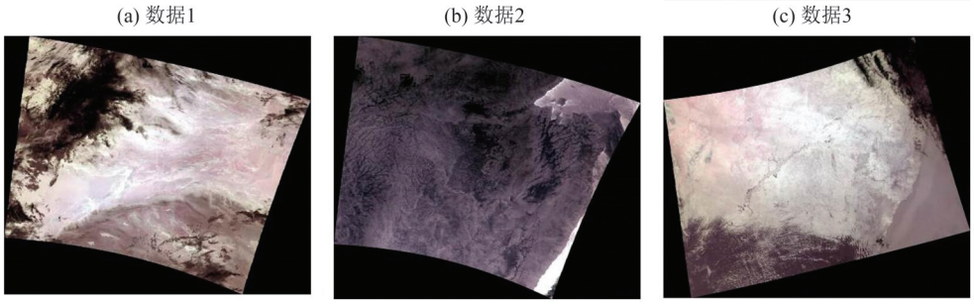
2)L1A:在L0A基础上,经过相对辐射校正和无控几何定位处理生成含有多帧相对辐射校正的影像和带地理定位的GLT数据。

3)L2A:在L1A基础上,通过物方几何拼接处理,包括系统几何校正和多帧几何拼接,生成带有投影信息的大区域影像产品。

值得说明的是,由于卫星发射后,受在轨空间热环境等因素影像,主点、主距和线阵CCD安装等实验室测定参数会发生变化。因此,需要基于控制信息对严格成像模型参数进行几何定标处理,提供可靠的在轨相机参数。本文的定位、校正和拼接等几何处理均是由在轨几何定标提供的相机参数上基础进行的。为便于定量评价



(a) 数据1　(b) 数据2　(c) 数据3



(d) 数据4　(e) 数据5　(f) 数据6

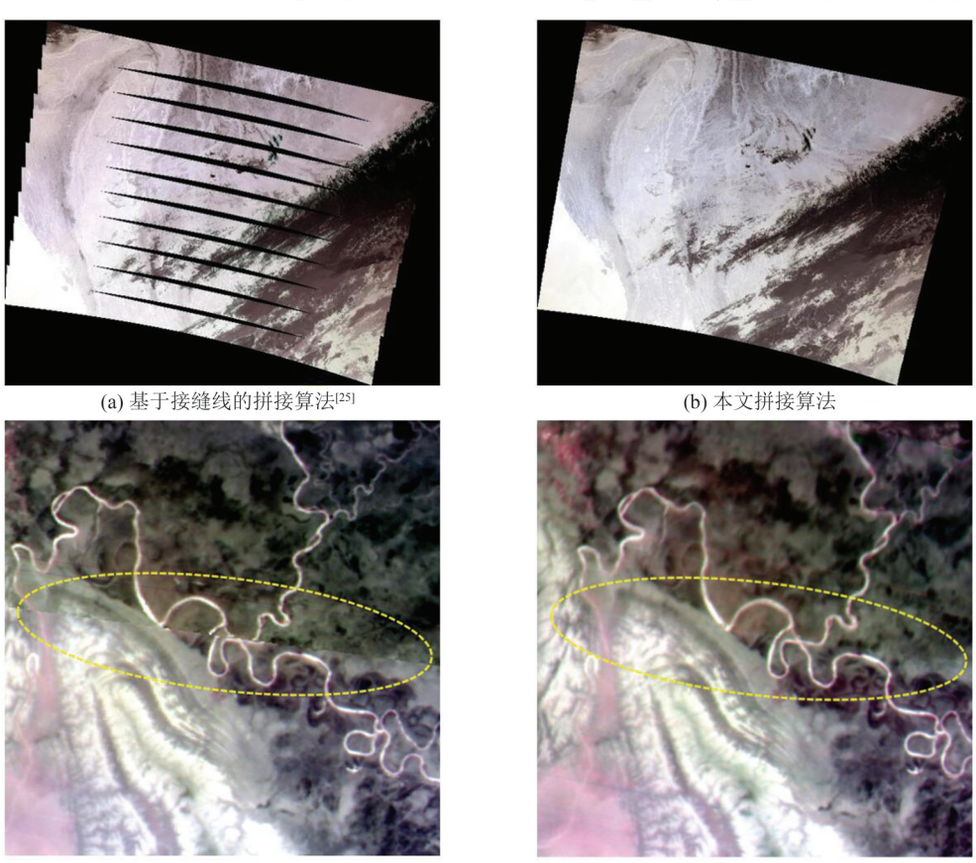
图 8　本文算法生成的 L2A 影像

Fig. 8　Level 2A Images Generated by the Proposed Algorithm

影像拼接精度和几何定位精度,选用 75 m 空间分辨率的 Landsat 7 数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)和 90 m 空间分辨率的 SRTM DEM 作为参考数据。

3.2　拼接精度分析

GF5A-WTI 的 L2A 影像产品是在多帧扫描影像的基础上拼接而成的。因此,通过对重叠区的定位精度一致性进行测试,可以进一步验证单帧影像几何校正的准确性,并确定其是否能够满足相邻影像间无缝拼接的要求。图 9 展示了多帧影像几何拼接后的效果。由于校正后相邻帧的有效范围呈弧形,基于接缝线的拼接算法[25]在多



(a) 基于接缝线的拼接算法[25]　(b) 本文拼接算法

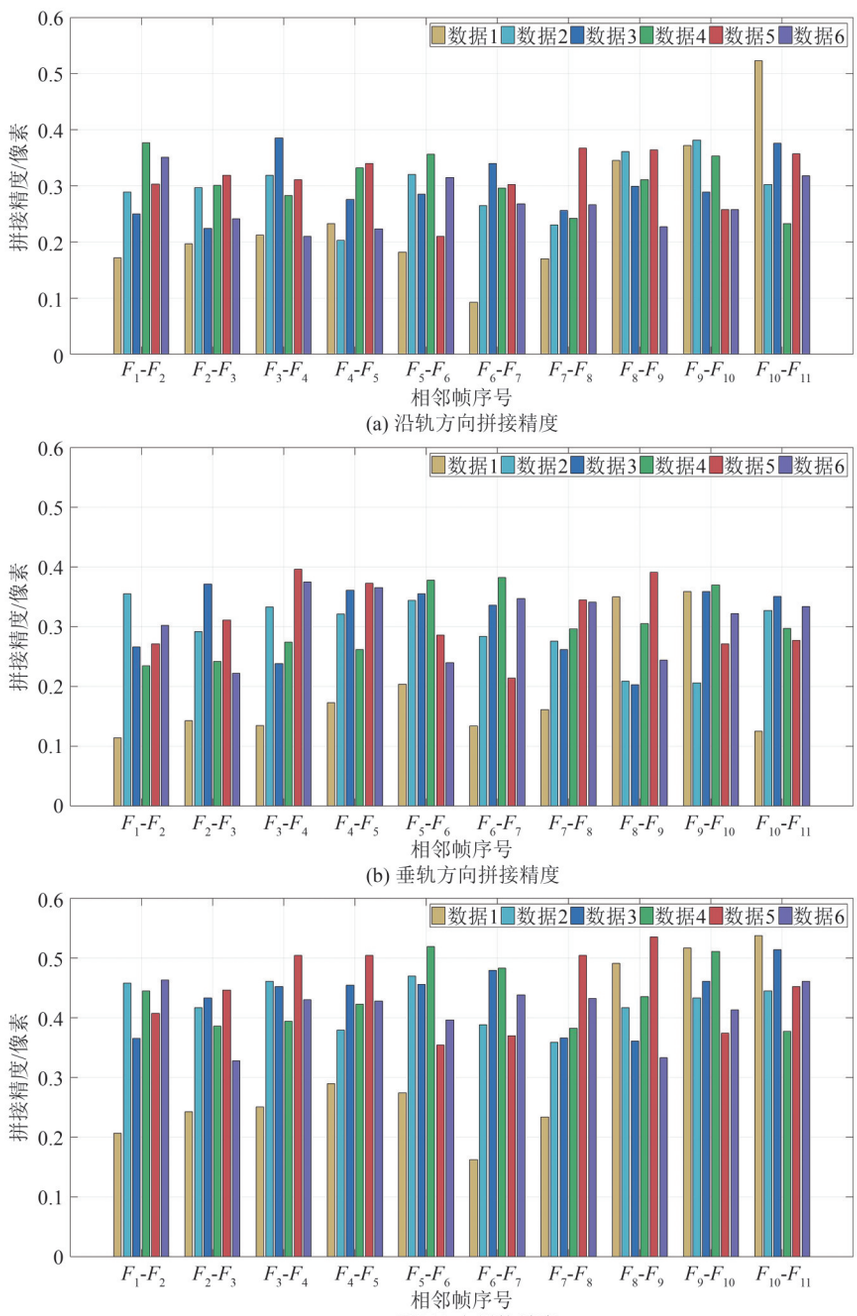
(c) 本文拼接算法局部效果(实验室参数)　(d) 本文拼接算法局部效果(相机参数标定后)

图 9　不同拼接算法效果对比

Fig. 9　Comparison of the Effect of Different Splicing Algorithms

帧重叠区拼接时出现了漏拼区域,如图9(a)所示,且在边缘处相邻帧拼接呈现出锯齿状效应;经过本文的拼接算法处理,多帧影像拼接无漏拼区域,重叠区域无错位和色差,在边缘处相邻帧影像过渡均匀,呈现出较好的无缝拼接效果,如图9(b)所示。图9(c)是使用发射前的实验室参数进行拼接的局部效果,可以看出相邻帧影像存在明显的错位,这严重制约了影像产品的应用效果;经过在轨参数定标后,如图9(d)所示,几何错位得以有效解决,这也证实了卫星发射在轨后相机参数会发生变化。

在定量评价上,通过相邻帧影像重叠区的相对定位误差测试得到了帧间拼接精度结果。如图10所示,通过相邻帧(F为帧号)拼接精度可以看出在沿轨、垂轨和平面方向上帧间拼接误差均小于0.6个像素,其中最大误差在0.54个像素,平均精度优于0.5个像素,达到了无缝拼接和高质量成图的精度要求。



(a) 沿轨方向拼接精度

(b) 垂轨方向拼接精度

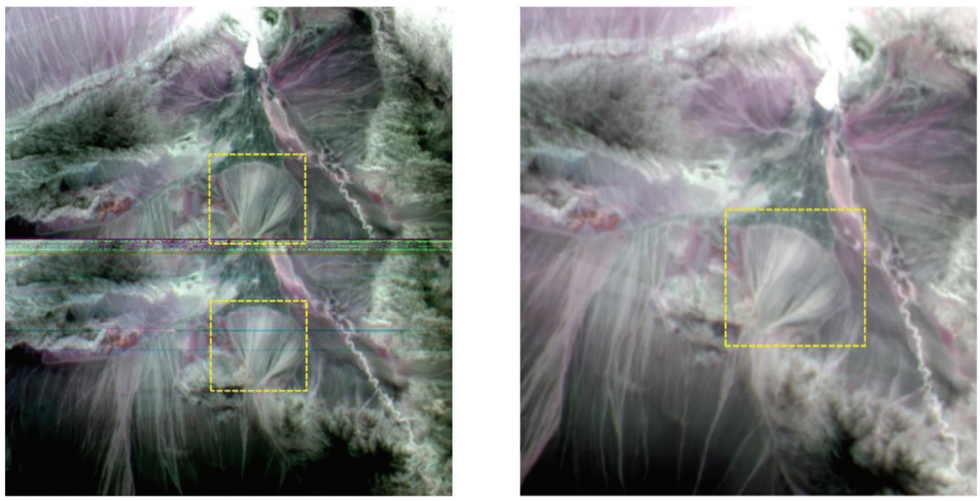
(c) 平面方向拼接精度

图10 测试数据相邻帧影像拼接精度

Fig. 10 Adjacent-Frame Images Stitching Accuracy of Test Data

GF5A-WTI的相邻帧影像存在复杂的重叠关系,前后两帧影像上在星下点中心区域几乎无重叠,而在边缘区域重叠可以达到数百行,表现在图像上同一地物在不同影像上重复出现,如图

11(a)所示,这给数据的应用带来极大的困难。在经过本文物方几何拼接处理后,重叠区域得到了有效去除,且在过渡区域存在的异常响应探元(黑线、盲元区等)明显改善,如图11(b)所示。

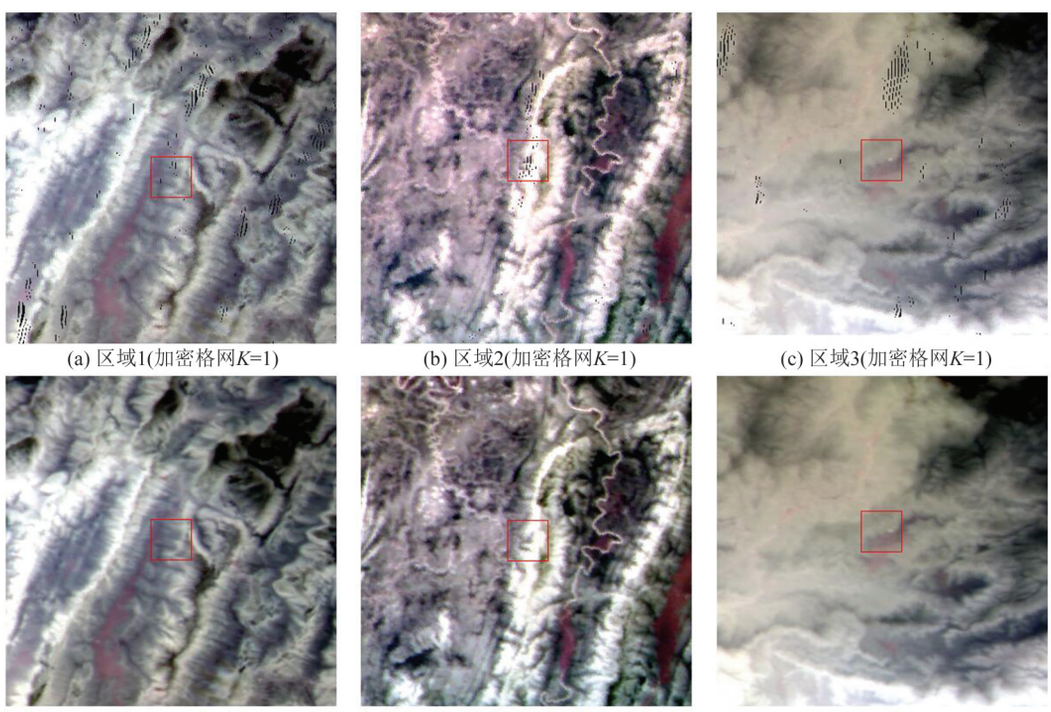


(a) 相邻两帧原始影像(边缘区域重叠很大)　　(b) 相邻两帧畸变校正后拼接

图11　重叠区处理效果

Fig. 11　Processing Effect of Overlapping Area

此外,GF5A-WTI影像在边缘和中心的空间分辨率有着2～3倍的尺度差异。在对原始影像进行直接法校正时,原始影像和校正后的影像在中心处两者像点关系是近似的一一对应,但在边缘是一对多的关系。因此,选择合适的加密格网大小对原始影像进行像点加密处理是必要的,当格网过小时,就会造成校正后影像存在黑点情况,如图12(a)～12(c)所示。当格网过大时,则会大大增加计算量,降低算法的效率。根据式(14),本文加密格网大小设置为2,畸变校正后的结果如图12(d)～12(f)所示,直接法带来的黑点问题得到有效解决。



(a) 区域1(加密格网K=1)　(b) 区域2(加密格网K=1)　(c) 区域3(加密格网K=1)

(d) 区域1(加密格网K=2)　(e) 区域2(加密格网K=2)　(f) 区域3(加密格网K=2)

图12　不同加密格网大小的校正效果

Fig. 12　Correction Effect of Different Encrypted Gridsizes

3.3　几何定位精度分析

为了验证本文算法无控几何定位精度的水平,选取了6景经过物方几何拼接的L2A影像产品,其中每景影像均由12帧影像拼接而成,并从

参考DOM和DEM中获得若干地面控制点(ground control point, GCP),计算出GCP的影像坐标和实际地理坐标的差值,计算多景影像的GCP位置误差值的中误差作为影像的定位误差。

1)选取不同时间、不同轨道、不同地理位置、清晰、成像质量良好的L2A数据;

2)进行控制点自动测量,根据待评测影像、参考影像(参考影像自动提取与加载模块提取的DOM、DEM)的灰度信息在物方空间进行影像配准,每景影像获取均匀分布的5×5个以上控制点;

3)计算控制点在待评影像和参考影像的实际地理坐标差值的中误差作为该景影像的无控几何定位精度。

影像几何定位的精度包括两个方面:(1)绝对定位精度,是指影像上像素点的地理坐标和参考影像上像素点的地理坐标的定位误差统计值;(2)内部几何精度,是指在经过几何畸变校正后的影像上选取部分检查控制点,统计其之间的相对误差,主要反映了影像内部非线性的畸变误差[11]。对6景影像进行了定位精度的测试,从测试结果表1中可以看出,绝对定位精度的平面精度在312.7 m,最大定位误差为334.7 m,最小定位误差为248.0 m,内部几何精度为1.34像素。

表1 L2A影像几何精度测试

Table 1 Geometric Positioning Accuracy of Level 2A Image

影像	拍摄时间	检查点数/个	无控定位精度误差/m			几何内精度/像素		
			垂轨	沿轨	平面	垂轨	沿轨	平面
数据1	2023-02-04	64	284.0	177.0	334.7	1.251	0.928	1.558
数据2	2023-02-05	80	270.9	115.2	294.4	0.966	0.732	1.212
数据3	2023-02-03	65	300.0	130.1	327.1	1.048	1.053	1.486
数据4	2023-03-27	83	245.8	129.2	277.7	1.022	0.693	1.235
数据5	2023-06-28	74	226.5	180.9	289.9	1.066	0.829	1.350
数据6	2023-02-01	51	207.9	135.3	248.0	0.877	0.758	1.159
均值		66	265.0	162.3	312.7	1.041	0.847	1.344

3.4 拼接前后精度一致性

可以预见的是,高质量几何拼接后的产品影像几何定位精度与单帧影像的几何定位精度具有一致性。因此,实验选取了数据1的各个单帧畸变校正影像(F_1~F_{12})和物方几何拼接的整个影像(L2A),分别利用参考影像评价其定位精度。表2列出了各单帧几何校正和物方几何拼接影像,可看出单帧影像定位精度平均误差在平面方向为300.3 m,中误差为320.6 m,物方几何拼接后影像定位精度在平面方向平均误差为298.0 m,中误差为334.6 m,说明拼接后影像的几何精度和拼接前单帧影像具有一致性。值得注意的是,本文提出的物方几何拼接处理是基于严格几何成像定位模型进行处理的,其精度直接受到姿态观测、轨道观测、时间观测、摆镜角度观测等测量精度和几何定标精度的综合因素影响。

4 结 语

GF5A-WTI通过旋转扫描成像可以获取数千千米的超大幅宽影像,但这种大视场成像的体制也给处理带来了诸多难题。空间分辨率尺度差异和超大幅宽带来的严重几何畸变会导致传统RFM无法拟合影像像点坐标到地理空间坐标的数据映射关系,加之帧间影像复杂的微弱重叠关系,导致常规图像拼接的方法难以适用。

针对这些问题,本文提出了基于像点加密的物方几何拼接方法。首先,通过构建摆扫影像的严格几何成像模型,并建立GLT来逐像点存储严格定位模型计算的地理经纬度坐标;然后,对原始影像和GLT进行格网点加密和灰度重采样,使得校正后的影像分辨率趋于一致;最后,通过建立了物方拼接虚拟面模型,完成了各帧影像到拼接影像的精准坐标映射。为了测试本文物方几何拼接方法的准确性,实验选取了6景不同时间、不同地点的GF5A-WTI数据进行测试。结果表明,GF5A-WTI帧间影像拼接优于0.6个像素,影像内精度优于1.5个像素,拼接后的大影像与单帧影像几何精度具有一致性,满足了超大幅宽摆扫影像的高质量成图要求。目前,该算法已成功

表 2　单帧校正影像和拼接校正影像几何精度

Table 2　Geometric Accuracy of Single Frame Correction Image and Stitching Correction Image

影像类别	编号	检查点数/个	平均误差/m			中误差/m		
			垂轨	沿轨	平面	垂轨	沿轨	平面
单帧几何校正	F_1	44	226.3	147.8	270.4	274.0	157.0	315.8
	F_2	38	231.7	195.7	303.2	279.9	197.1	342.3
	F_3	39	256.0	185.4	316.1	273.8	158.6	316.4
	F_4	37	212.0	154.9	262.5	288.4	206.8	354.9
	F_5	44	217.8	159.6	270.0	251.1	156.0	295.6
	F_6	44	215.0	156.1	265.7	260.5	180.8	317.1
	F_7	43	210.3	175.4	273.8	285.3	161.6	327.8
	F_8	40	218.1	180.5	283.1	259.0	188.9	320.6
	F_9	39	258.8	180.9	315.8	254.3	184.1	313.9
	F_{10}	36	255.0	155.3	298.5	254.1	198.5	322.4
	F_{11}	40	215.4	156.5	266.3	266.9	189.3	327.2
	F_{12}	44	247.3	195.9	315.5	260.0	165.9	308.4
	均值	40	238.9	181.3	300.3	268.9	173.5	320.6
物方几何拼接	L2A	64	222.8	197.9	298.0	284.0	177.0	334.6

应用于中国资源卫星中心GF5A地面处理系统。

参　考　文　献

[1] 刘小勇. 星载超大幅宽红外成像扫描及变焦控制技术研究[D]. 上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
LIU Xiaoyong. Research on Spaceborne Ultra-Large-Scale Infrared Imaging Scanning and Zoom Control Technology[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.

[2] 胡芬, 金淑英. 高分辨率光学遥感卫星宽幅成像技术发展浅析[J]. 地理信息世界, 2017, 24(5): 45-50.
HU Fen, JIN Shuying. Analysis of the Development of Wide-Range Imaging Technology for High-Resolution Optical Remote Sensing Satellites [J]. *Geographic Information World*, 2017, 24(5): 45-50.

[3] 刘银年. 45°镜多元探测器并扫成像特性和扫描轨迹分析[J]. 光学精密工程, 2002(1): 110-115.
LIU Yinnian. Imaging Characteristics and Scanning Trajectory Analysis of 45° Mirror Multi-detector Scanning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002(1): 110-115.

[4] 郑列华, 尹达一, 冯鑫. K镜消像旋机构在海洋卫星水色仪中的应用[J]. 红外技术, 2007(1): 17-21.
ZHENG Liehua, Yin Dayi, Feng Xin. Application of K-mirror Image Rotation Mechanism in Ocean Satellite Ocean Color Instrument [J]. *Infrared Technology*, 2007(1): 17-21.

[5] 刘素美, 马红章. 45°旋转扫描镜多元并扫的图像畸变及软件校正[J]. 红外与激光工程, 2007(4): 526-529.
LIU Sumei, MA Hongzhang. Image Distortion and Software Correction of Multi-channel Multi-scan with 45° Rotating Scanning Mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007(4): 526-529.

[6] 钟灵毓, 薛武, 王鹏. 光学遥感影像几何校正方法分析[J]. 北京测绘, 2020, 34(9):1271-1275.
ZHONG Lingyu, XUE Wu, WANG Peng. Analysis of Geometric Correction Methods for Optical Remote Sensing Images [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2020, 34(9):1271-1275.

[7] 张致齐, 王密, 曹金山, 等. 基于物方一致性的珞珈三号01星视频数据在轨实时稳像[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(6): 899-910.
ZHANG Zhiqi, WANG Mi, CAO Jinshan, et al. Object-Space-Consistency-Based Real-Time Stabilization Approach for Luojia3-01 Video Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(6): 899-910.

[8] 陈新阳, 龙小祥, 李庆鹏, 等. 陆地生态系统碳监测卫星激光数据处理与精度验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230110.
CHEN Xinyang, LONG Xiaoxiang, LI Qingpeng, et al. Data Proccing and Accuracy Verification for Laser Altimeter of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/

j.whugis20230110.

[9] 鲁文强,胡秀清,黄勇,等.FY-3D卫星姿轨误差标校及对定位影响研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(2):256-263.
LU Wenqiang, HU Xiuqing, HUANG Yong, et al. Analysis of FY-3D Satellite Attitude and Orbit Accuracy and Its Influence on Geolocation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(2): 256-263.

[10] WANG Mi, CHENG Yufeng, CHANG Xueli, et al. On-orbit Geometric Calibration and Geometric Quality Assessment for the High-Resolution Geostationary Optical Satellite Gaofen-4[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125:63-77.

[11] 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.
TANG Xinming, ZHANG Guo, ZHU Xiaoyong, 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.

[12] LU Xueliang, WANG Jianrong, YANG Xiuce, et al. On-orbit GeometricCalibration and Preliminary Accuracy Evaluation of GF-14 Satelitel[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2023, 6(2): 62-70.

[13] PI Yingdong, WANG Mi, YANG Bo, et al. Robust Camera Distortion Calibration via Unified RPC Model for Optical Remote Sensing Satellites [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60:1-15.

[14] 王密,郭贝贝,龙小祥,等.高分六号宽幅相机在轨几何定标及精度验证[J].测绘学报,2020,49(2):171-180.
WANG Mi, GUO Beibei, LONG Xiaoxiang, et al. Geometric Calibration and Accuracy Verification of Gaofen-6 Wide-Angle Camera in Orbit [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(2): 171-180.

[15] 苗壮,何斌,王俊琦,等.空间相机摆扫成像建模及摆镜角速度残差分析[J].航天返回与遥感,2015,36(6):39-47.
MIAO Zhuang,HE Bin, WANG Junqi, et al. Modeling of Space Camera Sweep Imaging and Analysis of Angular Velocity Residuals of the Sweep Mirror [J]. *Aerospace Return and Remote Sensing*, 2015, 36(6): 39-47.

[16] 刘建阳,毛志华,陶邦一,等.HY-1C/D卫星中国海洋水色水温扫描仪几何定位方法[J].海洋学报,2022,44(5):47-61.
LIU Jianyang, MAO Zhihua, TAO Bangyi, et al. Geometric Positioning Method for the HY-1C/D Satellite China Ocean Color and Water Temperature Scanner [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 44(5): 47-61.

[17] CAO Jinshan. Geometric Calibration of the Whiskbroom DaQi-1 WSI Based on an Equivalent Linear-Array CCD[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-13.

[18] LI Xiaoyan, LI Liyuan, ZHAO Lixing, et al. In-orbit Geometric Calibration for Long-Linear-Array and Wide-Swath Whisk-Broom Tis of SDGSAT-1 [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-14.

[19] 李潇雁.宽幅高分辨热像仪几何定位关键技术研究[D].上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所),2021.
LI Xiaoyan. Research on Key technologies of Geometric Positioning of Wide-Range High-Resolution Thermal Imaging System [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics,Chinese Academy of Sciences), 2021.

[20] Pl Yingdong, XIE Baorong, YANG Bo, et al. On-orbit Geometric Calibration of Linear Push-Broom Optical Satellite Based on Sparse GCPs[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(1): 64-75.

[21] 皮英冬,王密,王思恒,等.基于有理多项式模型的高分四号卫星可见光通道面阵成像载荷在轨几何定标[J].光学学报,2023,43(12):321-329.
PI Yingdong, WANG Mi, WANG Siheng, et al. On-orbit Geometric Calibration of the Visible Channel Imaging Payload of Gaofen-4 Satellite Based on Rational Polynomial Model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 321-329.

[22] 张艳,王涛,徐青,等.无人机载线阵摆扫CCD影像几何校正[J].测绘科学技术学报,2006,23(3):168-170.
ZHANG Yan, WANG Tao, XU Qing, et al. Rectification for Linear Whiskbroo m CCDI Magery Acquired on Pilotless Aircraft [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(3): 168-170.

[23] 李赛,胡勇,巩彩兰,等.面阵摆扫热红外航空影像分步几何校正方法[J].红外与毫米波学报,2020,39(2):242-250.
LI ai, HU Yong, GONG Cailan, et al. A Step-by-

Step Geometric Correction and Error Analysis of Swingswept Array Thermal Infrared Aerial Image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(2): 242-250.

[24] 薛武,王鹏,钟灵毓. 线阵垂轨环扫式光学遥感卫星影像几何纠正[J]. 光学精密工程,2021,29(12): 2924-2934.
XUE Wu, WANG Peng, ZHONG Lingyu. Geometric Correction of Optical Remote Sensing Satellite Images Captured by Linear Array Sensors Circular Scanning Perpendicular to the Orbit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29 (12): 2924-2934.

[25] CAO Jinshan, ZHANG Zhiqi, JIN Shuying, et al. Geometric Stitching of a Haiyang-1c Ultra Violet Imager with a Distorted Virtual Camera [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 4109-4126.

[26] 杨威, 周楠, 曹金山. "海洋一号"D卫星海岸带成像仪双相机几何拼接[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(4): 99-107.
YANG Wei, ZHOU Nan, CAO Jinshan. Geometric Stitching of Dual Cameras for the Coastal Zone Imager Onboard the Haiyang-1 D Satellite [J]. *Aerospace Return and Remote Sensing*, 2021, 42 (4): 99-107.

[27] 潘俊, 胡芬, 王密, 等. 基于虚拟线阵的 ZY-1 02C 卫星 HR 相机内视场拼接方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40 (4): 436-443.
PAN JUN, HU Fen, WANG Mi, et al. Method for Splicing Internal Field of View of ZY-1 02C Satellite HR Camera Based on Virtual Linear Array [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40 (4): 436-443.

[28] 潘俊,王密,李德仁. 基于顾及重叠的面 Voronoi 图的接缝线网络生成方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(5):518-521.
PAN Jun, WANG Mi, LI Deren. Seam Line Network Generation Method Based on Overlapping Surface Voronoi Diagrams [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34 (5): 518-521.

[29] 丁一帆,尤红建,陈双军,等. 一种面向红外摆扫成像的几何校正方法[J]. 遥感信息,2018,33(5): 76-81.
DING Yifan, YOU Hongjian, CHEN Shuangjun, et al. A Geometric Correction Method for Infrared Swing-Scan Imaging [J]. *Remote Sensing Information*, 2018, 33 (5): 76-81.

[30] YANG Lan, LI Xiaoyan, JIANG Linyi, et al. Resolution-Normalizing Image Stitching for Long-Linear-Array and Wide-Swath Whiskbroom Payloads [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.