全景畸变正切改正的高光谱影像视场拼接方法

赵慧洁[1],陈 轲[1],贾国瑞[1*],邱显斐[1],唐绍凡[2],李 欢[2]

(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. 北京空间机电研究所,北京 100076)

摘 要:静止轨道全谱段高光谱成像仪需采用通道分离、视场和机械拼接的方式,并通过扫描镜摆扫获得宽视场、高空间分辨率的高光谱影像,若直接拼接,子视场间不一致的几何变形将使地物光谱信息失真。假设子视场间同名像点坐标的差异是由各子视场内部参数变化引起的,提出以全景畸变正切改正公式为数学模型的区域网平差方法,实现像方坐标系内的视场拼接。并在可见光近红外通道 4 个子视场仿真影像的基础上完成了视场拼接实验,达到了 0.72 pixel 的拼接精度。与基于共线条件方程区域网平差的视场拼接方法相比,该方法精度与其相当,且算法更简单,不需要控制点和 DEM 辅助,适用于初级影像生产。

关键词:视场拼接; 正切改正; 共线条件方程; 区域网平差

中图分类号:TP751 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0303005

FOV stitching method for hyperspectral image with tangent correction of panoramic distortion

Zhao Huijie[1], Chen Ke[1], Jia Guorui[1*], Qiu Xianfei[1], Tang Shaofan[2], Li Huan[2]

(1. Key Laboratory of Education Ministry of Precision Opto-mechatromics Technology, School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to obtain a wide field of view(FOV) and high spatial resolution hyperspectral image while the scanning mirror swinging, the channel separation, FOV and mechanical splicing are required for the geostationary full spectrum hyperspectral imager. If the sub-FOV images are directly spliced, the spectral information of the feature will be distorted because of the different geometric deformation between the sub-FOVs. It was assumed that the difference of the corresponding image points' coordinates between the sub-FOVs was caused by the changes of each sub-FOVs' internal parameters in the paper. A block adjustment method based on the panoramic distortion tangent correction formula was proposed to achieve FOV stitching in the image side coordinate system. The FOV stitching experiment

收稿日期:2018-10-10; **修订日期**:2018-11-20

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0500505)

作者简介:赵慧洁(1966-),女,教授,博士,主要从事新型光学遥感探测、星载高光谱建模与仿真、视觉检测等方面的研究。Email:hjzhao@buaa.edu.cn

通讯作者:贾国瑞(1984-),男,副教授,博士,主要从事高光谱成像建模、仿真和数据预处理等方面的研究。Email:jiaguorui@buaa.edu.cn

was completed on the basis of four sub-FOVs simulation images in the visible to near-infrared channel, and the stitching accuracy of 0.72 pixels was achieved. The splicing accuracy of the proposed method is close to the block adjustment method′s based on the collinear conditional equation. The algorithm is simpler and suitable for primary image production without the assistance of control points and DEM.

Key words: FOV stitching; tangent correction; collinear conditional equation; block adjustment

0 引 言

地球静止轨道卫星具有对地球观测位置相对固定、时间分辨率高、观测范围广等特点,非常适合对地长期连续监视以及快速访问,与低轨遥感卫星形成有益的补充[1],例如,我国发射的“高分四号”(GF-4)卫星是当今世界上地球静止轨道空间分辨率最高的对地观测卫星[2]。欧美强国都发展了自己的静止轨道空间计划,如美国的 GOES 系列、欧空局的 METEOSAT、日本的 GMS 等[3]。尽管上述例子均为多光谱或全色成像传感器,静止轨道全谱段高光谱成像技术却正在成为当前国内外遥感领域的研究热点。

高光谱成像仪常用的工作模式为摆扫型和推扫型,静止轨道全谱段高光谱成像仪(以下简称为“高光谱成像仪)由于其对地位置相对固定,单片 CCD 长度有限,不能满足视场宽度的要求[4],需采用通道分离的方式,利用视场和机械拼接,通过扫描镜摆扫获取宽视场、高空间分辨率的高光谱影像。如,高分 5 号短中波、长波通道均采用三模块拼接形式实现短波 3 072 元,中长波 1 536 元的拼接[5]。因视场分离使同一时刻不同探测器的成像区域不一致,在卫星姿态变化、地形起伏、地球曲率以及全景畸变等因素影响下,各子视场影像的几何变形各不相同。在同一参考坐标系下,子视场间重叠区域内的同名点坐标不同,若对各波段子视场图像直接进行拼接,子视场间的几何失真将导致高光谱图像立方体的光谱失真。因此,研究高光谱成像仪视场拼接技术对高光谱图像后期应用有着重要意义。

由于对卫星设计参数的保密和卫星应用技术的封锁,国外关于多 CCD 影像拼接的技术文档和文献较少[6],国内学者主要对推扫式相机的内视场拼接展开了研究,而对于采用视场和谱段分离,通过扫描镜摆扫成像的高光谱成像仪视场拼接问题,少有研究。胡芬将现有的视场拼接方法总结为基于像方拼接和基于物方拼接两大类。像方拼接算法的特点在于单纯从原始影像的片间偏移特性出发寻求解决方案[7],如参考文献[7-8],对于平移、旋转以及仿射变换的图像对能够正确拼接,但未考虑全景畸变,因此不适用于高光谱成像仪视场拼接。物方的视场拼接方法是基于物方空间的连续性,建立虚拟扫描景与原始影像的像点坐标换算关系,进而实现对成像数据的无缝内视场拼接处理[7]。如,潘俊等针对 ZY-102C 星 HR 相机成像特点,提出了一种基于虚拟线阵的非共线 TDI CCD 相机成像数据内视场拼接方法[9];张过等利用基于虚拟 CCD 线阵的内视场的拼接方案,在焦平面上构造出无畸变的 CCD 阵列,并提出采用严密几何模型空间前方交会的方法对拼接精度进行评价[6];武奕楠等根据空间相机 TDI CCD 交错拼接的成像特点,提出了一种基于同名点轨迹追踪的成像拼接配准模型[10]。以上基于物方的拼接方法,采用严格几何成像模型建立物点和像点坐标间的映射关系,在理论上较为严密,由于以高精度的内外定标参数作为解算基础,且需要地形数据的辅助,算法复杂,拼接精度高度依赖于内外定标参数的精度和地形数据的质量。另外,以上研究主要是针对无扫描镜的推扫型成像仪,并不能直接应用于高光谱成像仪视场拼接。

文中从高光谱成像仪内部结构和成像过程出发,首先提出了基于全景畸变正切改正的区域网平差视场拼接方法。假设子视场间的像点误差是由各子视场内方位元素变化引起的,以全景畸变正切改正公式作为数学模型,通过最小二乘平差,求解各子视场内方位元素改正数,利用间接法将各子视场影像校正到参考焦平面,以像坐标为基准完成视场拼接;其次简要介绍了基于行中心投影共线条件方程区域网平差的视场拼接方法;最后,在仿真影像的基础上,对两种拼接方法开展了实验,均取得了亚像素级的拼接精度,目视检查无拼接痕迹。

1 静止轨道全谱段高光谱成像仪结构及成像过程

以可见光近红外通道为例，高光谱成像仪摄影时，地物光线经反射扫描镜反射后进入同轴三反系统，被压缩为平行光线，通过离轴三反系统进一步压缩，经像面狭缝分离为 4 个交错排列的子视场，如图1所示。设从上至下分别为 1、2、3、4 号子视场，地面光线入射到相互垂直的反射镜面上，将 4 个子视场分离为两组，每组经 Offner 系统实现色散分光，分别成像在 1、2、3、4 号面阵 CCD 上，空间维成像在 CCD 行方向上，光谱维成像在 CCD 列方向上。其中 1、3 号 CCD 处于同一焦平面内，2、4 号 CCD 处于另一焦平面内。若设每片 CCD 面阵像元数为 $m\times n$。其实质为 n 条长度为 m 元的线阵 CCD 同时获取同一地面范围的 n 个波段的辐射信息。

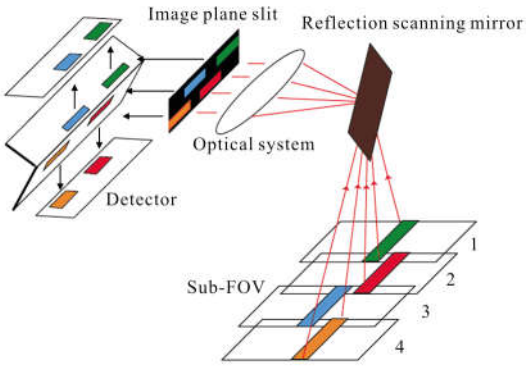

图 1 可见光近红外通道成像过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of imaging process in the visible and near-infrared channel

图 2 为全景式摄像机成像示意图。随着反射扫描镜的旋转，地物光线逐行进入像面狭缝，地面场景逐行成像在圆柱面上。在此过程中相机的望远系统与成像系统间的位置关系保持不变，即各行影像内的方位元素保持不变，其成像过程与全景式摄影机相同，各行影像与对应地面场景满足行中心投影。

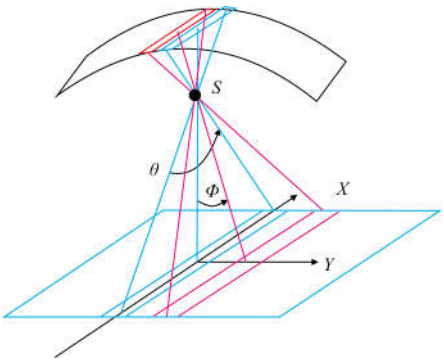

图 2 全景式摄像机成像示意图

Fig.2 Schematic diagram of panoramic camera imaging

2 基于全景畸变正切改正的区域网平差

由于高光谱成像仪的成像方式与全景式摄影机相同，其成像面为圆柱面，逐行扫描后存储为平面影像，其像点坐标相对于框幅式影像产生了系统性的变化。同摄站获取的同一地区的全景像片相对于框幅式像片的影像变形称为全景畸变。如图 3 所示。

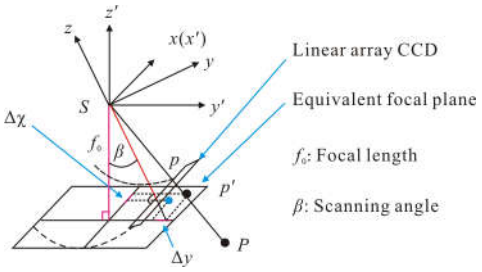

图 3 全景畸变示意图

Fig.3 Diagram of panoramic distortion

设 $S-x'y'z'$ 为等效像空间坐标系，$S-xyz$ 为摄影瞬间的像空间坐标系，摄影时，反射扫描镜摆扫角度为 β，此时有地面点 P 成像于线阵 CCD 的 p 点上，其在 $S-xyz$ 坐标系内的坐标为$(x, 0, -f_0)$；地面点 P 在等效框幅式像片上的成像位置为 p'，其像空间坐标为$(x', y', -f_0)$。摆扫角度 β 可由高光谱成像仪影像的像点横坐标计算得出，即 $\beta=(y+y_0)/f$ rad。根据空间几何，像点 p 在等效焦平面上的坐标可由正切改正公式表达，如公式(1)所示。

$$\begin{cases} x'=\dfrac{x+x_0}{\cos\beta} \\ y'=f_0\cdot\tan\beta \end{cases} \tag{1}$$

进一步，将焦距各不相同的子视场影像校正至焦距为 f_g 的统一等效焦平面上，其公式为：

$$\begin{cases} x_g=\dfrac{f_g}{f_0}\dfrac{x+x_0}{\cos\beta} \\ y_g=f_g\cdot\tan\beta \end{cases} \tag{2}$$

完成全景畸变改正后，各子视场影像均校正至等同一等效焦平面坐标系内，但由于相邻子视场探

测器具有不同的视场分离角，在摄站位置和姿态变化共同影响下，相邻子视场间同名像点坐标并不相等。若将同名像点坐标差认为是各子视场内方位元素残差引起的，由公式(2)可知，等效焦平面内像点坐标为子视场内方位元素的非线性函数，将公式(2)按照泰勒级数展开至一次项，如公式(3)所示。

$$\begin{cases} x_g=\dfrac{f_g}{f_0}\dfrac{x+x_0}{\cos\beta}+\dfrac{\partial x_g}{\partial x_0}\mathrm{d}x_0+\dfrac{\partial x_g}{\partial y_0}\mathrm{d}y_0+\dfrac{\partial x_g}{\partial f_0}\mathrm{d}f_0 \\ y_g=f_g\cdot\tan\beta+\dfrac{\partial y_g}{\partial y_0}\mathrm{d}y_0+\dfrac{\partial y_g}{\partial f_0}\mathrm{d}f_0 \end{cases} \tag{3}$$

写成矩阵形式为：$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x_{g_0} \\ y_{g_0} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathrm{d}x_0 \\ \mathrm{d}y_0 \\ \mathrm{d}f_0 \end{bmatrix}$。

其中

$$a_1=\frac{\partial x_g}{\partial x_0}=\frac{f_g}{f_0}\sec\beta$$

$$a_2=\frac{\partial x_g}{\partial y_0}=\frac{f_g}{(f_0)^2}\tan\beta\cdot\sec\beta(x+x_0)$$

$$a_3=\frac{\partial x_g}{\partial f_0}=(1-\tan\beta\cdot\beta)\frac{f_g}{(f_0)^2}\sec\beta(x+x_0)$$

$$b_1=\frac{\partial y_g}{\partial x_0}=0$$

$$b_2=\frac{\partial y_g}{\partial y_0}=\frac{f_g}{f_0}\sec^{-2}\beta$$

$$b_3=\frac{\partial y_g}{\partial f_0}=-\frac{f_g}{(f_0)^2}\sec^{-2}\beta$$

平差模型：全景畸变正切改正公式，公式(2)。

平差条件：相邻视场同名像点在等效焦平面内坐标相等。

设子视场 1、2 上同名像点 i 的原始坐标分别为 (x_i^1,y_i^1)，(x_i^2,y_i^2)，在等效焦平面内像点坐标分别为 $(x_{g_i}^1,y_{g_i}^1)$，$(x_{g_i}^2,y_{g_i}^2)$，内方位元素改正数向量为 $X^{12}=\begin{bmatrix}\mathrm{d}x_0^1 & \mathrm{d}y_0^1 & \mathrm{d}f_0^1 & \mathrm{d}x_0^2 & \mathrm{d}y_0^2 & \mathrm{d}f_0^2\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，构建子视场 1、2 间同名点像坐标误差方程，如公式(4)所示。

$$V_i^{12}=G_i^{12}X^{12}+l_i^{12} \tag{4}$$

其中

$$l_i^{12}=\begin{bmatrix} x_{gi}^1-x_{gi}^2 \\ y_{gi}^1-y_{gi}^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$G_i^{12}=\begin{bmatrix} a_{i1}^1 & a_{i2}^1 & a_{i3}^1 & -a_{i1}^2 & -a_{i2}^2 & -a_{i3}^2 \\ b_{i1}^1 & b_{i2}^1 & b_{i3}^1 & -b_{i1}^2 & -b_{i2}^2 & -b_{i3}^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

按照上述方法，将所有子视场内方位元素作为待定参数纳入到整体平差中，运用最小二乘平差原理，考虑各同名点坐标独立等精度观测，即权矩阵 P 为单位阵，当满足 $V^{\mathrm{T}}V$ 最小时，可得各子视场内方位元素改正数 $X=-(G^{\mathrm{T}}G)^{-1}G^{\mathrm{T}}l$。

完成各子视场内方位元素更新后，通过间接法，按照公式(2)完成各子视场几何校正，基于等效焦平面内像点坐标完成视场拼接。

每个子视场需要确定 3 个未知参数，当整景影像包含 4 个子视场时，共需求解 12 个未知参数，因此，整景影像只需选取 6 个以上同名点，即可完成各子视场内方位元素的平差解算。地面定标结果可做为各子视场内方位元素初始值。

3 基于共线条件方程的区域网平差

日月引力和地球扁率摄动会在 GEO 目标轨道面上产生力矩，使其轨道面沿赤道进动[11]，因此，高光谱成像仪在对地观测过程中，其空间位置是不断变化的，每一行影像具有不同的摄站坐标。同时由于摆扫成像，不同影像行具有不同的扫描角度 β，在卫星姿态变化的影响下，每一行影像具有不同的外方位角元素。如图 4 所示。

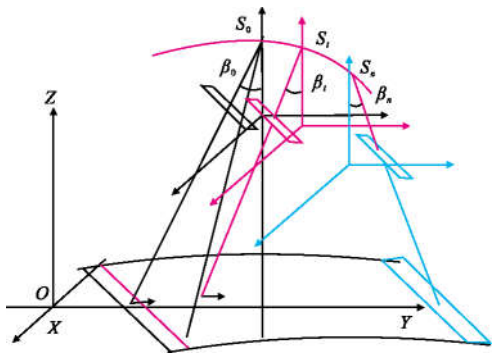

图 4 高光谱成像仪行扫描示意图

Fig.4 Schematic diagram of the hyperspectral imager line scanning

若设高光谱成像仪扫描方向与 y 方向相同，根据行中心投影共线条件方程，可得子视场地面点坐标(X,Y,Z)与像点坐标之$(x,0,-f)$间物方公式：

$$X=X_S+(a_1x-a_3f)\cdot(Z-Z_S)/(c_1x-c_3f)$$
$$Y=Y_S+(b_1x-b_3f)\cdot(Z-Z_S)/(c_1x-c_3f) \quad (7)$$

式中：(X_S, Y_S, Z_S) 为摄站坐标；$a_1, a_3, b_1, b_3, c_1, c_3$ 由外方位角元素决定。

由于静止轨道卫星相对地球速度小，扫描过程中姿态平稳。因此，可以将各子视场每一行影像的外方位元素近似表达为行号的线性函数。若设扫描角(β)、视场分离角(φ)与俯仰角(ω)方向相同，则俯仰角 $\omega=\omega_i+\beta_i+\varphi$。因此，子视场上第 i 行影像的外方位元素可表示为如下形式。

$$\begin{cases}\alpha_i=\alpha_0+i\cdot\bar{\alpha}\\ \omega_i=\omega_0+\beta_0+i\cdot(\bar{\omega}+\bar{\beta})+\phi\\ \kappa_i=\kappa_0+i\cdot\bar{\kappa}\\ X_{Si}=X_{S0}+i\cdot\overline{X_S}\\ Y_{Si}=Y_{S0}+i\cdot\overline{Y_S}\\ Z_{Si}=Z_{S0}+i\cdot\overline{Z_S}\end{cases} \quad (8)$$

式中：$(X_{S0}, Y_{S0}, Z_{S0}, \alpha_0, \omega_0, \kappa_0)$为高光谱成像仪各子视场影像起始行外方位元素；$(\overline{X_S}, \overline{Y_S}, \overline{Z_S}, \bar{\alpha}, \bar{\omega}, \bar{\kappa})$为外方位元素对于行号的一阶变化率。视场分离角($\varphi$)、起始行扫描角度($\beta_0$)和高光谱成像仪扫描角速度($\bar{\beta}$)，均由高光谱成像仪设计参数确定。

平差模型：行中心投影共线条件方程物方公式。

平差条件：

(1) 对于一度重叠区内的控制点，其空间直角坐标(X_g, Y_g)应与按照公式(7)计算得到的坐标值($X_{计}$, $Y_{计}$)相等；

(2) 对于两度重叠区内的控制点，由相邻子视场同名像点坐标按照公式(7)计算得到的坐标值($X_{l计}$, $Y_{l计}$)、($X_{r计}$, $Y_{r计}$)应相等。

将整景影像作为平差区域，按照最小二乘平差原理求解出各待定参数后，根据公式(7)将各子视场影像纠正至空间直角坐标系内，然后投影变换至地面坐标系，最后基于地面坐标完成视场拼接。

4 实验与结果分析

文中基于实验室前期研发的 GF-5 高光谱成像全链路仿真平台[12]，卫星轨道倾角设置为 0.005°，并引入服从正态分布的指向角和平台稳定度随机误差，模拟了成像过程中卫星位置和姿态变化。根据高光谱成像仪内部结构以及摆扫过程，以北京地区 Landsat 正射影像为基础，仿真出一景可见光波段影像。受制于实验设备性能，仿真影像地面范围约为 100 km×100 km，包含 4 个子视场。子视场影像尺寸均为 4 000×1 200 像元，地面分辨率约 25 m。在影像仿真过程中，为使子视场间具有一致的重叠像元数，用 4 片 CCD 长度之和减去影像宽度，再除以重叠次数的两倍，得到相邻子视场间重叠像元数，约为 133 个。子视场分布如图 5 所示。

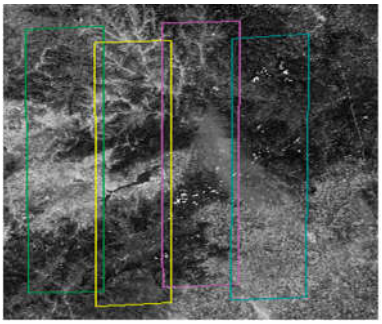

图 5 子视场分布示意图

Fig.5 Schematic diagram of sub-FOVs distribution

方法一(文中所提方法)解算步骤：

(1) 计算相邻子视场重叠区域，通过基于灰度的图像匹配，获取重叠区域内同名像点坐标，匹配结果如图 6 所示。

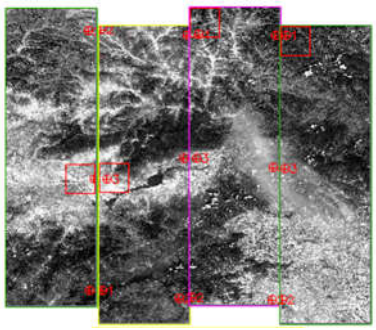

图 6 子视场间同名像点匹配结果

Fig.6 Matching result of the corresponding image points between sub-FOVs

(2) 以内部参数定标结果作为各子视场内方位元素初始值，按照公式(5)、(6)求取法方程系数矩阵 G 和自由项 l；

(3) 由 $X_l=-(G^{\mathrm{T}}G)^{-1}G^{\mathrm{T}}l$ 计算各待定参数改正数,并更新子视场各内部参数;

(4) 由 $\mathrm{err}=\sqrt{V^{\mathrm{T}}V/n}$ 计算平差精度,当 err 满足精度要求时,更新各子视场内部参数,代入公式(2),通过间接法,将各子视场几何校正至等效焦平面;当 err 不满足精度要求时,以更新后的内部参数为初始值,重复步骤(2)~(4),直至 err 满足要求;

(5) 基于像点在等效焦平面中的坐标,完成视场拼接,结果如图 7 所示。

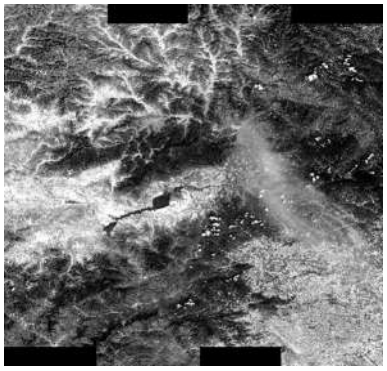

图 7 方法一视场拼接结果

Fig.7 FOV stitching results of method 1

方法二 (基于共线条件方程的区域网平差视场拼接方法) 以 Landsat 正射影像和 Aster GDEM 作为控制资料(UTM 投影,50 带,高程基准为 WGS 84 椭球面,DEM 格网间距 30 m), 控制点平面坐标从 Landsat 正射影像上量测获取,控制点高程值利用其平面坐标和 DEM,通过双线性内插得到。控制点分布如图 8 所示。

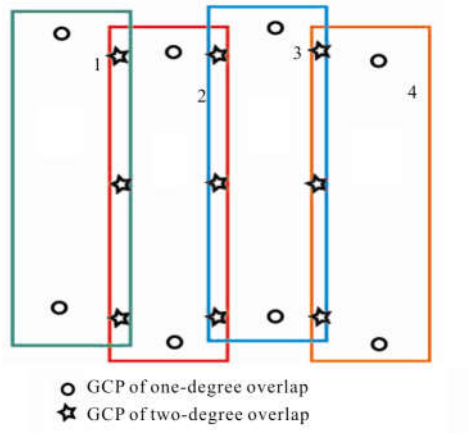

图 8 控制点分布略图

Fig.8 GCP distribution map

为消除地球曲率的影响, 实验中将控制点坐标从地面坐标系(UTM)下通过投影变换,转化至空间直角坐标系, 使像点坐标与物点坐标严格满足共线条件方程。

平差解算完成后, 将新的外方位元素代入公式(7),以控制点坐标均值作为每个地面点坐标初始值,在 DEM 辅助下,通过迭代,计算得到各地面点空间直角坐标。然后将空间直角坐标投影转换为地面坐标,得到各子视场不规则格网正射影像,内插生成地面坐标系下规则格网正射影像。最后 4 个子视场按照地面坐标完成拼接,结果如图 9 所示。

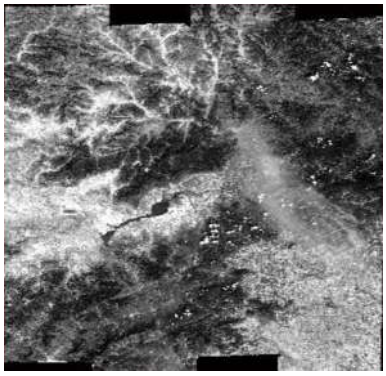

图 9 方法二视场拼接结果

Fig.9 FOV stitching results of method 2

拼接精度采用重叠区内同名像点坐标中误差 ($RMS=\sqrt{(\sum\Delta X^2+\sum\Delta Y^2)/n}$) 来衡量。在相邻子视场重叠区域内,随机选取部分特征地物作为同名像点, 两种方法同名像点几何位置误差如表 1、2 所示。方法一在像方坐标系中的同名像点坐标误差为±10.81 μm,除以影像分辨率(15 μm),约为 0.72个像元; 方法二在物方坐标系中的同名点坐标误差为±17.48 m,除以地面分辨率(25 m),约为 0.70 个像元,两种方法拼接结果目视检查均无拼接缝。

在方法二中,地面点空间直角坐标需要在 DEM 数据的支持下,按照公式(7)通过迭代求解,坐标系间的投影变换需要逐点迭代计算, 因此该方法计算量大,且解算精度对控制点和 DEM 质量要求高;尽管方法一将子视场间的几何变形简单地认为是由各子视场内部参数变化引起的, 未考虑成像时卫星位置和姿态对像点变化的影响, 但拼接精度与方法二相当。

表 1 方法一中同名像点几何位置误差

Tab.1 Geometric position errors of the corresponding image points in method 1

	X in left sub-FOV	*Y* in left sub-FOV	*X* in right sub-FOV	*Y* in right sub-FOV	Δ*X*/μm	Δ*Y*/μm
1	-6 844.53	11 363.58	-6 851.38	11 353.89	6.85	9.69
2	-6 799.53	773.58	-6 806.38	778.89	6.85	-5.31
3	-7 249.53	-966.42	-7 241.38	-976.11	-8.15	9.69
4	-6 319.53	-2616.42	-6 311.38	-2 626.11	-8.15	9.69
5	8 283.62	26 353.89	8 290.87	26 346.56	-7.25	7.33
6	9 438.62	403.89	9 430.87	396.56	7.75	7.33
7	8 628.62	-1 546.11	8 620.87	-1 538.44	7.75	-7.67
8	8 793.62	-24 826.11	8 800.87	-24 818.44	-7.25	-7.67
9	25 255.87	26 406.56	25 250.03	26 413.38	5.85	-6.82
10	24 670.87	981.56	24 680.03	988.38	-9.15	-6.82
11	25 825.87	-2 723.44	25 820.03	-2 731.62	5.85	8.18
12	25 300.87	-19 568.44	25 295.03	-19 576.62	5.85	8.18
			RMS=±10.81 μm			

表 2 方法二中同名像点几何位置误差

Tab.2 Geometric position errors of the corresponding image points in method 2

	X in left sub-FOV	*Y* in left sub-FOV	*X* in right sub-FOV	*Y* in right sub-FOV	Δ*X*/μm	Δ*Y*/μm
1	379 320.10	4 505 827.44	379 325.01	4 505 821.22	-4.91	6.22
2	378 945.23	4 457 802.36	378 950.26	4 457 796.32	-5.03	6.04
3	377 495.73	4 440 902.25	377 500.47	4 440 895.81	-4.74	6.44
4	379 345.45	4 418 252.54	379 350.63	4 418 271.17	-5.18	-18.63
5	378 845.33	4 414 152.72	378 875.06	4 414 146.43	-29.73	6.29
6	406 144.36	4 475 803.16	406 153.04	4 475 825.71	-8.68	-22.55
7	405 652.54	4 446 424.42	405 652.80	4 446 436.43	-0.26	-12.01
8	405 348.29	4 416 472.47	405 354.79	4 416 463.61	-6.50	8.86
9	435 132.14	4 550 235.73	435 152.25	4 550 248.91	-20.11	-13.18
10	434 583.83	4 544 160.52	434 577.68	4 544 149.89	6.15	10.63
11	435 609.04	4 515 282.49	435 625.71	4 515 298.22	-16.67	-15.73
12	433 683.79	4 451 429.76	433 675.32	4 451 426.93	8.47	2.83
			RMS=±17.48 m			

综上所述,文中提出的方法简单有效,且不需要 DEM 等辅助资料,计算速度快,少量的同名像点可通过图像匹配自动获取，满足影像供应方开展初级影像生产的需求。

5 结 论

摆扫成像模式下的静止轨道全谱段高光谱成像仪,由于采用视场分离实现宽视场成像,在卫星姿态变化以及地球曲率影响下，各子视场影像间发生不规则的几何变形。若直接进行拼接,将使重叠区内地物光谱产生失真，破坏了应用高光谱图像进行地物分类、识别的基础。针对静止轨道全谱段高光谱成像仪内部结构和成像过程，文中提出基于全景畸变正切改正的区域网平差视场拼接方法。以仿真影像为

基础,完成了像方拼接实验,与基于共线条件方程的区域网平差视场拼接方法相比较,文中算法简单,不需要控制点和 DEM 的辅助，仅需少量子视场间同名像点坐标，即可完成视场拼接，拼接中误差约为 0.72 个像素。实验结果验证了文中算法的有效性和可行性,文中方法可应用于初级影像生产。

参考文献:

[1] Wang Mi, Cheng Yufeng, Chang Xueli, et al. High accuracy on-orbit geometric calibration of geostationary satellite GF4 [J]. ***Acta Geodaetica et Cartographica Sinica***, 2017, 46(1): 53-61. (in Chinese)
王密, 程宇峰, 常学立, 等. 高分四号静止轨道卫星高精度在轨几何定标[J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 53-61.

[2] Meng Lingjie, Guo Ding, Tang Menghui, et al. Development status and prospect of high resolution imaging satellite in geostationary orbit [J]. ***Spacecraft Recovery & Remote Sensing***, 2016, 37(4): 1-6. (in Chinese)
孟令杰, 郭丁, 唐梦辉, 等. 地球静止轨道高分辨率成像卫星的发展现状与展望[J]. 航天返回与遥感 , 2016, 37(4): 1-6.

[3] Bao He, Li Zhilai, Chai Fangmao, et al. Filter wheel mechanism for optical remote sensor in geostationary orbit [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23 (12): 3357-3363. (in Chinese)
鲍赫, 李志来, 柴方茂, 等. 静止轨道光学遥感器的滤光轮机构[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(12): 3357-3363.

[4] Guo Jiang, Gong Dapeng, Zhu Lei, et al. Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2013, 21(5): 1251-1257. (in Chinese)
郭疆, 龚大鹏, 朱磊, 等. 测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中重叠像元数计算 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1251-1257.

[5] Fan Bin, Chen Xu, Li Bicen, et al. Technical innovation of optical remote sensing payloads onboard GF-5 satellite [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(1): 0102002. (in Chinese)
范斌, 陈旭, 李碧岑, 等. “高分五号”卫星光学遥感载荷的技术创新[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0102002.

[6] Zhang Guo, Liu Bin, Jiang Wanshou. Inner FOV stitching algorithm of spaceborne opticalsensor based on the virtual CCD line [J]. ***Journal of Image and Graphics***, 2012, 17(6): 696-701. (in Chinese)
张过, 刘斌, 江万寿. 虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6): 696-701.

[7] Hu Fen. Research on inner FOV stitehing theories and algorithms for sub-images of three non-collinear TDI CCD chips [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese)
胡芬. 三片非共线 TDICCD 成像数据内视场拼接理论与算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.

[8] Chen Yue, Zhao Yan, Wang Shigang. Fast image stitching method based on SIFT with adaptive local image feature[J]. ***Chinese Optics***, 2016, 9(4): 415-422. (in Chinese)
陈月, 赵岩, 王世刚. 图像局部特征自适应的快速 SIFT 图像拼接方法[J]. 中国光学, 2016, 9(4): 415-422.

[9] Pan Jun, Hu Fen, Wang Mi, et al. Inner FOV stitching of ZY-102C HR camera based on virtual CCD line[J]. ***Geomatics and Information Science of Wuhan University***, 2015, 40(4): 436-443. (in Chinese)
潘俊, 胡芬, 王密, 等. 基于虚拟线阵的 ZY_102C 卫星 HR 相机内视场拼接方法[J]. 武汉大学学报, 2015, 40(4): 436-443.

[10] Wu Yinan, Li Guoning, Zhang Ke, et al. Registration model based on homologous points tracking of spacecamera assembly imaging [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(3): 0326002. (in Chinese)
武奕楠, 李国宁, 张柯, 等. 基于同名点追踪的空间相机成像拼接配准模型 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0326002.

[11] Niu Zhaodong, Wang Lin, Duan Yu, et al. Review of foreign space-based optical surveillance strategies for GEO objects[J]. ***Chinese Optics***, 2017, 10(3): 310-320. (in Chinese)
牛照东, 汪琳, 段宇, 等. 国外地球同步轨道目标天基光学监视策略[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 310-320.

[12] Zhao Huijie, Jia Guorui, Tao Dongxing, et al. Key techniques for image simulation of spaceborne pushbroom dispersive hyperspectral sensors [C]// Proceedings of 18 th China Symposium on Remote Sensing. Beijing: Science Press, 2012: 145-149. (in Chinese)
赵慧洁, 贾国瑞, 陶东兴, 等. 色散推扫型星载高光谱成像数字仿真关键技术研究 [C]//第十八届中国遥感大会论文集. 北京: 科学出版社, 2012: 145-149.