

# 基于相对响应校正的多角度偏振成像仪几何定标精度提升方法

向光峰<sup>1,2,3\*\*</sup>, 孟炳寰<sup>1,3\*</sup>, 李双<sup>1,3</sup>, 韩琳<sup>1,3</sup>, 盛庭芮<sup>1,2,3</sup>, 孙亮<sup>1,3</sup>, 骆冬根<sup>1,3</sup>, 洪津<sup>1,3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 高精度的质心定位是基于单平行光管与分离式二维转台的几何定标方法的关键,但仪器的相对响应差异会影响质心定位精度。因此,提出了一种基于相对响应校正的质心定位精度提升方法,可有效地提升质心定位精度,进而提升几何定标精度。基于多角度偏振成像仪的实验室几何定标实验证明了所提方法的提升效果。提升效果在大视场区域中更为显著,最大几何定标精度约为 0.1 pixel。最终,基于所提质心定位精度提升方法在实验室中获得了高精度的多角度偏振成像仪几何模型参数,模型拟合残差优于 0.1 pixel。

**关键词** 几何光学; 几何定标; 多角度偏振成像仪; 相对辐射校正; 几何模型

中图分类号 TH744

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1208001

## Method for Improving Geometric Calibration Accuracy of Directional Polarimetric Camera Based on Relative Response Correction

Xiang Guangfeng<sup>1,2,3\*\*</sup>, Meng Binghuan<sup>1,3\*</sup>, Li Shuang<sup>1,3</sup>, Han Lin<sup>1,3</sup>, Sheng Tingrui<sup>1,2,3</sup>, Sun Liang<sup>1,3</sup>, Luo Donggen<sup>1,3</sup>, Hong Jin<sup>1,3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

**Abstract** High-precision centroid positioning is the key to the geometric calibration method based on a single collimator and a separated two-dimensional turntable. However, the relative response difference of the instrument will affect the centroid positioning accuracy. Therefore, a centroid positioning accuracy improvement method based on the relative response correction is proposed, which can effectively improve the centroid positioning accuracy, thereby improving the geometric calibration accuracy. The laboratory geometric calibration experiment based on the directional polarimetric camera proves the improvement effect of the proposed method. The improvement effect is more significant in the large field of view area, and the maximum geometric calibration accuracy is about 0.1 pixel. Finally, based on the proposed centroid positioning accuracy improvement method, the geometric model parameters of high-precision directional polarimetric camera are obtained in the laboratory, and the model fitting residual is better than 0.1 pixel.

**Key words** geometric optics; geometric calibration; directional polarimetric camera; relative radiometric correction; geometric model

收稿日期: 2021-11-26; 修回日期: 2021-12-20; 录用日期: 2021-12-28

基金项目: 王宽诚率先人才计划“卢嘉锡国际合作团队项目”(GJTD-2018-15)

通信作者: \*bhmeng@aiofm.ac.cn; \*\*xgf056@mail.ustc.edu.cn; \*\*\*hongjin@aiofm.ac.cn

## 1 引言

光学仪器通过几何定标来确定物像几何关系。对于星载光学遥感仪器,几何定标分为实验室几何定标和在轨几何定标两个阶段。高精度的实验室几何定标是在轨几何定标的基础<sup>[1-2]</sup>。多角度成像光谱辐射计(MISR)<sup>[3]</sup>、地球反射比的偏振化和指向性仪器(POLDER)<sup>[4]</sup>等在发射前均进行了高精度的实验室几何定标。

多角度偏振成像仪(DPC)是集多角度、多光谱和偏振探测能力于一体的星载大视场面阵成像仪器<sup>[5]</sup>。该类型仪器已经搭载高分五号 01 星和高分五号 02 星成功发射并获得了优质的遥感数据,后续还将搭载包含陆地生态系统碳监测卫星在内的多颗卫星,并将在大气气溶胶反演和气候变化监测等方面发挥重要作用<sup>[6-7]</sup>。高精度的地理定位和多角度多光谱偏振图像配准是保证反演产品质量的关键。因此,对 DPC 进行精密的实验室几何定标是仪器研制过程中的重要环节。Chen 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于单平行光管和分离式二维转台相结合的几何定标方法。该方法联合了入射光方向参数和像点坐标拟合几何模型参数。在此基础上,Huang 等<sup>[9]</sup>提出采用旋转矩阵和平移向量校正几何定标装置的装调误差,一定程度上提升了入射光束方向参数的精度。向光峰等<sup>[10]</sup>提出了一种质心-像点误差校正模型,可有效校正质心-像点近似误差。进一步分析 DPC 的辐射测量模型和几何定标方法发现,DPC 的相对响应差异会影响质心定位精度,进而影响实验室几何定标的精度。虽然,文献[11]中有提及 CCD 非均匀性对质心定位精度有影响,但并没有给出具体校正方法和定量分析结果,并且忽略了 DPC 这种大视场仪器光学系统照度均匀性差异对质心定位精度的影响。因此,为进一步提升 DPC 实验室几何定标精度,需要系统研究相对响应差异对质心定位精度的影响和校正方法。

首先,本文介绍了 DPC 的基本探测原理,并给出了 DPC 标量辐射测量模型和成像几何模型。然后,简要回顾了基于单平行光管和分离式二维转台的几何定标方法,并在此基础上提出了一种基于相对响应校正的质心定位精度提升方法。最后,通过 DPC 实验室几何定标数据验证了质心校正方法的效果,并利用校正后的质心数据拟合了高精度的 DPC 几何模型参数。本文的研究对象为陆地生态系统碳监测卫星搭载的 DPC。

## 2 基本原理

### 2.1 多角度偏振成像仪探测原理

陆地生态系统碳监测卫星搭载的 DPC 光学系统如图 1 所示,由超广角像方远心物镜、滤光/检偏转轮和面阵电荷耦合器件(CCD)探测器三部分构成<sup>[11-12]</sup>。得益于超广角像方远心物镜的设计,DPC 在沿轨方向和穿轨方向的视场分别为  $100^\circ$  和  $80^\circ$ ,在轨运行时可实现对目标的多角度观测(角度数优于 9)。滤光/检偏转轮可实现对 5 个非偏波段(443,565,763,765,910 nm,本文采用波段中心波长代指各波段)和 3 个偏振波段(490,670,865 nm)的偏振信息和光谱辐射信息的解析。有效 CCD 阵列大小为  $360 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。单像元尺寸为  $22.5 \mu\text{m} \times 22.5 \mu\text{m}$ 。当 DPC 运行的标称轨道高度为 505.984 km 时,星下点空间分辨率优于 2.5 km,幅宽大于 800 km。

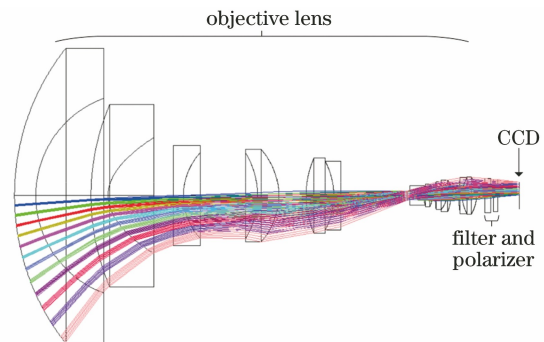


图 1 DPC 光学系统结构

Fig. 1 Optical system structure of DPC

仪器的偏振特性不属于本文的考虑范围,详细的偏振辐射测量模型可参考文献[13-14]。DPC 标量形式的辐射测量模型为

$$D_{l,p}^{(k)} = A^{(k)} R_{l,p}^{(k)} I_{l,p}^{(k)}, \quad (1)$$

式中: $D_{l,p}^{(k)}$  为当波段  $k$  的入射辐亮度为  $I_{l,p}^{(k)}$  时像元  $(l, p)$  的响应值; $A^{(k)}$  为整机绝对辐射定标系数,用于将归一化辐亮度转换为数字信号; $R_{l,p}^{(k)}$  为相对响应系数,表示各像元对同一入射光的相对响应差异,由光学系统的照度均匀性差异<sup>[15]</sup>和面阵 CCD 探测器像元间响应差异<sup>[16-17]</sup>共同组成。式(1)建立了各像元响应值与入射辐射量之间的关系。对于 DPC 这种大视场光学仪器,相对响应系数的定标是实验室定标的关键。在仪器实际应用中,将各像元的响应值  $D_{l,p}^{(k)}$  除以对应像元的相对响应系数  $R_{l,p}^{(k)}$  即可完成相对响应校正,可确保仪器各像元对同一入射光束具有相同的响应值。相对响应校正对定量遥感

具有重要的意义,也是 DPC 多角度多光谱偏振辐射数据有效性的关键。

DPC 的成像几何模型为

$$\begin{cases} x_k^{(M)} = x_k^{(S)} - L_k \cdot \cos \varphi \\ y_k^{(M)} = y_k^{(S)} - L_k \cdot \sin \varphi \\ L_k = f_k^{(1)} \cdot \tan \theta + f_k^{(3)} \cdot \tan^3 \theta + f_k^{(5)} \cdot \tan^5 \theta \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $(x_k^{(M)}, y_k^{(M)})$  为物点  $P$  所对应像点  $M$  的坐标;  $\theta$  和  $\varphi$  分别为视场角和方位角;  $S_k$  为  $k$  波段下的畸变中心,其坐标为  $(x_k^{(S)}, y_k^{(S)})$ ;  $L_k$  为像点到畸变中心的距离;  $f_k^{(1)}, f_k^{(3)}, f_k^{(5)}$  为  $k$  波段的畸变系数。式(2)建立了各像元与探测目标间的物像几何关系,其中各参数的物理意义如图 2 所示。

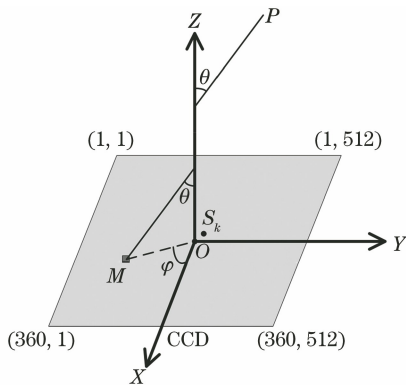


图 2 DPC 几何模型

Fig. 2 Geometric model of DPC

### 2.2 几何定标原理

DPC 实验室几何定标采用一种基于单平行光管与分离式二维转台相结合的方法<sup>[8]</sup>。该方法的基本原理是当 DPC 坐标系与分离式二维转台坐标系装调一致时,分离式二维转台与平行光管的组合可以提供任意已知视场角( $\theta$ )和方位角( $\varphi$ )的平行光束用于表征不同入射方向的被测目标。另外,为保证入射平行光束在 CCD 上的像点具有亚像元的定位精度,需要入射光束具有一定的发散角( $\alpha$ ),并将发散光束在 CCD 上光斑的质心近似看作平行光束的像点。质心的计算公式为

$$\begin{cases} x_{k,j}^c = \frac{\sum_{l=1}^{360} \sum_{p=1}^{512} D_{l,p}^{(k)} \cdot l}{\sum_{l=1}^{360} \sum_{p=1}^{512} D_{l,p}^{(k)}} \\ y_{k,j}^c = \frac{\sum_{l=1}^{360} \sum_{p=1}^{512} D_{l,p}^{(k)} \cdot p}{\sum_{l=1}^{360} \sum_{p=1}^{512} D_{l,p}^{(k)}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $(x_{k,j}^c, y_{k,j}^c)$  为平行光管指向为  $(\theta_j, \varphi_j)$  时的光斑质心坐标;  $j$  为不同的视场角和方位角组合。根据  $m$  组  $(x_{k,j}^c, y_{k,j}^c, \theta_j, \varphi_j)$  数据和式(2)所示的成像几何模型,即可采用最小二乘法拟合模型参数。评价函数  $F_0$  为

$$F_0 = \min \sum_{j=1}^m \{ \{ \hat{x}_{k,j} [x_k^{(S)}, y_k^{(S)}, f_k^{(1)}, f_k^{(3)}, f_k^{(5)}, \theta_j, \varphi_j] - x_{k,j}^c \}^2 + \{ \hat{y}_{k,j} [x_k^{(S)}, y_k^{(S)}, f_k^{(1)}, f_k^{(3)}, f_k^{(5)}, \theta_j, \varphi_j] - y_{k,j}^c \}^2 \}, \quad (4)$$

式中:  $(\hat{x}_{k,j}, \hat{y}_{k,j})$  表示平行光管指向为  $(\theta_j, \varphi_j)$  时估计几何模型计算的像点坐标。

### 3 误差分析与校正

基于单平行光管和分离式二维转台的实验室几何定标方法的误差主要来源于两个方面:1)平行光管指向误差,由分离式二维转台坐标系与仪器坐标系的装调匹配误差导致;2)像点坐标定位误差,包括采用光斑质心近似平行光束像点的误差和仪器相对响应差异所导致的质心定位误差。

由式(1)可知,不同像元对同一辐亮度  $I^{(k)}$  具有不同的  $D_{l,p}^{(k)}$ 。因此,直接采用式(3)计算质心坐标时不可避免地会产生一定的误差。为进一步分析由仪器相对响应差异导致的质心定位误差,假设区域  $Q$  被一辐亮度为  $I^{(k)}$  的辐射源均匀照明。当假设各像元响应无差异时,即  $R_{l,p}^{(k)} = 1$  时,将式(1)代入式(3)可得区域  $Q$  的质心坐标  $(x_{q_1}^c, y_{q_1}^c)$ ,即

$$\begin{cases} x_{q_1}^c = \frac{\sum_{l,p \in Q} l}{\sum_{l,p \in Q} 1} \\ y_{q_1}^c = \frac{\sum_{l,p \in Q} p}{\sum_{l,p \in Q} 1} \end{cases}. \quad (5)$$

然而,当考虑仪器的相对响应差异时,将式(1)代入式(3)可得区域  $Q$  的质心坐标  $(x_{q_2}^c, y_{q_2}^c)$  为

$$\begin{cases} x_{q_2}^c = \frac{\sum_{l,p \in Q} R_{l,p}^{(k)} \cdot l}{\sum_{l,p \in Q} R_{l,p}^{(k)}} \\ y_{q_2}^c = \frac{\sum_{l,p \in Q} R_{l,p}^{(k)} \cdot p}{\sum_{l,p \in Q} R_{l,p}^{(k)}} \end{cases}. \quad (6)$$

两质心坐标的差值  $(\Delta x_q^c, \Delta y_q^c)$  可表示为

$$\begin{cases} \Delta x_q^c = \frac{\sum_{l,p \in Q} l \cdot \sum_{l,p \in Q} R_{l,p}^{(k)} \cdot l}{\sum_{l,p \in Q} 1 \cdot \sum_{l,p \in Q} R_{l,p}^{(k)}} \\ \Delta y_q^c = \frac{\sum_{l,p \in Q} p \cdot \sum_{l,p \in Q} R_{l,p}^{(k)} \cdot p}{\sum_{l,p \in Q} 1 \cdot \sum_{l,p \in Q} R_{l,p}^{(k)}} \end{cases}, \quad (7)$$

该差值受到相对响应系数  $R_{l,p}^{(k)}$  和光斑区域的影响, 这表明在计算质心坐标时不考虑相对响应差异是不合理的, 并且会导致一定的质心定位误差。

因此, 本文提出了一种基于相对响应校正的质心定位精度提升方法。该方法的基本思路是将像面上各像元的响应值  $D_{l,p}^{(k)}$  除以对应的已经标定好的相对响应系数  $R_{l,p}^{(k)}$ , 进而达到校正各像元对同一入射光束的响应差异的目的。据此, 可以得到不受仪

器相对响应差异影响的具有更高精度的质心坐标。校正后的质心坐标  $(x_{k,j}^{cn}, y_{k,j}^{cn})$  的计算公式为

$$\begin{cases} x_{k,j}^{cn} = \frac{\sum_{l=1}^{360} \sum_{p=1}^{512} \frac{D_{l,p}^{(k)}}{R_{l,p}^{(k)}} \cdot l}{\sum_{l=1}^{360} \sum_{p=1}^{512} \frac{D_{l,p}^{(k)}}{R_{l,p}^{(k)}}} \\ y_{k,j}^{cn} = \frac{\sum_{l=1}^{360} \sum_{p=1}^{512} \frac{D_{l,p}^{(k)}}{R_{l,p}^{(k)}} \cdot p}{\sum_{l=1}^{360} \sum_{p=1}^{512} \frac{D_{l,p}^{(k)}}{R_{l,p}^{(k)}}} \end{cases}. \quad (8)$$

最后, 采用校正后的质心坐标拟合 DPC 几何模型参数将会有效提升几何定标精度。结合 Huang 等<sup>[9]</sup> 和向光峰等<sup>[10]</sup> 对定标装置装调误差和质心-像点近似误差的校正方法, 可将原评价函数  $F_0$  修正为  $F_N, F_N$  的表达式为

$$F_N = \min \sum_{j=1}^m \{ \{ \hat{x}_{k,j} [x_k^{(S)}, y_k^{(S)}, f_k^{(1)}, f_k^{(3)}, f_k^{(5)}, \theta_j, \varphi_j, \mathbf{R}, \mathbf{T}] - x_{k,j}^{cn} - \cos \varphi_j \cdot \Delta_{\theta_j} [f_k^{(1)}, f_k^{(3)}, f_k^{(5)}] \}^2 + \{ \hat{y}_{k,j} [x_k^{(S)}, y_k^{(S)}, f_k^{(1)}, f_k^{(3)}, f_k^{(5)}, \theta_j, \varphi_j, \mathbf{R}, \mathbf{T}] - y_{k,j}^{cn} - \sin \varphi_j \cdot \Delta_{\theta_j} [f_k^{(1)}, f_k^{(3)}, f_k^{(5)}] \}^2 \}, \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  为旋转矩阵和平移向量, 用于优化 DPC 坐标系与二维转台坐标系间的装调误差;  $\Delta_{\theta_j}$  为视场角为  $\theta_j$  时的质心-像点近似误差。

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 相对响应定标

由所提的基于相对响应校正的质心定位精度提升方法可知, 为提高质心计算的精度, 需要先在实验室标定仪器的相对响应系数。在实验室中, 基于高精度二维转台和积分球光源采用分视场定标的方法<sup>[13]</sup> 对 DPC 的相对响应系数进行定标测试。定标装置如图 3 所示。

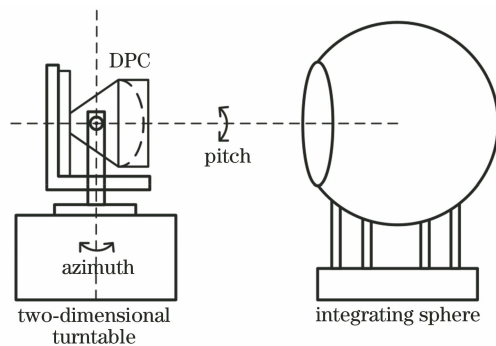


图 3 DPC 相对响应定标装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of DPC relative response calibration device

根据式(1)构建的辐射测量模型, 可得相对响应系数  $R_{l,p}^{(k)}$  的计算公式为

$$R_{l,p}^{(k)} = \frac{D_{l,p}^{(k)}}{\frac{1}{81} \sum_{l=180-4}^{180+4} \sum_{p=256-4}^{256+4} D_{l,p}^{(k)}}, \quad (10)$$

其中, 分母部分表示仪器绝对辐射定标区域的信号均值。

443 nm 波段的相对响应系数定标结果如图 4 所示。  $R_{l,p}^{443 \text{ nm}}$  的最大值、最小值和标准差分别为 1.06、0.88 和 0.02。在获得 DPC 各波段的相对响应系数后, 即可根据式(8)计算更高精度的光斑质心坐标, 进而提高几何定标精度。

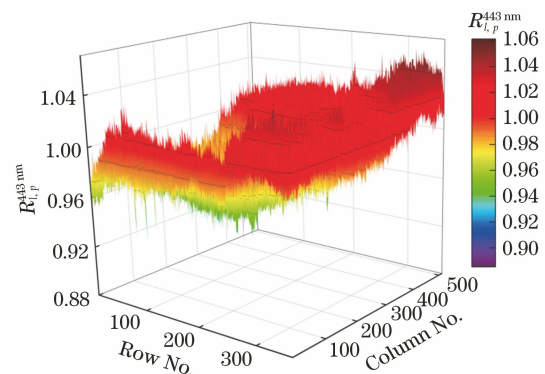


图 4 DPC 443 nm 波段相对响应系数结果

Fig. 4 Relative response coefficient results of 443 nm band of DPC



### 4.2 几何定标

DPC 实验室几何定标装置如图 5 所示,主要包括用于模拟入射光束的积分球与平行光管,控制平行光管入射方向的分离式二维转台,待定标的 DPC 和配套的数据采集设备等。分离式二维转台有立式和卧式两个转轴,分别用于控制入射光束的方位角和视场角。

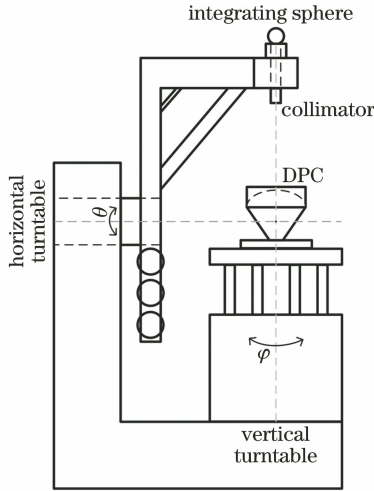


图 5 DPC 几何定标装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of DPC geometric calibration device

443 nm 波段的所有光斑在像面上呈米字形分布,如图 6 所示。每个波段共计有 102 个采样点。采用这种采样方式的原因:1)DPC 具有旋转对称性;2)DPC 的畸变主要为径向畸变;3)Zemax 畸变特性的分析结果表明,在小视场角区域内畸变特性变化较小,而在大视场角区域内畸变特性变化相对较大;4)综合考虑测试效率和充分表征仪器几何性能的需求。

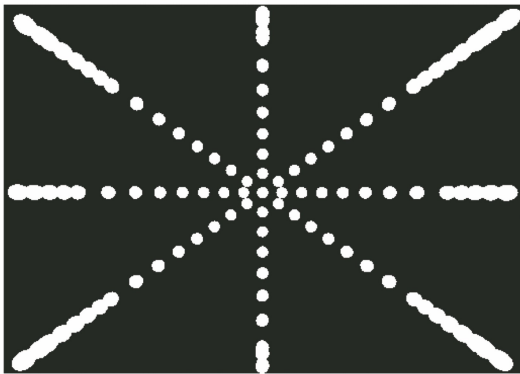


图 6 DPC 几何定标光斑分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of spot distribution obtained by DPC geometric calibration

采用式(3)和式(8)所示的质心计算方法分别获

取各光斑的质心坐标。为定量分析两种质心计算方法的偏差,采用两对应质心坐标的欧氏距离  $\Delta_E$  进行评估, $\Delta_E$  的表达式为

$$\Delta_E = \sqrt{(x^c - x^{cn})^2 + (y^c - y^{cn})^2} \quad (11)$$

质心计算偏差如图 7 所示。可以发现,各波段的  $\Delta_E$  值基本随着视场角的增加而变大。主要影响因素包括光斑大小和光斑区域内各像元的相对响应系数。所有波段的最大  $\Delta_E$  约为 0.1 pixel,即原质心计算方法将会导致几何定标结果存在最大约 0.1 pixel 的误差。

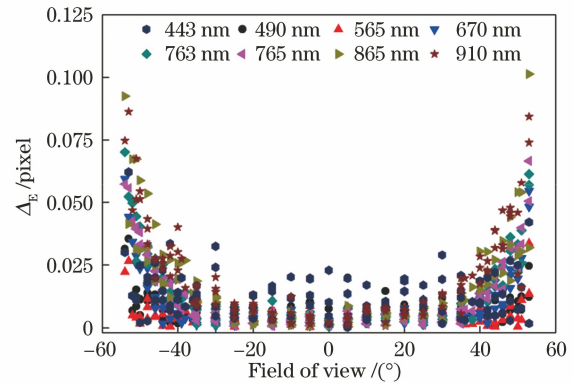


图 7 质心计算偏差

Fig. 7 Centroid calculation deviation

采用式(8)计算的质心坐标拟合 DPC 几何模型的参数如表 1 所示。畸变中心与 CCD 中心在 X 方向和 Y 方向的偏差均在 1 pixel 以内。根据  $f_k^{(1)}$  计算的各波段焦距与设计值的偏差均在 2% 以内。最大相对畸变结果表明,各波段相对畸变均在 -1%~1% 范围内,基本与设计结果一致。上述结果表明,实测几何参数与理论设计值的偏差很小。残余偏差可能是加工装调误差、测试环境与模拟分析环境差异等因素导致的。

几何模型的拟合残差结果如图 8 所示。所有波段的拟合残差均在 -0.1~0.1 pixel 范围内,平均拟合残差在 -0.001~0.001 pixel 范围内。443 nm 波段拟合残差的标准差最大,约等于 0.037 pixel。结果表明,利用所得 DPC 几何模型计算得到的结果与实测数据具有较高的一致性,即所得模型能够有效地表征 DPC 的物象几何关系。DPC 采用基于单平行光管与分离式二维转台的几何定标方法可以实现优于 0.1 pixel 的几何定标精度。几何模型与实测数据的残余误差可能是分离式二维转台指向误差、平行光管的非均匀性和几何模型与仪器实际畸变特性的差异等因素导致的。

表 1 DPC 几何定标结果

Table 1 Geometric calibration results of DPC

Band / nm	$x_k^{(S)}$ / pixel	$y_k^{(S)}$ / pixel	$f_k^{(1)}$ / pixel	$f_k^{(3)}$ / pixel	$f_k^{(5)}$ / pixel	Focal length / mm	Maximum relative distortion / %
443	180.86	255.79	217.85	1.33	-1.15	4.90	-0.56
490	180.83	255.83	217.42	1.84	-1.38	4.89	-0.48
565	180.77	255.83	217.09	2.43	-1.66	4.88	0.41
670	180.80	255.85	216.91	2.96	-1.92	4.88	0.53
763	180.75	256.82	216.84	3.31	-2.10	4.88	0.60
765	180.81	255.81	216.83	3.31	-2.10	4.88	0.60
865	180.81	255.83	216.76	3.59	-2.24	4.87	0.66
910	180.83	255.83	216.76	3.69	-2.30	4.87	0.68

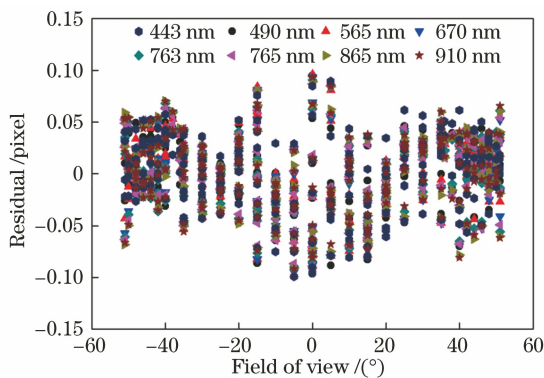


图 8 DPC 模型拟合残差

Fig. 8 Fitting residuals of DPC model

## 5 结 论

提出了一种基于相对响应校正的质心定位精度提升方法。该方法可有效提升质心定位精度,且大视场区域中提升效果更为显著,由 DPC 定标测试情况可知,最大可提升约 0.1 pixel。最终,基于所提方法实现了 DPC 的高精度实验室几何定标。DPC 几何模型与测试数据的拟合残差小于 0.1 pixel。实测 DPC 几何特性与 Zemax 模拟结果具有较好的一致性。高精度的 DPC 实验室几何定标结果将在仪器在轨图像配准、地理定位和数据反演等方面发挥极其重要的作用。然而,实验室几何定标环境与在轨运行环境的差异会导致 DPC 几何模型参数存在一定偏差。这种环境差异的校正方法将在后续文章中进行论述。此外,所提的基于仪器相对响应校正的质心定位精度提升方法可推广至其他对质心定位精度有较高需求的应用场景中。

## 参 考 文 献

[1] 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.

Xiang G F, Huang C, Meng B H, et al. In-flight image registration and performance evaluation for directional polarimetric camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(8): 0812001.

[2] Fournie B, Bracco G, Lafrance B, et al. PARASOL in-flight calibration and performance [J]. Applied Optics, 2007, 46(22): 5435-5451.

[3] Bruegge C J, Duval V G, Chrien N L, et al. MISR prelaunch instrument calibration and characterization results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1186-1198.

[4] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Preflight calibration of the POLDER instrument [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2553: 218-231.

[5] Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: instruments, methodologies, results, and perspectives[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 224: 474-511.

[6] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, et al. Directional Polarimetric Camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 218: 21-37.

[7] Shang H Z, Letu H, Chen L F, et al. Cloud thermodynamic phase detection using a directional polarimetric camera (DPC) [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 253: 107179.

[8] Chen L G, Zheng X B, Hong J, et al. A novel method for adjusting CCD camera in geometrical calibration based on a two-dimensional turntable[J]. Optik, 2010, 121(5): 486-489.

[9] Huang C, Chang Y Y, Han L, et al. Geometric calibration method based on Euler transformation for

- a large field of view polarimetric imager[J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(20): 1524-1533.
- [10] 向光峰, 孟炳寰, 黄禅, 等. 平行光管发散角对多角度偏振成像仪几何定标精度的影响及校正方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2408002.
- Xiang G F, Meng B H, Huang C, et al. Influence of collimator divergence angle on geometric calibration accuracy of directional polarimetric camera and its correction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2408002.
- [11] 黄禅. 多角度偏振成像仪实验室定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- Huang C. Research on laboratory calibration methods of the directional polarimetric camera [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [12] Yao P P, Tu B H, Xu S L, et al. Non-uniformity calibration method of space-borne area CCD for directional polarimetric camera [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3309-3326.
- [13] Huang C, Xiang G F, Chang Y Y, et al. Pre-flight calibration of a multi-angle polarimetric satellite sensor directional polarimetric camera [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13187-13215.
- [14] Huang C, Chang Y Y, Xiang G F, et al. Polarization measurement accuracy analysis and improvement methods for the directional polarimetric camera [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38638-38666.
- [15] Peng X, Kong L B. Design of a real-time fiber-optic infrared imaging system with wide-angle and large depth of field [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 011201.
- [16] 姚萍萍, 许孙龙, 涂碧海, 等. 多角度偏振成像仪面阵探测器筛选及测试方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1112002.
- Yao P P, Xu S L, Tu B H, et al. Screening and testing method of area detectors for directional polarimetric camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1112002.
- [17] 姚萍萍, 许孙龙, 涂碧海, 等. 星载面阵 CCD 性能测试系统设计及温度影响分析 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0910001.
- Yao P P, Xu S L, Tu B H, et al. Design of performance test system and analysis of temperature dependence for space-borne array CCD [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0910001.