

引用格式: XIANG Guang-feng, HUANG Chan, MENG Bing-huan, *et al.* In-flight Image Registration and Performance Evaluation for Directional Polarimetric Camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0812001

向光峰,黄禅,孟炳寰,等.多角度偏振成像仪在轨图像配准及性能评估[J].光子学报,2020,49(8):0812001

多角度偏振成像仪在轨图像配准及性能评估

向光峰^{1,2,3},黄禅^{1,2,3},孟炳寰^{1,3},李双^{1,3},韩琳^{1,3},涂碧海^{1,2,3},洪津^{1,3}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所,合肥 230031)

(2 中国科学技术大学,合肥 230026)

(3 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,合肥 230031)

摘要:高精度的图像配准是保证多角度偏振成像仪在轨数据有效性的关键.介绍了多角度偏振成像仪基于光楔的偏振图像配准方法和基于地球参考网格的多角度、多光谱图像配准方法.系统地分析了影响多角度偏振成像仪多角度、多光谱图像配准性能的误差,并提出通过相对几何定标提高多角度、多光谱图像配准性能.对比误差校正前后多角度偏振成像仪的多角度、多光谱图像配准性能,证明所提方法有效地提高了多角度、多光谱图像配准精度.多角度偏振成像仪在轨多角度、多光谱和偏振图像配准精度分别优于 0.26 pixel、0.14 pixel 和 0.1 pixel.

关键词:图像配准;在轨几何定标;多角度偏振成像仪;偏振探测;高分五号卫星

中图分类号:TP751

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204908.0812001

In-flight Image Registration and Performance Evaluation for Directional Polarimetric Camera

XIANG Guang-feng^{1,2,3}, HUANG Chan^{1,2,3}, MENG Bing-huan^{1,3}, LI Shuang^{1,3}, HAN Lin^{1,3},
TU Bi-hai^{1,2,3}, HONG Jin^{1,3}

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: High-precision image registration is the key to ensure the in-flight data validity of the Directional Polarimetric Camera (DPC). This paper introduces the polarization image registration method based on optical wedge and the multi-angle, multi-spectral image registration method based on earth reference grid. The error of the registration performance of the multi-angle and multi-spectral image of DPC are fully investigated, and the use of relative geometric calibration is applied to correct the error and improve the registration performance. To verify the effectiveness of this relative geometric calibration method, we compare the registration effects before and after error correction. The results reveal that the accuracies of DPC in flight multi-angle, multi-spectral and polarized image registration are better than 0.26 pixel, 0.14 pixel and 0.1 pixel respectively, which show an improvement of the registration performance.

Key words: Image registration; In-flight geometric calibration; Directional polarimetric camera; Polarization detection; GaoFen-5 satellite

OCIS Codes: 120.0280; 100.2000; 110.4234; 120.5410

基金项目:高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(No.30-Y20A19-9007-15/17),高分专项(民用部分)卫星应用共性关键技术项目(No.50-Y20A38-0509-15/16)

第一作者:向光峰(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为偏振光学遥感仪器定标. Email: xgf056@mail.ustc.edu.cn

导师:李双(1976—),男,副研究员,博士,主要研究方向为偏振光谱遥感探测技术. Email: shli@aiofm.ac.cn

通讯作者:孟炳寰(1981—),男,副研究员,博士,主要研究方向为偏振遥感仪器研制和定标. Email: bhmeng@aiofm.ac.cn

收稿日期:2020-04-17;录用日期:2020-07-07

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

2018年5月9日高分五号卫星在太原卫星发射中心成功发射,其搭载的有效载荷——多角度偏振成像仪(Directional Polarimetric Camera, DPC)^[1-4]是由安徽光学精密机械研究所研制的一种具有超广角、画幅式、低畸变特性的星载偏振传感器.DPC通过分时切换通道的方式对地气系统的多角度、多光谱和偏振辐射信息进行探测,结合基于偏振信息的大气特性反演模型,可以提供全球大气气溶胶和云特性产品^[5-7].反演产品的有效性与DPC多角度、多光谱以及偏振图像的配准性能紧密相关.DPC在发射和在轨运行过程中会受到震动、环境变化以及应力释放等因素的影响,实验室检校参数存在较大误差从而降低图像配准精度,且由于DPC分时测量的特性会导致各通道图像间出现偏移.因此,为保证DPC在轨多角度、多光谱和偏振图像的配准精度,研究适合于DPC的高精度多角度、多光谱和偏振图像配准方法具有极其重要的意义.

图像配准是指对不同传感器或同一传感器在不同时间、不同成像条件下得到的同一景物的两幅或多幅图像进行几何校准的过程^[8].近年来图像配准技术广泛应用于遥感、医学、计算机视觉等多个领域.传统的图像配准方法通过匹配不同图像间的特征点,估计图像间几何变换模型,实现图像配准.传统的图像配准方法可分为基于区域的图像配准方法和基于特征的图像配准方法两类^[9].基于区域的图像配准方法适用于几何形变和灰度差异小的图像配准,且这类方法需要利用所有图像信息,计算量较大.相比之下,基于特征的图像配准方法鲁棒性更强,计算量更小.基于特征的图像配准方法在遥感图像配准领域受到越来越多的重视.例如,VURAL M F等^[10]提出的方向限制尺度不变特征变换(Orientation-Restricted Scale Invariant Feature Transform, OR-SIFT)算法对多光谱图像的配准表现出了较好的鲁棒性;SEDAGHAT A等^[11]提出一种鲁棒一致性尺度不变特征变换(Uniform Robust SIFT, UR-SIFT)算法用于对多源遥感图像的配准.但是,无论是基于区域还是基于特征的图像配准方法都仅根据图像间匹配的特征点信息估计几何变换模型,都没有从本质上分析和消除影响图像配准性能的因素,在这种情况下得到的几何变换模型没有通用性,每次图像配准都需要重新匹配特征点并估计几何变换模型.为了解决传统图像配准方法的局限性,王密等^[12]提出了一种基于物方定位一致性的多光谱图像配准方法用于资源三号卫星多光谱图像配准,大大提高了图像配准效率.但是该方法仅考虑了多光谱图像的配准,而DPC在轨图像配准同时包括多角度、多光谱和偏振图像配准三个方面.

首先详细介绍了DPC在轨多角度、多光谱和偏振探测的基本原理,并在此基础上介绍了DPC基于地球参考网格的多角度和多光谱图像配准方法以及针对同一波段三检偏通道的光楔硬件配准方法.然后系统地分析了影响多角度、多光谱图像配准性能的误差源,将其划分为外方位参数和内方位参数误差两部分.提出通过相对几何定标分步校正外方位参数和内方位参数误差以提高图像配准性能.最后对DPC在轨图像配准性能进行评估,并通过对比相对几何定标前后的多角度、多光谱图像配准性能证明相对几何定标方法的有效性.

1 基本原理

1.1 DPC在轨观测原理

DPC运行于标称轨道高度为705 km的太阳同步轨道,幅宽为1 850 km,沿轨和穿轨视场均为 100° ,星下点空间分辨率优于3.5 km.DPC在轨运行过程中多角度、多光谱和偏振测量原理如图1所示.DPC通过分时切换通道(15个)的方式可在同一个探测周期内获取5个非偏波段(443 nm、565 nm、763 nm、765 nm、910 nm)和3个偏振波段(490 nm、670 nm、865 nm,每个偏振波段需要3个连续的检偏方向不同的通道)的图像,还有一个通道用于暗电流测量.由于DPC超广角像方远心物镜的广角成像能力和在轨运行过程中DPC与

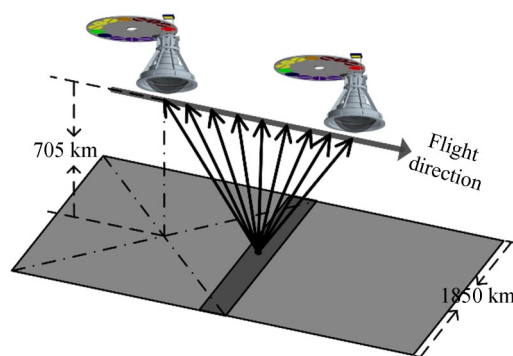


图1 DPC在轨观测原理

Fig.1 DPC in-flight observation schematic

地球的相对运动,可实现对同一地物目标的多角度(至少9个角度)观测.多角度、多光谱和偏振图像的配准性能直接影响着DPC应用产品的质量.所以,针对DPC在轨多角度、多光谱和偏振观测的特性,研究适合于DPC的高精度在轨图像配准方法将有助于提高其应用产品的质量.

1.2 DPC在轨成像几何模型

DPC在轨成像几何模型是DPC在轨图像配准的基础.对于DPC在轨成像几何模型的研究将有助于系统地分析影响DPC在轨图像配准性能的因素,对于提高图像配准性能具有重要的意义.

DPC在轨成像几何模型如图2所示,基本原理为中心投影.图中 G 表示地表物点, P 为DPC投影中心,电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)上像点为 M , Z 表示DPC光轴,全球定位系统(Global Positioning System, GPS)和姿态测量系统(Attitude Determination System, ADS)用于确定DPC在轨运行过程中投影中心的位置和光轴的指向.

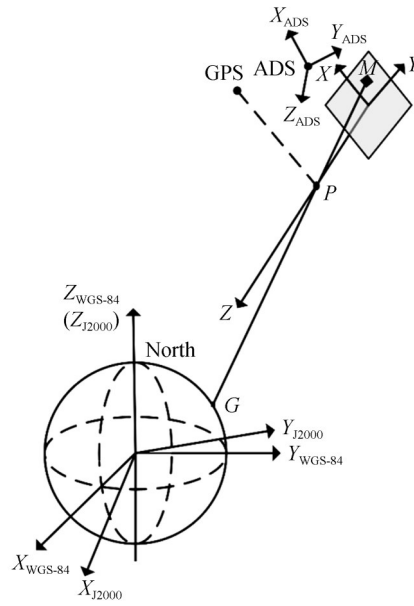


图2 DPC在轨成像几何模型
Fig.2 DPC in-flight imaging geometric model

根据共线方程基本原理(即像点 M 、投影中心 P 和物点 G 三点共线)可将DPC在轨成像几何模型描述为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} = \begin{bmatrix} X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}} \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \lambda \cdot \mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{WGS-84}} \cdot \mathbf{R}_{\text{ADS}}^{\text{J2000}} \cdot \mathbf{R}_{\text{DPC}}^{\text{ADS}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $[X \ Y \ Z]_{\text{WGS-84}}^T$ 表示物点在WGS-84坐标系(地球固定坐标系)下的坐标; $[X_{\text{GPS}} \ Y_{\text{GPS}} \ Z_{\text{GPS}}]_{\text{WGS-84}}^T$ 表示GPS相位中心在WGS-84坐标系下的坐标; $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ 表示GPS相位中心与DPC投影中心 P 的位置偏差; λ 表示比例系数; $\mathbf{R}_{\text{J2000}}^{\text{WGS-84}}$ 表示J2000坐标系(空间固定惯性坐标系)到WGS-84坐标系的旋转矩阵; $\mathbf{R}_{\text{ADS}}^{\text{J2000}}$ 表示ADS坐标系到J2000坐标系的旋转矩阵; $\mathbf{R}_{\text{DPC}}^{\text{ADS}}$ 表示DPC仪器坐标系到ADS坐标系的旋转矩阵; $[x \ y \ -f]^T$ 表示像点在DPC仪器坐标系下的坐标; f 表示DPC主距.

2 DPC图像配准方法

DPC在轨图像的配准包括多角度、多光谱以及偏振图像配准三个部分.

DPC偏振图像配准是指同一波段三个不同检偏通道图像间的配准.DPC采用光楔滤光片直接将同一波段三个检偏通道的0级图像数据配准,使同一像元探测同一地物目标.如图3所示,同一波段的三个检偏通道为相邻通道.P1、P2和P3通道中检偏器的透光轴相对方向分别为 0° 、 60° 和 120° .P1和P3通道采用光楔滤光片,P2采用平板滤光片.光楔滤光片使P1和P3通道相对于P2通道在沿轨方向上有 -1 和 $+1$ 像元的偏

移,补偿由于分时测量时卫星运动引起的图像偏移.实验室测得其配准性能优于0.1像元.研究表明在像移小于等于0.1个像元时,由像移产生的线偏振度测量误差小于0.5%^[13].偏振图像的配准精度仅受到光楔滤光片在轨运行状态的影响.

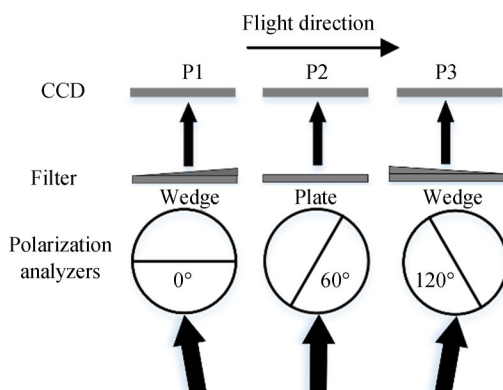


图3 DPC波段内偏振图像配准原理

Fig.3 In-band polarization image registration principle of DPC

DPC多角度图像配准是指同一波段各观测角度图像之间的配准,多光谱图像配准是指同一探测周期内各光谱波段图像的配准.DPC多角度、多光谱图像配准方法的基本思路是通过将所有数据投影到DPC地球参考网格上以实现多角度、多光谱图像的配准.该方法通过DPC在轨成像几何模型计算出CCD阵列上每一个像元 (i, j) 对应的地球参考网格坐标 (l, p) ,再经过线性插值得到精确的像素值.当在轨成像几何模型中各参数均准确无误时,多角度、多光谱图像将会被严格配准到DPC地球参考网格之上.

为保证DPC应用产品的质量,需要根据上述图像配准方法对DPC在轨多角度、多光谱和偏振图像进行高精度的配准.DPC在轨图像配准流程如图4所示.首先需要采用偏振图像配准方法对DPC原始数据中偏振波段的三个检偏通道图像进行配准.然后采用DPC多角度、多光谱图像配准方法完成在轨多角度、多光谱图像的配准,并采用相对几何定标的方法校正其在轨成像几何模型中参数误差,提高多角度、多光谱图像配准性能.最后需要评估配准后的在轨多角度、多光谱和偏振图像配准性能.

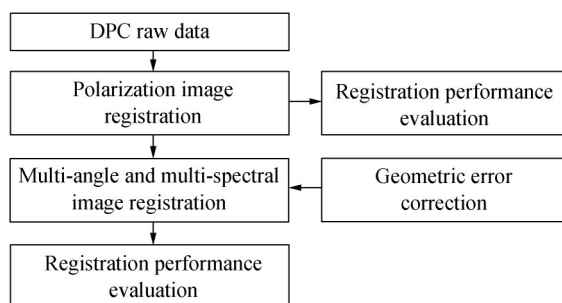


图4 DPC在轨图像配准流程

Fig.4 DPC in-flight image registration process

3 误差分析与校正

3.1 多角度、多光谱图像配准误差分析

DPC多角度、多光谱图像的配准性能取决于在轨成像几何模型参数的精度.虽然在卫星发射前对DPC进行了严格的实验室几何定标,但是由于DPC在发射和在轨运行过程中受到环境变化、震动以及应力释放等因素的影响,在轨成像几何模型中各参数与实验室定标测试数据存在一定差异.为保证DPC在轨多角度、多光谱图像的配准精度,系统地分析影响在轨图像配准性能的误差来源,对于提高图像配准性能意义重大.通过对DPC在轨成像几何模型的分析,可以将影响DPC图像配准的误差分为DPC外部误差和DPC内部误

差两个部分.

DPC 外部误差包括线元素误差和角元素误差两个部分.

线元素误差:1)GPS 定轨误差,属于随机误差.高分五号卫星采用 GPS 定轨,并采用根据地面上注的轨道参数结合 GPS 输出的瞬时轨道参数进行高精度轨道递推的方案^[14].该方法定轨精度高、稳定性好,对 DPC 的图像配准性能影响小.2)GPS 相位中心与 DPC 投影中心的位置偏差,属于系统误差.由图 2 可知, GPS 相位中心与 DPC 投影中心不重合,而 GPS 获取的轨道数据是针对 GPS 相位中心.该部分偏差很小,对图像配准性能的影响较小.由于线元素误差与角元素误差的等效性,线元素误差可以通过角元素补偿^[15].

角元素误差:1)姿态测量误差,属于随机误差.高分五号卫星姿态参数采用三组星敏感器与陀螺的组合进行姿态测量,具有较高的测量精度^[16].2)安装角误差,属于系统误差.安装角 α 、 β 和 γ 分别表示 DPC 坐标系绕 ADS 坐标系 Y_{ADS} 轴、 X_{ADS} 轴和 Z_{ADS} 轴的旋转角,飞行前对其进行了精确的测量,但是由于发射和在轨运行过程中震动、环境变化以及应力释放等因素的影响,其实际在轨状态存在变化.DPC 相对 ADS 的安装关系可表示为

$$\mathbf{R}_{\text{ADS}}^{\text{DPC}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

DPC 外部误差中安装角误差是导致图像配准性能降低的主要因素.多角度图像的配准性能对安装角精度十分敏感,如图 5 所示. Z 表示 DPC 光轴理想的指向, Z' 表示实际指向.在理想状态下,地面物点 G 在两个不同观测角度图像 a, b 上的像点分别为 M_a 和 M_b .但是实际指向下,像点 M_a 和 M_b 对应的实际地物分别为 G_a, G_b ,随着观测角度差异的增大,配准精度越低.图 8 中误差校正前的配准性能也显示了多角度图像配准性能的强角度相关性.

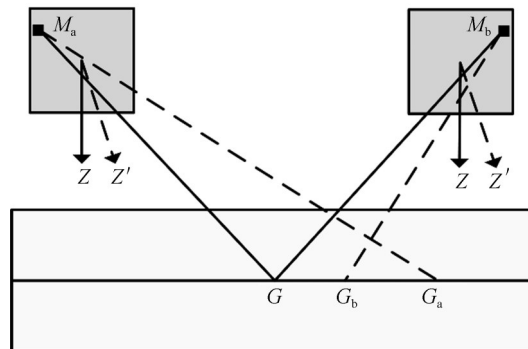


图 5 安装角误差分析

Fig.5 Installation angle error analysis

DPC 内部误差包括面阵 CCD 的旋转、平移、缩放, DPC 镜头畸变, 主距变化. DPC 仪器内部误差可以采用一个几何模型进行描述, 如图 6 所示. 该几何模型以面阵 CCD 中心为坐标原点, 图中 Z 表示 DPC 光轴, X 和 Y 轴分别平行于面阵 CCD 的行和列. 视场角为 θ 、方位角为 φ 的入射光线 P 在 CCD 上的像点为 M .

像点 M 在 O - XYZ 坐标系下可表示为

$$\begin{cases} M_x = S_{kx} - SM_k \cdot \cos\varphi \\ M_y = S_{ky} - SM_k \cdot \sin\varphi \\ SM_k = f1_k \cdot \tan\theta + f3_k \cdot \tan^3\theta + f5_k \cdot \tan^5\theta \end{cases} \quad (3)$$

S_k 是 k 波段下的畸变律中心, S_{kx} 和 S_{ky} 是 k 波段下畸变律中心的坐标, $f1_k, f3_k, f5_k$ 是 k 波段下的畸变律系数. 采用分离式二维转台控制平行光管连续地调整入射光线的视场角及方位角, 使其在 CCD 像面上成四列

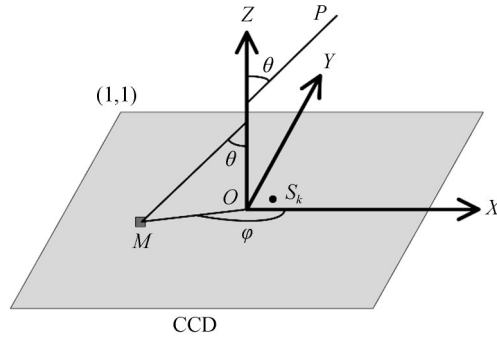


图6 DPC几何模型

Fig.6 DPC geometrical model

充满全视场的像斑,计算各个像斑的质心,与对应的视场角及方位角一同带入修正后的几何模型^[17],通过最小二乘算法优化得出DPC各个波段的畸变律中心坐标(S_{kx}, S_{ky})和畸变律系数($f1_k, f3_k, f5_k$),从而实现DPC几何模型中各参数精确的飞行前定标^[17-19].但是受到发射和在轨运行过程中的震动、环境变化以及应力释放等因素的影响,DPC仪器几何模型中各参数与地面定标结果存在偏差,会降低在轨图像配准性能.

DPC的多光谱图像在同一个周期内获得,基本可以认为是准同时探测,所以DPC外部误差对多光谱图像配准性能影响很小,内部误差是影响多光谱图像配准性能的主要原因.

通过上述分析,可以将DPC在轨成像几何模型简化为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} = \begin{bmatrix} X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}} \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} + R \cdot R_{\text{DPC}}^{\text{ADS}} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ -f \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$R = \lambda \cdot R_{\text{J2000}}^{\text{WGS-84}} \cdot R_{\text{ADS}}^{\text{J2000}} \quad (5)$$

在轨成像几何模型中影响多角度、多光谱图像配准性能的误差可以表示为外方位参数 $A_E = (\alpha, \beta, \gamma)$ 和内方位参数 $A_I = (S_{kx}, S_{ky}, f1_k, f3_k, f5_k)$ 的误差.

3.2 误差校正

为使DPC多角度、多光谱图像具有较高的配准性能,外方位参数 $A_E = (\alpha, \beta, \gamma)$ 和内方位参数 $A_I = (S_{kx}, S_{ky}, f1_k, f3_k, f5_k)$ 需要具有较高的精度.采用一种在轨相对几何定标的方法通过校正在轨成像几何模型中外方位参数和内方位参数的误差来提高图像配准性能.为保证误差校正方法的精度以及效率,采用670 nm波段第五个角度的图像作为参考图像迭代优化外方位参数和内方位参数.DPC在轨几何定标模型为

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ -f \end{bmatrix} = R_{\text{ADS}}^{\text{DPC}} \cdot R^{-1} \cdot \left[\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} - \begin{bmatrix} X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}} \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} \right] \quad (6)$$

令

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = R^{-1} \cdot \left[\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} - \begin{bmatrix} X_{\text{GPS}} \\ Y_{\text{GPS}} \\ Z_{\text{GPS}} \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} \right] \quad (7)$$

构建平差方程为

$$\begin{cases} G_x(A_E, A_I) = \frac{a_{11}\bar{X} + a_{12}\bar{Y} + a_{13}\bar{Z}}{a_{31}\bar{X} + a_{32}\bar{Y} + a_{33}\bar{Z}} + \frac{M_x}{f} \\ G_y(A_E, A_I) = \frac{a_{21}\bar{X} + a_{22}\bar{Y} + a_{23}\bar{Z}}{a_{31}\bar{X} + a_{32}\bar{Y} + a_{33}\bar{Z}} + \frac{M_y}{f} \end{cases} \quad (8)$$

1) 外方位参数校正

采用 SIFT 算法^[20-21]匹配参考图像与其余角度图像的特征点,通过参考波段在轨成像几何模型得到每个特征点在 WGS-84 坐标系下的坐标为 $(X_n, Y_n, Z_n)_{\text{WGS-84}}$, n 表示匹配特征点对的序号.在对外方位参数迭代优化的过程中,保持内方位参数不变.初始的内方位参数 A_1^p 和外方位参数 A_E^p 均由实验室定标测试结果表示.构建误差方程为

$$V_n = B_n X_n - L_n, P_n \quad (9)$$

式中,系数矩阵 $B_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_{xn}(A_E, A_1)}{\partial A_E} \\ \frac{\partial G_{yn}(A_E, A_1)}{\partial A_E} \end{bmatrix}$, 外方位参数修正值 $X_n = \begin{bmatrix} d\alpha \\ d\beta \\ dy \end{bmatrix}$, 利用当前内外方位参数得到的平差方

程的值 $L_n = \begin{bmatrix} G_{xn}(A_E, A_1) \\ G_{yn}(A_E, A_1) \end{bmatrix}$, P_n 表示权值.

利用最小二乘求解 X

$$X = (B^T P B)^{-1} (B^T P L) \quad (10)$$

更新外方位参数,迭代优化外方位参数.当多角度图像配准性能优于 0.3 像元时停止迭代.

2) 内方位参数校正

采用 SIFT 算法匹配参考图像与待校正波段图像的特征点,通过参考波段在轨成像几何模型得到每个特征点在 WGS-84 坐标系下的坐标 $(X_n, Y_n, Z_n)_{\text{WGS-84}}$, n 表示匹配特征点对的序号.在对内方位参数迭代优化的过程中,保持外方位参数不变,其值由步骤 1 得到.误差方程为

$$V_n = C_n Y_n - L_n, P_n \quad (11)$$

系数矩阵 $C_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_{xn}(A_E, A_1)}{\partial A_1} \\ \frac{\partial G_{yn}(A_E, A_1)}{\partial A_1} \end{bmatrix}$, 内方位参数修正值 $Y_n = \begin{bmatrix} dS_{kx} \\ dS_{ky} \\ df1_k \\ df3_k \\ df5_k \end{bmatrix}$, 利用当前内外方位参数得到的平差方

程的值 $L_n = \begin{bmatrix} G_{xn}(A_E, A_1) \\ G_{yn}(A_E, A_1) \end{bmatrix}$, P_n 表示权值.

利用最小二乘求解 Y

$$Y = (C^T P C)^{-1} (C^T P L) \quad (12)$$

更新内方位参数,迭代优化内方位参数.当待校正波段图像与 670 nm 波段图像配准性能优于 0.15 像元时停止迭代.对每一个波段执行步骤 2.

3) 多角度、多光谱图像配准性能验证

完成步骤 1、2 后,将所修正后的内外方位参数用于多角度、多光谱图像配准.验证多角度、多光谱图像配准性能是否同时优于 0.3 像元和 0.15 像元.当无法同时满足图像配准性能时,将此时的内外方位参数作为初值重新执行步骤 1、2.当满足性能要求时输出内外方位参数 A_1^f, A_E^f , 该组参数将用于 DPC 全球的多角度、多光谱图像配准.

与传统的基于地面定标场或是参考影像的在轨几何定标方法相比,该在轨几何定标方法精度较高,其精度仅受到 SIFT 算法特征点定位和匹配精度的影响.研究表明 SIFT 算法特征点定位和匹配精度优于 0.01 像元^[22].

4 试验结果与分析

4.1 几何定标参数

为提高在轨几何定标精度,需要选择无云地区且地面特征较丰富的区域进行在轨几何定标.图 7 为 DPC 某一轨数据的预览图,图中方框标注地区云量少,地面特征较丰富,因此选择该地区数据进行在轨几何定标.

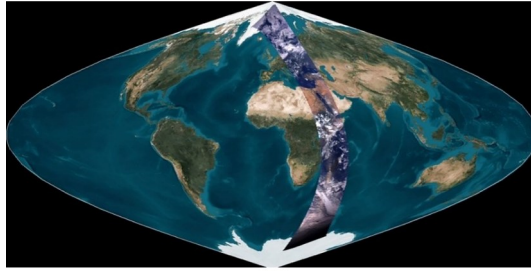


图7 DPC数据预览
Fig.7 DPC data preview

DPC在轨运行过程中的内方位参数如表1所示,详细的飞行前几何定标数据可见参考文献[17].

表1 DPC内方位参数
Table 1 DPC interior orientation parameters

Band/nm	$f1_k$	$f3_k$	$f5_k$	S_{kx}	S_{ky}
443	215.819	1.318	-0.634	272.418	255.897
490	214.798	1.588	-0.728	272.404	254.900
565	214.153	2.140	-0.906	272.463	255.948
670	214.093	2.675	-1.071	272.419	256.923
763	214.347	3.029	-1.178	272.439	255.961
765	214.350	3.037	-1.180	272.412	254.973
865	214.749	3.336	-1.268	272.428	255.987
910	214.973	3.457	-1.304	272.406	256.929

在轨运行过程中的DPC外方位参数如表2,相较于飞行前测得的外方位参数,在轨运行过程中外方位参数均产生了变化.

表2 DPC外方位参数
Table 2 DPC exterior orientation parameters

Stage	α	β	γ
Pre-flight	0°4'28"	0°1'28"	0°4'15"
In-flight	0°7'48"	0°6'36"	0°13'48"

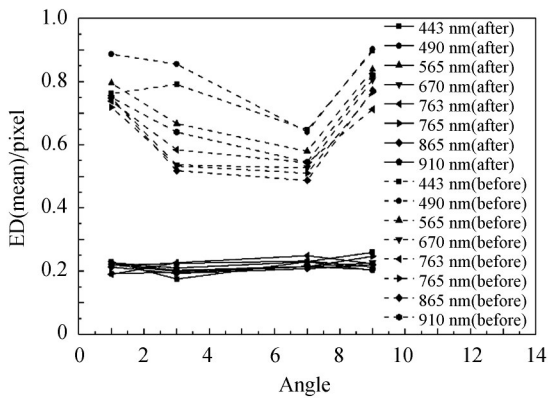
4.2 图像配准性能

图像配准性能采用SIFT算法所匹配特征点对X方向偏移、Y方向偏移以及欧氏距离(Euclidean Distance, ED)的均值(Mean)与标准偏差(Standard Deviation, STD)表示.

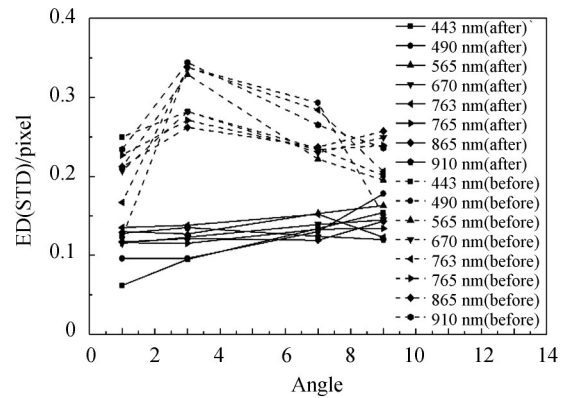
多角度图像配准性能是指同一波段各观测角度图像之间的配准性能.DPC可以在9个不同的角度对同一目标进行观测,多角度图像的获取不在同一个探测周期内.多角度图像配准性能如表3和图8所示,给出了在轨几何定标前后8个波段的1、3、7、9四个角度相对于各波段第5个角度的配准性能.相较于在轨几何定标前,在轨几何定标后各个波段的配准性能均明显提高,且各个角度图像相对于参考角度图像的配准性能基本一致.在轨几何定标前,在X方向上偏移的均值大于等于0.339像元,标准偏差大于等于0.135像元;在Y方向上偏移的均值大于等于0.243像元,标准偏差大于等于0.166像元;欧氏距离的均值大于等于0.487像元,标准偏差大于等于0.123像元.在轨几何定标后,在X方向上偏移的均值小于等于0.188像元,标准偏差小于等于0.139像元;在Y方向上偏移的均值小于等于0.201像元,标准偏差小于等于0.169像元,欧氏距离的均值小于等于0.259像元,标准偏差小于等于0.178像元.

表3 不同波段多角度图像配准性能
Table 3 Multi-angle image registration performance in different bands

Angle	Band/ nm	After calibration						Before calibration					
		$ \Delta X /\text{pixel}$		$ \Delta Y /\text{pixel}$		ED/pixel		$ \Delta X /\text{pixel}$		$ \Delta Y /\text{pixel}$		ED/pixel	
		Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
1	443	0.188	0.084	0.120	0.033	0.230	0.062	0.628	0.223	0.318	0.331	0.762	0.250
	490	0.099	0.093	0.173	0.113	0.227	0.096	0.772	0.155	0.369	0.222	0.887	0.123
	565	0.125	0.103	0.154	0.122	0.218	0.130	0.706	0.200	0.294	0.229	0.795	0.212
	670	0.120	0.097	0.162	0.114	0.224	0.115	0.643	0.194	0.332	0.206	0.749	0.207
	763	0.089	0.089	0.153	0.125	0.190	0.135	0.682	0.148	0.243	0.166	0.738	0.167
	765	0.115	0.107	0.128	0.100	0.194	0.116	0.628	0.216	0.306	0.185	0.719	0.227
	865	0.134	0.099	0.142	0.107	0.213	0.117	0.629	0.204	0.352	0.211	0.748	0.212
	910	0.122	0.109	0.163	0.109	0.220	0.128	0.643	0.234	0.337	0.187	0.750	0.234
3	443	0.120	0.089	0.105	0.081	0.175	0.095	0.551	0.207	0.537	0.266	0.791	0.282
	490	0.114	0.069	0.160	0.102	0.210	0.096	0.594	0.219	0.586	0.320	0.855	0.338
	565	0.133	0.105	0.157	0.113	0.224	0.127	0.475	0.231	0.413	0.321	0.667	0.329
	670	0.117	0.106	0.138	0.110	0.202	0.123	0.397	0.214	0.308	0.262	0.536	0.282
	763	0.124	0.107	0.164	0.131	0.227	0.138	0.429	0.234	0.347	0.311	0.584	0.338
	765	0.113	0.098	0.133	0.106	0.195	0.115	0.392	0.210	0.308	0.255	0.533	0.271
	865	0.119	0.104	0.127	0.104	0.193	0.121	0.377	0.215	0.298	0.245	0.518	0.262
	910	0.130	0.125	0.123	0.100	0.199	0.135	0.457	0.244	0.409	0.304	0.640	0.344
7	443	0.145	0.132	0.148	0.105	0.230	0.134	0.478	0.226	0.383	0.220	0.647	0.235
	490	0.128	0.110	0.166	0.116	0.230	0.130	0.484	0.221	0.372	0.275	0.641	0.293
	565	0.128	0.124	0.169	0.169	0.232	0.153	0.419	0.197	0.338	0.239	0.579	0.222
	670	0.135	0.111	0.142	0.124	0.215	0.139	0.364	0.204	0.321	0.230	0.527	0.230
	763	0.142	0.126	0.180	0.131	0.249	0.152	0.432	0.218	0.282	0.251	0.543	0.284
	765	0.139	0.118	0.139	0.105	0.214	0.133	0.352	0.213	0.307	0.227	0.510	0.234
	865	0.130	0.110	0.134	0.103	0.208	0.119	0.339	0.212	0.289	0.224	0.487	0.237
	910	0.142	0.112	0.134	0.105	0.215	0.124	0.405	0.225	0.298	0.254	0.545	0.265
9	443	0.151	0.099	0.201	0.134	0.259	0.154	0.661	0.186	0.582	0.191	0.897	0.201
	490	0.163	0.125	0.113	0.136	0.202	0.178	0.756	0.135	0.447	0.221	0.902	0.151
	565	0.129	0.139	0.150	0.116	0.213	0.163	0.652	0.159	0.465	0.273	0.838	0.195
	670	0.158	0.126	0.130	0.121	0.226	0.145	0.645	0.217	0.413	0.278	0.806	0.249
	763	0.123	0.095	0.158	0.125	0.223	0.123	0.625	0.216	0.276	0.192	0.712	0.206
	765	0.139	0.124	0.174	0.117	0.247	0.134	0.624	0.218	0.370	0.266	0.766	0.239
	865	0.140	0.116	0.148	0.120	0.220	0.143	0.612	0.224	0.405	0.273	0.772	0.257
	910	0.105	0.083	0.165	0.106	0.204	0.120	0.601	0.245	0.485	0.273	0.821	0.236



(a) ED(mean)



(b) ED(STD)

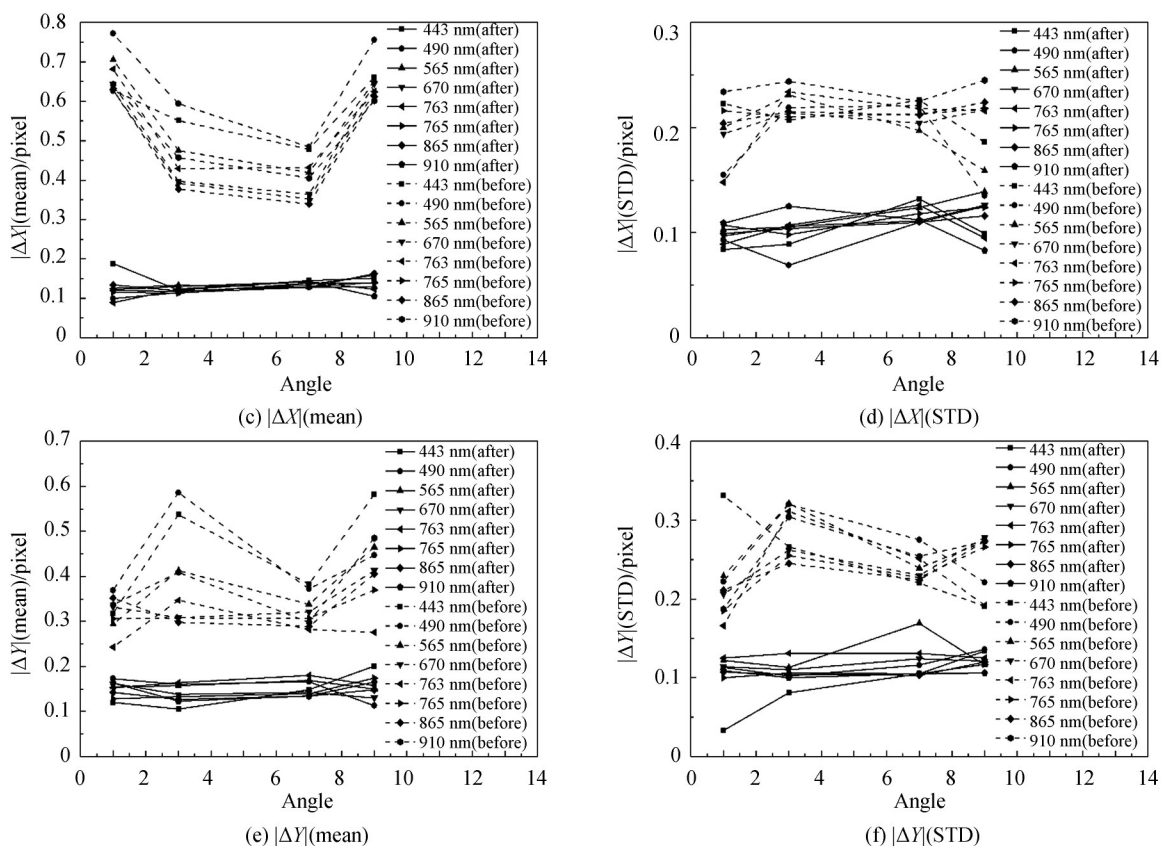


图8 不同波段多角度图像配准性能

Fig.8 Multi-angle image registration performance in different bands

多光谱图像配准性能是指同一个探测周期内各光谱波段图像的配准性能.DPC在同一个探测周期内能够对8个光谱波段(443 nm、490 nm、565 nm、670 nm、763 nm、765 nm、865 nm、910 nm)的辐射信息进行探测.多光谱图像配准性能如表4和图9所示.相较于在轨几何定标前,在轨几何定标后各个波段相对于670 nm波段的配准性能均明显提高,且各个波段相对于参考波段的配准性能基本一致.在轨几何定标前,各波段相对于670 nm波段在X方向上偏移的均值大于等于0.200像元,标准差大于等于0.188像元;在Y方向偏移的均值大于等于0.197像元,标准差大于等于0.186像元;欧氏距离的均值大于等于0.312像元,标准差大于等于0.223像元.在轨几何定标后,各波段相对于670 nm波段在X方向上偏移的均值小于等于0.09像元,标准差小于等于0.058像元;在Y方向偏移的均值小于等于0.102像元,标准差小于等于0.068像元;欧氏距离的均值小于等于0.133像元,标准差小于等于0.061像元.

偏振图像的配准性能是指同一波段三个检偏通道图像的配准性能.DPC在一个探测周期内可以对三个

表4 波段间图像配准性能

Table 4 Inter-band image registration performance

Band/ nm	After calibration						Before calibration					
	ΔX /pixel		ΔY /pixel		ED/pixel		ΔX /pixel		ΔY /pixel		ED/pixel	
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
443	0.060	0.039	0.102	0.068	0.130	0.056	0.288	0.220	0.292	0.234	0.452	0.258
490	0.090	0.055	0.086	0.055	0.133	0.061	0.233	0.188	0.212	0.189	0.347	0.223
565	0.073	0.055	0.067	0.049	0.108	0.060	0.254	0.210	0.230	0.189	0.374	0.240
763	0.075	0.055	0.079	0.053	0.120	0.058	0.273	0.236	0.235	0.204	0.395	0.267
765	0.066	0.051	0.067	0.048	0.104	0.055	0.200	0.193	0.197	0.186	0.312	0.231
865	0.076	0.054	0.081	0.053	0.121	0.059	0.236	0.210	0.260	0.225	0.384	0.265
910	0.081	0.058	0.073	0.050	0.119	0.060	0.257	0.217	0.236	0.211	0.385	0.255

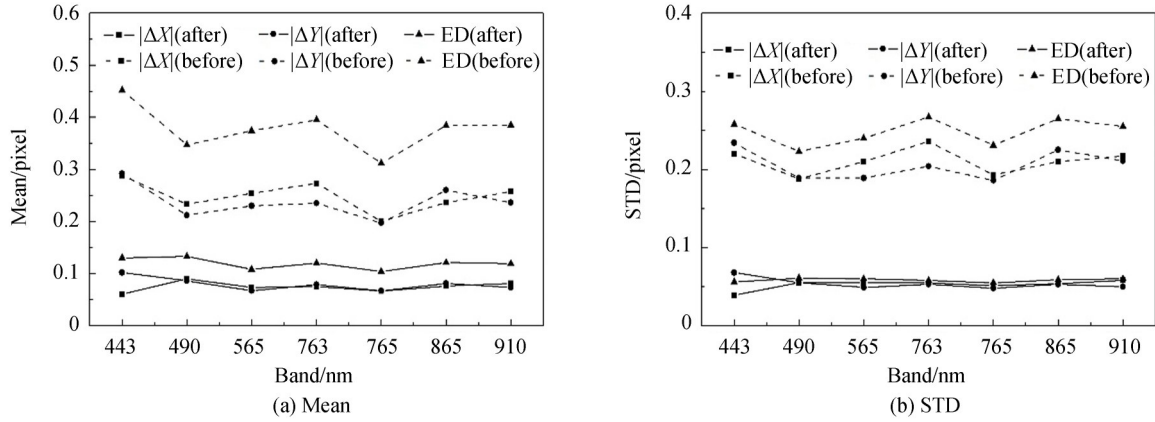


图9 波段间图像配准性能

Fig. 9 Inter-band image registration performance

波段(490 nm、670 nm、865 nm)的偏振辐射特性进行探测.在对DPC波段内三个检偏通道图像的配准性能进行评价时,分别选取DPC 0级数据中490 nm、670 nm和865 nm波段的P2通道作为参考图像,评价各偏振波段P1和P3通道图像相对于P2通道图像的配准性能.波段内三个检偏通道图像配准性能如表5所示,结果显示配准精度均优于0.1像元,与实验室测得的配准性能相符合,证明了DPC波段内三个检偏通道的光楔配准功能在轨运行良好.

表5 波段内偏振图像配准性能

Table 5 Performance of in-band polarization image registration

Band/nm	Channel	$ \Delta X /\text{pixel}$		$ \Delta Y /\text{pixel}$		ED/pixel	
		Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
490	P1-P2	0.033	0.026	0.074	0.052	0.086	0.051
	P3-P2	0.041	0.035	0.049	0.043	0.070	0.047
670	P1-P2	0.037	0.037	0.045	0.046	0.065	0.051
	P3-P2	0.038	0.042	0.046	0.047	0.067	0.055
865	P1-P2	0.060	0.046	0.043	0.043	0.082	0.053
	P3-P2	0.074	0.034	0.054	0.033	0.098	0.033

5 结论

采用基于地球参考网格的多角度和多光谱图像配准方法以及基于光楔的偏振图像配准方法对DPC在轨图像进行配准.从DPC在轨成像几何模型出发,系统地分析了影响多角度、多光谱图像配准性能的因素.将影响DPC多角度、多光谱图像配准性能的因素划分为外方位参数 $A_E=(\alpha, \beta, \gamma)$ 和内方位参数 $A_I=(S_{kx}, S_{ky}, f1_k, f3_k, f5_k)$ 的误差两个部分,并采用相对几何定标的方法校正误差.最后,采用SIFT算法对DPC在轨图像配准性能进行了评估.通过对比分析误差校正前后多角度、多光谱图像的配准性能,证明了提出的相对几何定标方法有效地提高了多角度、多光谱图像配准性能.且经过在轨几何校正后多角度图像配准性能基本不随角度变化而变化,多光谱图像配准性能也基本不随光谱变化而变化.另外,DPC在轨偏振图像配准性能与实验室性能一致,证明了光楔配准功能在轨运行状态良好.DPC在轨多角度、多光谱和偏振图像配准精度分别优于0.26像元、0.14像元和0.1像元.相比于传统遥感图像配准方法,本文方法极大地提升了图像配准效率与精度.该方法以及获得的在轨几何定标参数已经用于DPC全球的多角度、多光谱和偏振图像数据的生产流程中.

由于443 nm波段图像信噪比较低等因素的影响,SIFT算法在该波段图像中提取的特征点较少且精度较低,导致该波段相对几何定标和图像配准性能评价的精度都相对较低.所以,今后需要针对DPC图像的特点对SIFT算法进行针对性的改进.另外,本文仅对DPC在轨运行初期的图像配准性能进行了评价,还需要对DPC在轨几何定标参数和图像配准性能的时间稳定性进一步研究.

参考文献

- [1] YANG Wei-feng, HONG Jin, QIAO Yan-li. Optical design of spaceborne directional polarization camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(8): 0822005.
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, **35**(8): 082205.
- [2] LI Zheng-qiang, HOU Wei-zhen, HONG Jin, *et al.* Directional polarimetric camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2018, **218**: 21-37.
- [3] QIAN Hong-hu, MENG Bing-huan, YUAN Yin-lin, *et al.* Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(10): 100701.
钱鸿鹄, 孟炳寰, 袁银麟, 等. 星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析[J]. 物理学报, 2017, **66**(10): 100701.
- [4] ZHNANG Miao-miao, MENG Bing-huan, LUO Dong-gen, *et al.* Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(8): 0812004.
张苗苗, 孟炳寰, 骆冬根, 等. 星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析[J]. 光学学报, 2018, **38**(8): 0812004.
- [5] HERMAN M, DEUZÉ J L, MARCHAND A, *et al.* Aerosol remote sensing from POLDER/ADEOS over the ocean: Improved retrieval using a nonspherical particle model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**: D10S02.
- [6] BURIZE J C, VANBAUCE C, PAROL F, *et al.* Cloud detection and derivation of cloud properties from POLDER[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**(13): 2785-2813.
- [7] MISHCHENKO M I, TRAVIS L D. Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D14): 16989-17013.
- [8] BROWN L G. A survey of image registration techniques[J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, **24**(4): 325-376.
- [9] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(11): 977-1000.
- [10] VURAL M F, YARDIMCI Y, TEMIZEI A. Registration of multispectral satellite images with orientation-restricted SIFT[C]. *Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Cape Town: IEEE, 2009, 3: III-243-III-246.
- [11] SEDAGHAT A, MOKHTARZADE M, EDADI H. Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, **49**(11): 4516-4527.
- [12] WANG Mi, YANG Bo, JIN Shu-ying. A registration method based on object-space positioning consistency for satellite multi-spectral image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, **38**(7): 765-769.
王密, 杨博, 金淑英. 一种利用物方定位一致性的多光谱卫星影像自动精确配准方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, **38**(7): 765-769.
- [13] PERSONS C M, CHENAULT D B, JONES M W, *et al.* Automated registration of polarimetric imagery using Fourier transform techniques[C]. *SPIE*, 2002, **4819**: 107-117.
- [14] WEN Yuan, BAI Mu-yan, YI Ling, *et al.* LEO high accuracy orbit extrapolation algorithm[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, **36**(S2): 14-17.
温渊, 白沐炎, 易灵, 等. 低轨卫星高精度轨道递推算法研究[J]. 上海航天, 2019, **36**(S2): 14-17.
- [15] MENG Wei-can, ZHU Shu-long, CAO Wen, *et al.* High accuracy on-orbit geometric calibration of linear push-broom cameras[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, **40**(10): 1392-1399.
孟伟灿, 朱述龙, 曹闻, 等. 线阵推扫式相机高精度在轨几何标定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, **40**(10): 1392-1399.
- [16] NIU Rui, ZHU Wen-shan, LI Li-liang, *et al.* Attitude and orbit control system design of GF-5 satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, **36**(S2): 61-66.
牛睿, 朱文山, 李利亮, 等. 高分五号卫星姿轨控分系统设计[J]. 上海航天, 2019, **36**(S2): 61-66.
- [17] HUANG Chan, MENG Bing-huan, CHANG Yu-yang, *et al.* Geometric calibration method based on two-dimensional turntable and rotation matrix for directional polarimetric camera[J]. *Applied Optics*, 2020, **59**(1): 226-233.
- [18] TAO Fei, HONG Jin, SONG Mao-xin, *et al.* Geometric calibration data processing and software design of directional polarization camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(9): 091005.
陶菲, 洪津, 宋茂新, 等. 偏振成像仪几何定标数据处理及软件设计[J]. 激光与电子学进展, 2017, **54**(9): 091005.
- [19] ZHANG Miao-miao. Research on stray light characteristics and correction of directional polarimetric camera[D]. Hefei: University of Science and Technology, 2019.
张苗苗. 多角度偏振成像仪杂散光特性与校正研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [20] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, **2**: 1150-1157.
- [21] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91-110.
- [22] LIU Jin-xia, QIU Yue-hong. Improved image registration based on SIFT features[C]. *2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer(MEC)*, 2011: 1047-1050.