

LASIS 影像波段配准

张 过^{1,2,3}, 李 凡¹

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

2. 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉 430079;

3. 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心,北京 101300)

摘要:针对大孔径静态干涉成像光谱仪(Large Aperture Static Interference Imaging Spectrometer, LASIS)各波段共视场扫描成像的特点,提出了基于在轨几何内检校的虚拟重成像方法进行波段高精度配准.此方法充分考虑姿轨的变化和镜头畸变等导致高光谱波段影像失配的几何因素,在内方位元素检校的基础上,对高光谱影像进行虚拟重成像,实现了对误差源的建模以及波段间相对误差的消除.利用遥感十四号 LASIS 在不同区域数据进行内检校和虚拟重成像实验,结果表明,进行 LASIS 数据的处理能够得到优于 0.16 像素的波段配准精度.

关键词:大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS);内检校;虚拟 CCD;虚拟重成像;波段配准

中图分类号:P23 **文献标识码:**A

Registration of LASIS spectral bands

ZHANG Guo^{1,2,3}, LI Fan¹

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

2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China;

3. Satellite Surveying and Mapping Application Center (SASMAC), National Administration Of Surveying,
Mapping and Geoinformation, Beijing 101300, China)

Abstract: Large aperture static interference imaging spectrometer (LASIS) is characterized by that all CCD chips of 180 spectral bands scan through the same field. Based on this, a novel method is proposed to achieve high accuracy band-to-band registration by re-imaging with virtual CCD based calibration. Considering the geometric factors that cause hyperspectral image mismatch, such as changes of attitude and orbit data, lens distortion and so on, this method reimages the hyperspectral images with the virtual CCD calculated from the calibrated interior orientation to remodel the error sources and eliminate the relative errors. Validation experiments using different area data of RS-14 show that with the proposed method, the band-to-band registration accuracy of LASIS is better than 0.16 pixels.

Key words: large aperture static interference imaging spectrometer (LASIS), interior orientation calibration, virtual CCD, re-imaging, band-to-band registration

PACS: 07.07.Df

引言

自世界上第一台成像光谱仪 AIS-1 在美国问世以来,许多国家先后研制了各种机载、星载成像光谱仪,例如美国的 AVIRIS、DAIS、Mighty II,加拿大的

FLI、GASI,德国的 ROSIS 等^[1-3]. 上世纪 80 年代初期,我国亦开展了高光谱成像技术的独立发展计划,目前 HJ-1 卫星,天宫一号,遥感 14 号卫星等在轨运行卫星已达到国际同类遥感器先进水平. 高光谱数据处理和利用一直是相关领域的热点问题,根据分

收稿日期:2015-08-16,修回日期:2016-04-01

Received date: 2015-08-16, revised date: 2016-04-01

基金项目:国家自然科学基金(91538106、41501503、41201361),测绘地理信息公益性行业科研专项(201512022)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (91538106, 41501503, 41201361), Public Science Research Programme of Surveying, Mapping and Geoinformation(201512022)

作者简介(Biography):张 过(1976-),男,博士,教授. 主要从事测绘卫星设计、高精度几何处理和应用效果评价等方面研究工作. E-mail: guozhang@whu.edu.cn

光方式不同,航天推扫型高光谱成像仪可以分为棱镜分光、干涉分光和光栅分光三类。

在大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS)地面数据处理中,为了获取地物的准确光谱,需要对不同时刻采集的地物像点进行重新拼接、辐射校正、切趾处理、相位修正、傅里叶变换等处理。同一地物点的不同时刻成像被记录于LASIS影像的不同波段,因此该问题等效于LASIS波段配准问题。但LASIS光谱反演数据的非同时性,以及成像过程中飞行平台的变化等因素,容易造成像素偏移,复原的光谱无法反映地物点的真实属性。因此LASIS波段影像配准是LASIS成像系统实用化的关键技术。国内外学者针对LASIS做了一系列研究,Yann Ferrec等从成像链路完善地分析了LASIS影像误差来源^[4],虽然没有提出修正波段配准误差的方案,但对LASIS波段配准具有重要的参考意义;CASTRO等提出了基于亚像素精度的相位配准算法进行配准^[5];Geng Zhang提出了通过亚像素配准算法获取多波段影像配准点,建立大规模误差方程求解像点的最或是值作为像元最优位置解^[6];李湘滨等分析姿态时变性变化造成的像素漂移规律,提出用相位相关等算法校正配准影像,从而校正LASIS影像旋转和偏移^[7-9];曾琪明和叶沅鑫等分别提出了基于谱相似和局部自相似的影像配准方法^[10-11]。这些方法通常都忽略了两个问题:一是没有考虑镜头畸变以及CCD排列对像差的贡献,把误差源仅归结为姿态时变性影响;二是没有针对分析得到的误差源建模消除,没有从根本上解决高光谱影像失配,而是采用基于像面间的配准处理方法,该方法的精度易受到配准算法和地物特性的限制。蒋永华和张过等从几何模型上分析配准误差,并采用虚拟重成像方式提升配准精度,在资源三号卫星多光谱处理中达到0.2像素的配准精度^[12]。

本文主要研究干涉分光类光谱仪,这类光谱仪目前的代表是:大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS),其采用双干涉型空间干涉的成像方法,具有光通量大、在轨运行稳定度高、空间分辨率和光谱分辨率高的特点。高光谱与多光谱配准的不同之处在于:①配准的对象不是两张影像,而是整个高光谱影像序列,波段数较多,如果采用两两配准的方法必然产生累积误差,需要考虑高光谱影像序列的整体配准方法;②在建立误差消除模型的过程中,应当考虑消除不同波段畸变的不一致性从而提高影像配准精度。针对这些问题,在内检校的基础上,对各波段影

像重成像,通过成像焦面的一致性排列这一约束条件实现整体配准;同时针对高光谱波段失配的误差建模,消除不同波段畸变的不一致性,保证了相对配准精度的提高。

1 LASIS 成像机理与配准误差源分析

如图1所示,遥感14号高光谱可见光相机的焦面为一个 1024×180 的面阵,空间方向(垂轨向)1024个像元,光谱向(沿轨向)180个像元。

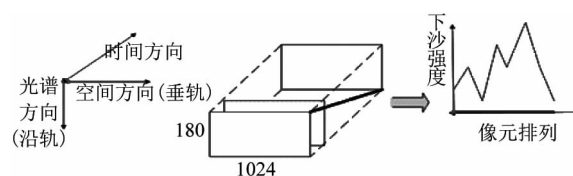


图1 LASIS干涉成像示意图

Fig. 1 The interference imaging figure of LASIS

高光谱相机与光学相机的差异在于在光学镜头与成像焦面之间内置剪切仪和傅里叶透镜,对成像光线进行分束后干涉,最终在焦面形成面阵干涉图像。卫星平台沿光谱向推扫,面阵CCD的每行CCD记录自身成像数据下传成为一个单波段影像,面阵同时推扫成像形成180波段影像。同一地物成像被不同CCD记录在相应的波段影像上。

地面地物点的光谱反演需要获取地物在连续光程差下的干涉强度值,因此需要按成像时间顺序拼接地物像点(位于不同波段),这等效于高光谱的波段配准问题。在配准过程中,垂轨向和沿轨向的像差均会导致采集像点不对应,直接造成光谱反演的错误;沿轨向像差还会导致干涉值的失真,从而影响反演的精度。

由LASIS成像方式可知:由于沿轨向的180个CCD对同一地物先后成像,在这时间内姿轨的变化会对拍摄的位置造成影响,此为时变性影响;而180个CCD处于视场不同位置,其各自的畸变不同,因此其具有的镜头畸变不同,此为系统性影响;因此,镜头畸变的系统性和姿轨的时变性影响糅杂在一起造成了最终配准精度的降低。镜头畸变的系统性影响可以通过预先的几何检校,在处理过程中直接按照检校值进行消除,姿轨的时变性影响则需要根据具体的姿态轨道数据去建立平滑的姿轨拟合模型来减小或者消除。针对上述配准误差的成因,本文提出了基于在轨内检校的虚拟重成像方法进行波段高精度配准,通过内检校减少和消除高阶CCD畸变对配

准的影响,通过虚拟重成像来解决不同波段间由于姿轨不同造成的成像差异。

2 大孔径静态干涉成像光谱仪内检校方法

航天摄影测量中,光学影像内检校^[12]的方法已经较为成熟,主要包括畸变模型法、指向角拟合法等。高光谱与光学卫星影像检校^[12]的关注点不同:①光学内检校目的是求解相机的畸变,从而保证定位精度,而高光谱检校希望达到消除不同行 CCD 的畸变的差异,从而保证畸变的一致性;②光学内检校需要质量高的控制信息保证几何检校精度,而高光谱内检校不需要高精度控制点,在提供经过内检校的单波段基准影像的前提下,可获得高精度的配准结果。

本文内检校的策略是,针对面阵 CCD 的每行 CCD 建立严密成像模型,分别进行内检校。其中高光谱影像内检校前,其基准波段采用高精度控制数据做了内外检校,因为本文重点是高光谱内检校,这一步不具体陈述,详细可参考文献^[12]。具体步骤如下:

①对于非基准波段 i ,建立单线阵推扫严密成像模型;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + mR_{BW}R_{CB}R_{U_n} \begin{bmatrix} \tan(\psi_x)_i \\ \tan(\psi_y)_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式(1)中, $[X \ Y \ Z]^T$ 为控制点坐标, m 为比例系数。 $[X_s \ Y_s \ Z_s]^T$ 为成像时卫星在 WGS84 坐标系下的位置矢量, R_{BW} 为本体坐标系相对 WGS84 坐标系的旋转矩阵, R_{CB} 为相机坐标系相对本体坐标系的旋转矩阵; R_{U_n} 为用于消除外方位元素误差的偏置矩阵, ψ_{xi}, ψ_{yi} 分别为第 i 行 CCD 任一探元对应的沿轨向指向角和垂轨向指向角;指向角计算公式如式(2)所示,其中 (x, y) 为像点影像坐标、 (x_0, y_0, f) 表示内方位元素, $(\Delta x, \Delta y)$ 为相机畸变引起的像点偏移, $(\psi_x)_i, (\psi_y)_i$ 表示对应的探元指向角^[12]。

$$\begin{aligned} \tan(\Psi_x)_i &= \frac{x - x_0 - \Delta x}{-f} \\ \tan(\Psi_y)_i &= \frac{y - y_0 - \Delta y}{-f} \end{aligned} \quad (2)$$

②利用 Harris 算法提取基准波段影像角点,加辅助信息(全球 90 m 格网 DEM,精度 16 m)正算求解物方信息^[12];利用最小二乘配准算法在非基准影像获取同名点作为对应的像方信息,从而得到控制

信息;

③建立指向角标定模型。假定步骤②非基准波段 i 配准获得了 n 个点,根据式(2)基于成像模型计算这些点的指向角;

④如式(3)所示,其中 $a_i, b_i, (i \leq 5)$ 分别代表沿轨向拟合系数;代表像点的垂轨向坐标;

如式(1)所示,基于成像模型利用配准点求解指向角,并把指向角和其对应的垂轨向坐标代入如下的式(2),利用最小二乘计算拟合的系数。

$$\begin{cases} \tan(\psi_x) = a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + a_4s^4 + a_5s^5 \\ \tan(\psi_y) = b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + b_4s^4 + b_5s^5 \end{cases} \quad (3)$$

⑤如式(1)所示,基于成像模型利用配准点求解指向角,并把指向角和其对应的垂轨向坐标 S 代入如下的式(2),利用最小二乘计算拟合的系数。其中利用垂轨向坐标的 5 阶以内多项式拟合指向角是经过大量实验数据检验的经验公式,多次实验证明其效果最好,所以在此采用该公式。

3 大孔径静态干涉成像光谱仪虚拟重成像方法

3.1 虚拟重成像理论

卫星飞行过程中,不同时刻轨道参数的不一致将导致成像不均匀,姿态变化将导致成像范围不一致,两者叠加的效果必然对配准产生影响。虚拟重成像的意义在于,使用平滑后姿轨和无畸变的焦面,将不同波段影像通过几何模型使其重叠部分的影像保持一致性。

LASIS 虚拟重成像的特点是:LASIS 建立一个虚拟无畸变 CCD 面阵,但每行 CCD 独立成像,形成 180 个单波段影像。不同于多线阵虚拟重成像,后者通常虚拟一条 CCD 线阵,并统一使用该线阵的模型;而 LASIS 模型建立虚拟面阵,有 180 行 CCD,每个虚拟重成像的过程是针对各自对应的 CCD 的。

根据式(1), $[X \ Y \ Z]^T$ 为控制点坐标,描述的是物方空间信息,公式右半部分描述了卫星成像状态, $[X_s \ Y_s \ Z_s]^T$ 为成像时卫星在 WGS84 坐标系下的位置矢量, R_{BW} 为本体坐标系相对 WGS84 坐标系的旋转矩阵, R_{CB} 为相机坐标系相对本体坐标系的旋转矩阵; R_{U_n} 为用于消除外方位元素误差的偏置矩阵, ψ_{xi}, ψ_{yi} 分别为第 i 行 CCD 任一探元对应的沿轨向指向角和垂轨向指向角;

物方空间坐标系选用 WGS84 坐标系,像方空间

坐标系选用像平面坐标系. 通过检校, 可以得到一个最大限度接近于真实成像状态的成像模型(下简称真实成像模型). 虚拟重成像的目的是得到一个成像状态平稳(像面无畸变, 姿轨状态平稳)条件下的重采样影像, 这相当于, 人为地设计了 $\psi_{xi}, \psi_{yi}, [X_s, Y_s, Z_s]^T, R_{CB}$ 是均匀变化的. R_{U_n} 用实际的偏置矩阵. 因此, 虚拟重成像的过程, 即是利用设计好的像方平面坐标, 根据式(1)求解其对应的物面信息, 然后利用得到的物面信息, 用已经得到的真实成像模型求解其像方坐标, 将对应的像素重采样, 从而获得虚拟重成像所得像素. 逐波段逐像素迭代以上过程, 即可.

虚拟重成像相当于在焦面无畸变的情况下, 建立内方位元素平滑的严密成像模型(M_1)从而达到波段影像配准的目的. 通过内检校的方法可以获取实际焦面状态下的成像模型(M_2), 通过两个模型的交互可以实现虚拟重成像. 步骤如下:

①对于虚拟焦面上的单行 CCD 分别建立线推扫模型, 初始内方位元素, 将虚拟 CCD 影像上任意一像点 P, 利用像点 P 对应的探元指向角、实际轨道参数和姿态参数, 建立虚拟 CCD 严密成像几何模型 M_1 (该方法可采用平滑后姿轨, 消除姿轨误差的时变性差异);

②根据建立的虚拟的线推扫模型, 将虚拟 CCD 的像点坐标逐一带入模型正算, 获得大地坐标, 从而得到了待获得的地物点的物方位置, 其中的高程控制采用全球 1000 m 格网的 SRTM 高程数据;

③将获得的大地坐标带入 M_2 , 反算获取新的像素坐标值, 从而得到待获得的地物点的像素值;

④将获得的新的像素坐标处的灰度赋予虚拟 CCD 影像对应波段的对应像素, 完成了一次像素重采;

⑤重复以上步骤, 获取全部波段成像范围内的虚拟重成像影像.

3.2 虚拟 CCD 和实际 CCD 像差理论分析

本节对高程误差引起的像面投影差进行了分析, 以验证虚拟 CCD 方案能否应用于提高波段配准的精度. 高光谱可见光相机对地正视, 其相机光轴垂直于地面, 这一设计与 ZY-3 卫星相机等不同.

3.2.1 高程误差引起垂轨向投影差之差

假设 θ_1, θ_2 分别为真实 CCD、虚拟 CCD 对标称地形上同一地物成像时的垂轨夹角; h_1, h_2 分别表示真实 CCD 光线、虚拟 CCD 光线物方投影点高程差, ΔX 为高程差引起的像差. 则根据公式^[12]

$$\Delta X = h_2 \tan(\theta_2) - h_1 \tan(\theta_1) \quad (4)$$

遥感 14 号高光谱相机虚拟 CCD 与真实 CCD 垂轨向安装偏差按照最大 10 像素算(实际比这个值小得多), 考虑到高光谱可见光的分辨率为 10 m, 基准波段为第 90 波段, 则虚拟 CCD 与真实波段 CCD 摄影点的最大差值约为 900 m. 由于遥感 14 号卫星平均高度为 500 km, 可认为 $\theta_1 = \theta_2$, 则

$$\Delta X = (h_2 - h_1) \tan(\theta_2) \quad (5)$$

根据高光谱各波段 CCD 焦面特征, $\tan(\theta_2) < 0.001\ 066, \theta_2 < 0.001^\circ$, 即使在后续几何纠正中仅采用 90 m 高程精度的 DEM 数据, 投影差之差也小于 0.018 m, 即 0.002 像素, 几何精度损失较小.

3.2.2 高程误差引起沿轨向投影差之差

同理, 根据垂轨向投影差公式^[12]

$$\Delta Y = (h_1 - h_2) \tan\theta \quad (6)$$

根据遥感 14 号高光谱相机设计为正视相机, 以 90 波段为基准波段时, 其第 1 波段与第 180 波段因高程误差引起的像差差异最大. 当高程误差小于 90 m 时, 沿轨方向投影差之差小于 0.018 m, 即沿轨向投影差之差不大于 0.002 像素.

4 实验验证与分析

为了验证本文提出的算法, 设计 4 组实验: 直接配准实验是利用原始波段信息, 采用配准算法直接进行配准并统计精度, 目的是为提供原始影像的配准精度, 与后续处理后的配准精度做对比; 虚拟重成像配准实验, 将原始图像辅助数据的姿轨信息平滑, 消除由于卫星平台飞行状态变化而引起的图像几何畸变, 从而提高影像内精度; 内检校实验是在校正不同行 CCD 的畸变, 以避免成像焦面的畸变而导致的图像几何畸变, 从而提高影像内精度; 基于内检校的虚拟重成像实验是将内检校与虚拟重成像两者结合起来, 统计配准结果.

4.1 实验数据情况

数据采用遥感 14 号高光谱可见光相机的两景影像作为实验数据. 采用天津地区的数据做检校, 以下简称 A, 高程在 -15 ~ 9.6 m; 采用河南嵩山地区的数据做验证, 简称 B, 高程在 123.8 ~ 1 490.1 m; 两景影像幅宽为 10 km 左右, 均采用第 90 波段作为基准波段; 采用全球 1 km 格网 DEM 虚拟重成像, 全球 90 米格网 DEM 做内检校. 其中 A 景内检校前其第 90 波段采用天津地区高精度控制数据做了内外检校, 由于本文主要详述波段配准精度, 故实验不罗列这一步.

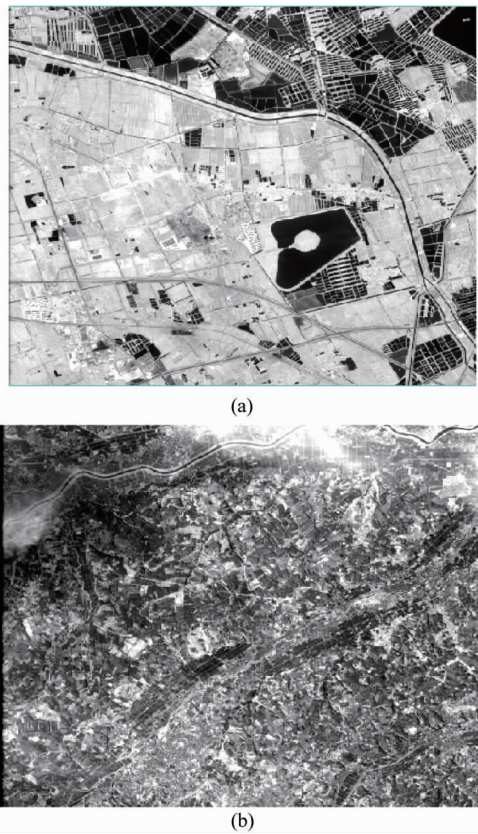


图 2 (a)A 景原始图,(b)B 景原始图
Fig. 2 (a)Original image A ,(b)original image B

表 1 实验数据介绍

Table 1 Introduction of experiment data

数据	幅宽	影像对应区域	区域高程范围
A	10 km	天津	-15 ~9.6 m
B	10 km	河南	123.8 ~1 490.1 m

4.2 直接配准实验

该实验以 A,B 两景原始影像为实验数据,分别以影像的第 90 波段影像为基准影像,在扣除掉由于 CCD 焦面排列错位造成的偏移之后,用其它波段影像和基准波段影像配准. 以下是精度统计:

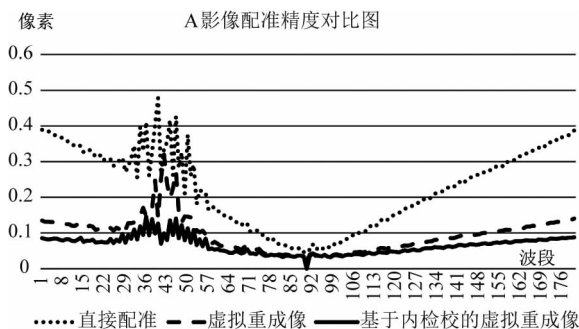


图 3 影像 A 波段间配准残差统计
Fig. 3 Spectral registering RMS of image A

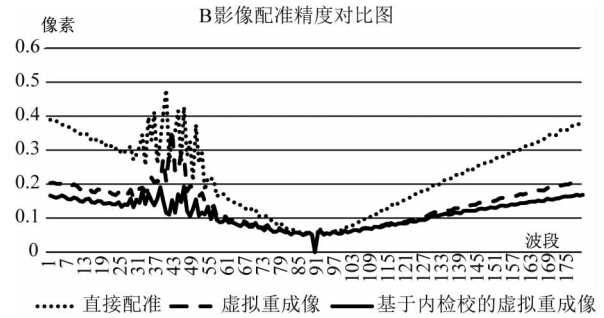


图 4 影像 B 波段间配准残差统计
Fig. 4 Spectral registering RMS of image B

图 3、图 4 分别为 A 景影像与 B 景影像的各个波段与基准波段配准精度统计图,其中, X 坐标代表波段数, Y 坐标代表配准精度. 通过两幅曲线图可以看出,内检校和虚拟重成像能够有效提升波段配准精度,经处理后波段配准精度能够提升至 0.2 像素内. 其中,40 波段附近存在最大干涉主极,会影响配准精度. 由以上数据可知,为了获取精度较高的光谱,必须采取手段提高高光谱影像的波段配准精度.

4.3 虚拟重成像配准实验

虚拟重成像配准实验指的是按照无内检校精度补偿的严密几何模型去重采影像,然后计算各波段配准精度的实验,该方法的目的是为了验证通过严密模型拟合姿轨后,对于姿轨时变性误差的消除情况.

图 3、图 4 中对应虚拟重成像的曲线显示,通过虚拟重成像拟合姿轨,绝大多数像点被控制在 0.1 到 0.2 像素左右的精度范围内. 虚拟重成像后图像配准精度较直接配准有了明显提升,在 40 波段附近的配准误差仍明显高于其它波段,这依然是由于最大干涉极引入了噪声,影响了配准精度.

4.4 内检校实验

该实验用 A 景影像做内检校,将内检校后的结果应用于虚拟重成像,从而得到检校景的自我补偿精度,并且和无检校时的虚拟重成像配准精度对比. 以 A 景的检校结果补偿 B 景,得到 B 景的验证精度,将其和无检校的 B 景虚拟重成像配准精度对比. 分别以 A 景影像的第 1 波段和 B 景影像的第 180 波段为例,说明内检校的效果,其它波段的情形类似,不再赘述.

表 2 中的总体 RMS 统计的对象是经过内检校处理和虚拟重成像后的影像产品,以影像的某个非基准波段为例,和其基准波段影像配准(最小二乘匹配),获得配准残差. 首先,利用全部配准像点内

检校补偿前后的垂轨向坐标差值的平方和除以配准点个数,获取初始 RMS,然后剔除大于 2 倍 RMS 的像点,再利用剩余像点做整体(去除粗差点),重复以上步骤,从而获得垂轨向 RMS;沿轨向 RMS 亦然;利用沿轨向和垂轨向像差的矢量和作为总体 RMS.

表 2 配准点精度统计表

Table 2 Registering point RMS

波段	垂轨 RMS/pixel	沿轨 RMS/pixel	总体 RMS/pixel
A-1	0.11	0.37	0.38
A-1(内检校)	0.07	0.07	0.08
B-180	0.2	0.38	0.43
B-180(补偿 A 的 检校结果)	0.16	0.08	0.17

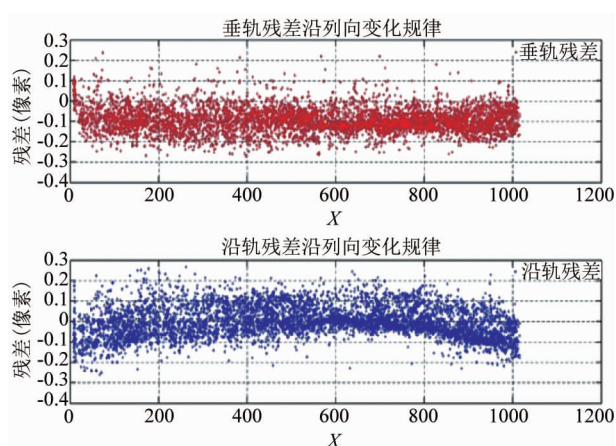


图 5 A 景第 1 波段直接定位残差分布图

Fig. 5 Positioning RMS of 1st spectral band of image A

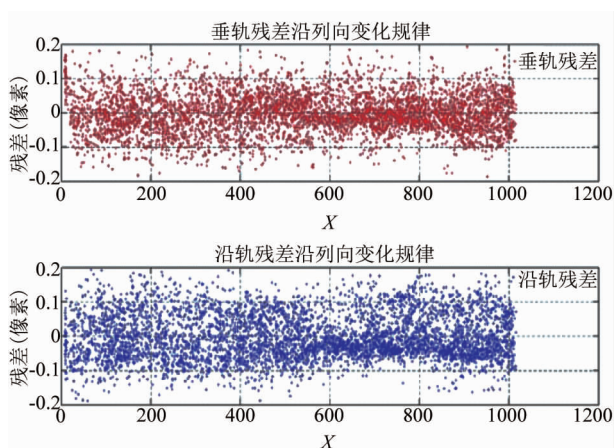


图 6 A 景第 1 波段内检校后定位残差分布图

Fig. 6 Positioning RMS of 1st spectral band of image A with calibration

图 5、图 6 分别为检校前后匹配点的残差分布图. 图 5 的上图为, A 景影像第一波段检校前配准点的垂

轨向残差分布, X 轴代表第一行 CCD(第一波段)的垂轨向坐标, Y 轴代表匹配点的垂轨向残差; 图 5 的下图为, A 景影像第一波段检校前配准点的沿轨向残差分布, X 轴代表第一行 CCD(第一波段)的垂轨向坐标, Y 轴代表匹配点的沿轨向残差; 图 6 的上图为 A 景影像第一波段检校后配准点的垂轨向残差分布, X 轴代表第一行 CCD(第一波段)的垂轨向坐标, Y 轴代表匹配点的垂轨向残差; 图 6 的下图为, A 景影像第一波段检校后配准点的沿轨向残差分布, X 轴代表第一行 CCD(第一波段)的垂轨向坐标, Y 轴代表匹配点的沿轨向残差; 从图 5 可知在内检校前, 第 1 波段垂轨向残差以 0.1 像素左右对称分布, 沿轨向残差显示非线性, 说明第一条 CCD 有整体的垂轨向的偏移, 沿轨向存在非线性畸变; 从图 6 可知内检校后, 点残差分布较为均匀, 且以 0 为中心对称分布, 因此, 内检校起到了从算法上纠正实际 CCD 畸变的效果.

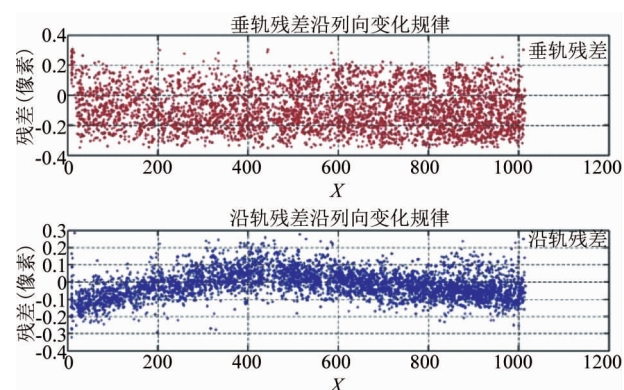


图 7 B 景第 180 波段直接定位残差分布图

Fig. 7 Positioning RMS of 180st spectral band of image B

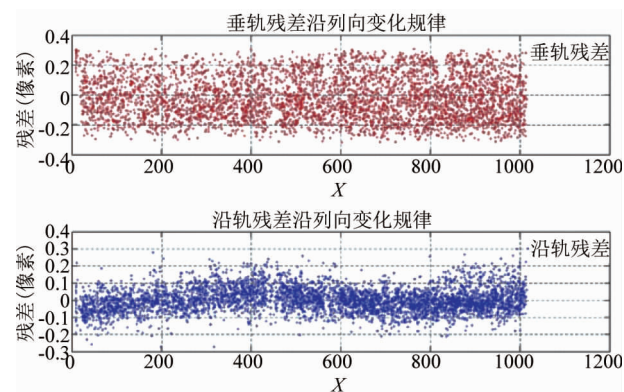


图 8 B 景第 180 波段加畸变模型定位残差分布图

Fig. 8 Positioning RMS of 180st spectral band of image B with calibration

图 7、图 8 分别为检校前后匹配点的残差分布

图. 图 7 的上图为 B 景影像第一波段检校前配准点的垂轨向残差分布, X 轴代表第 180 行 CCD(第 180 波段)的垂轨向坐标, Y 轴代表匹配点的垂轨向残差; 图 7 的下图为 B 景影像第 180 波段检校前配准点的沿轨向残差分布, X 轴代表第 180 行 CCD(第 180 波段)的垂轨向坐标, Y 轴代表匹配点的沿轨向残差; 图 8 的上图为, B 景影像第 180 波段检校后配准点的垂轨向残差分布, X 轴代表第 180 行 CCD(第 180 波段)的垂轨向坐标, Y 轴代表匹配点的垂轨向残差; 图 8 的下图为, B 景影像第 180 波段检校后配准点的沿轨向残差分布, X 轴代表第 180 行 CCD(第 180 波段)的垂轨向坐标, Y 轴代表匹配点的沿轨向残差; 从图 7 可知: 在补偿畸变前, 180 波段在沿轨向有整体偏移的趋势, 沿轨向亦有非线性畸变; 从图 8 可知: 在补偿 180 波段的检校结果后, 点残差分布较为均匀, 且以 0 为中心对称分布, 沿轨向的非线性畸变得到了较好的抑制. 通过以上四张残差图, 可以明显看到 CCD 线阵的畸变, 内检校实验充分说明了, 校正光学畸变对于配准高光谱波段影像具有重要意义.

4.5 基于内检校的虚拟重成像实验

利用 A 景的检校结果分别对 A, B 两景影像进行内检校补偿, 进行基于畸变模型的虚拟重成像试验. 由图 3、图 4 可知加入畸变模型后, 检校景(景 A)绝大部分波段配准精度均能达到 0.1 像素以下. 35 波段到 45 波段由于处于干涉主极附近, 由于干涉最强附近会出现噪声点, 但配准精度基本也处在 0.1 像素左右; 验证景(景 B)在加入畸变模型后配准精度进一步提升, 能够达到沿轨向配准精度 0.1 像素以内, 垂轨向波段间配准精度 0.16 像素以内.

由 LASIS 光谱反演原理可知: LASIS 影像波段配准精度最大不超过 0.16 像元, 复原光谱误差在 3% 以内, 在光谱反演允许的限差内^[16-24]. 因此, 基于内检校的虚拟重成像方法能够用于 LASIS 影像的波段配准.

5 结论

高光谱影像的波段配准精度是制约其光谱反演等后续应用的关键要素. 本文提出了以光学几何检校的方法解决 LASIS 型高光谱卫星的高精度波段配准问题, 得到以下主要结论:

(1) 姿轨时变性误差和光学系统的畸变误差是造成 LASIS 型高光谱影像失配的主要原因.

(2) 提出采用虚拟重成像来校正姿轨时变性误

差, 获得垂轨向优于 0.2 像素, 沿轨向优于 0.1 像素的影像配准精度, 扩展了 LASIS 型数据的应用范围.

(3) 提出基于内检校的虚拟重成像进一步消除光学系统的畸变误差, 在原有精度上进一步提高了影像配准精度, 最终获得检校景优于 0.1 像素, 验证景优于 0.16 像素的波段配准精度.

高频颤振^[25-28]同样是影响高光谱配准精度关键因素, 是进一步工作的重点. 高频颤振应当解决的问题包括: ①分析 LASIS 型的焦面设计、成像特点及配准误差的来源, 研究平台颤振对于配准误差的影像规律. ②根据高光谱相机的面阵设计以及共视场推扫成像的特点, 论述了其波段影像间的颤振误差的相关性, 建立颤振模型. ③在虚拟重成像模型中加入颤振消除模型, 精化姿态, 获得配准精度提升的影像.

References

- [1] WANG Yue-Ming, LANG Jun-Wei, WANG Jian-Yu. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望. *激光与光电子学进展*), 2013, **50**(8): 1-8.
- [2] WU Pei-Zhong. Technical features and data applications of satellite_based hyperspectral imaging instrument[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, (吴培中. 星载高光谱成像光谱仪的特性与应用. *国土资源遥感*), 1999, **3**(41), 32-39.
- [3] SHU Ning. Several processing methods of imaging spectrometer image [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping* (舒宁. 成像光谱仪影像的几种处理方法. *武汉测绘科技大学学报*), 1997, **22**(4), 322-337.
- [4] Ferrec Y, Ayari-Matallah N, Chavel P, et al. Noise sources in imaging static Fourier transform spectrometers. [J]. *Proc. SPIE*, 2012, **51**(11): 1-10.
- [5] De. Castro E, Morandi C. Registration of translated and rotated images using finite fourier transforms [J]. *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, **PAMI-9**(5): 700-703.
- [6] Zhang G, Shi D L, Wang S, et al. Data correction techniques for the airborne large-aperture static image spectrometer based on image registration[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, **9**(11), 1-10.
- [7] LI Xiang-Bin, CHEN De-Rong, YU Cheng-Wei, et al. Image correction techniques for large-aperture static imaging spectrometer [J]. *Opto-Electronic Engineering* (李湘滨, 谌德荣, 余成伟, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪, *图像校正技术*). *光电技术*, 2004, **31**(8): 8-11.
- [8] LI Xiang-Bin. Research on the correction algorithm for LASIS image sequence [D]. *Electronic engineering academic of tsinghua university* (李湘滨. 大孔径静态干涉成像光谱仪图像校正技术研究. *清华大学电子工程系*), 2004: 1-60.
- [9] GAO Ying-Ying. Research on the correction algorithm for

- LASIS image sequence [D]. *Xi'an Institute of Optics and Precision Mchanics, Chinese Academy of Science* (高莹莹. 大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS)图像配准技术研究. 中国科学院西安光学精密机械研究所), 2007, 1 - 64.
- [10] ZENG Qi-Ming, XIE Xue-Tong. A FFT - based complex correlation function method applied to interferometric complex image coregistration [J]. *ACTA GEODAET ICA et CARTOGRAPHICA SINICA*(曾琪明,解学通. 基于谱运算的复相关函数法在干涉复图像配准中的应用. *测绘学报*), 2004, **33**(2):127 - 131.
- [11] YE Yuan-Xin, SHAN Jie, PENG Jian-Wei, *et al.* Automated multispectral remote sensing image registration using local self-similarity [J]. *ACTA GEODAET ICA et CARTOGRAPHICA SINICA*. (叶沅鑫,单杰,彭剑威,等. 利用局部自相似进行多光谱遥感图像自动配准. *测绘学报*, 2014, **43**(3):268 - 275.
- [12] JIANG Yong-Hua, ZHANG Guo, TANG Xin-Ming, *et al.* Research on the high accuracy band-to-band registration method of ZY-3 multispectral image [J]. *ACTA GEODAET ICA et CARTOGRAPHICA SINICA*(蒋永华,张过,唐新明,等. 资源三号测绘卫星多光谱影像高精度波段配准. *测绘学报*). 2012, **42**(6):884 - 890.
- [13] Barducci A, Marcoianni P, Pippi I, *et al.* Simulation of the performance of a stationary imaging interferometer for high-resolution monitoring of the Earth [J]. *Proc. SPIE*, 2001, **4540**:112 - 121.
- [14] Sellar R G, Kirkland L E. Imaging spectrometer with high-responsivity and no moving parts [J]. *In Proc. Forum on Concepts and Approaches for Jupiter Icy Moons Orbiter, Houston*, 2003, 9067.
- [15] W. Posselt *et al.* The Imaging FT Spectrometer FTIS, in *Fourier Transform Spectroscopy* [J], A. Sawchuk, ed., 84, p 1 - 4, OSA Trends in Optics and Photonics, Optical Society of America paper FMB2, Québec City, CA (2003).
- [16] Cabib D, Gil A, Lavi M, *et al.* New 3-5 μ wavelength range hyperspectral imager for ground and airborne use based on a single-element interferometer [J]. *Proc. SPIE*, 2007, **6737**, 673704.
- [17] Ma X L, Yang J F, Qiao W D, *et al.* An improved Fourier-based sub-pixel image registration algorithm for raw image sequence of LASIS [J]. *Proc. SPIE*, 2007, **6623**, 66230A.
- [18] Lucey P G, Horton K A, Williams T. Performance of a longwave infrared hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and an uncooled microbolometer array [J]. *Appl. Opt.* 2008, **47**(28): F107 - F113.
- [19] Rousset-Rouvière L, Coudrain C, Fabre S, *et al.* Sysiphe, an airborne hyperspectral imaging system for the VNIR-SWIR-MWIR-LWIR region [J]. In *Proc. 7th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy*, pp. 1 - 12, Edinburgh (April 11 - 13 2011).
- [20] Lucey P G, Wood M, Crites S T, *et al.* A LWIR hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and cooled HgCdTe detector array [J]. *Proc. SPIE*, 2012, **8390**, 83900Q.
- [21] Griffiths P R, de Haseth J A. *Interferometers versus grating spectrometers, in Fourier transform infrared spectrometry* [M]. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ (2007).
- [22] Jacquinet P. The luminosity of spectrometers with prisms, gratings, or Fabry-Perot etalons [J]. *Opt. Soc. Am.* 1954, **44**(10):761 - 765.
- [23] Sellar R G, Boreman G D. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometer [J]. *Appl. Opt.* 2005, **44**(9):1614 - 1624.
- [24] Lucey P G, Horton K, Williams T J, *et al.* SMIFTS: a cryogenically cooled, spatially modulated imaging infrared interferometer spectrometer [J]. *Proc. SPIE*, 1993, **1937**:130 - 141.
- [25] Sellar R G, Rafert B. Effects of aberrations on spatially modulated Fourier transform spectrometers [J]. *Opt. Eng.* 1994, **33**(9): 3087 - 3092.
- [26] Smith W H, Hammer P D. Digital array scanned interferometer: sensors and results [J]. *Appl. Opt.* 1996, **35**(16):2902 - 2909.
- [27] Ferrec Y, Taboury J, Sauer H, *et al.* Experimental results from an airborne static Fourier transform imaging spectrometer [J]. *Appl. Opt.* 2011, **50**(30): 5894 - 5904.
- [28] Horton R F. Optical design for a high-étendue imaging Fourier transform spectrometer [J]. *Proc. SPIE*, 1996, **2819**:300 - 315.