

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.004

## 多角度偏振成像仪系统级偏振定标方法研究

康 晴<sup>1</sup>, 袁银麟<sup>1</sup>, 翁建文<sup>1,2</sup>, 丁 蕾<sup>1</sup>, 李健军<sup>1</sup>, 吴浩宇<sup>1</sup>, 洪 津<sup>1</sup>, 郑小兵<sup>1\*</sup>

( 1 中国科学院安徽光学精密机械研究所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;  
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026 )

**摘 要:** 系统级偏振定标是多角度偏振成像仪 (Directional polarization camera, DPC) 研制过程中的关键环节, 对于提高大气气溶胶和云相态等定量化探测应用具有重要意义。结合矩阵光学和辐射度学理论, 建立了多角度偏振成像仪偏振响应定标模型, 对关键影响参量进行定标。采用大口径积分球参考光源和分视场测量方法, 消除了光楔平板对 DPC 三检偏通道视场非一致性的影响, 实现了高频和低频相对透过率的高精度测量。采用傅里叶级数的分析方法, 建立全视场起偏度的测量模型, 消除参考光源偏振方位角绝对位置引入的测量误差, 实现光学系统偏振特性的准确测量。采用可调偏振度光源和大口径积分球辐射源, 开展了偏振定标精度的对比验证实验和精度分析。测试结果表明, 全视场偏振定标精度优于 0.5%, 自然光状态下的偏振定标精度优于 0.05%, 验证了宽视场偏振遥感器偏振辐射响应定标模型的合理性, 说明该系统级偏振定标方法可满足宽视场光学偏振遥感器的高精度偏振观测科学应用要求。

**关键词:** 偏振遥感; 偏振遥感器; 偏振定标; 定标精度

中图分类号: O436; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)01-0036-013

## System-Level Polarized Calibration Methods in Laboratory of Directional Polarization Camera

KANG Qing<sup>1</sup>, YUAN Yinlin<sup>1</sup>, WENG Jianwen<sup>1,2</sup>, DING Lei<sup>1</sup>, LI Jianjun<sup>1</sup>, WU Haoyu<sup>1</sup>,  
HONG Jin<sup>1</sup>, ZHENG Xiaobing<sup>1\*</sup>

( 1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, 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)

**Abstract:** System-level polarized calibration is an important link in the development of directional polarization camera(DPC), which is of great significance for improving quantitative detection applications such as atmospheric aerosols and cloud phases. The polarization response calibration model is established combining with matrix optics and radiation theories, and key impact parameters are calibrated. An integrating sphere reference light source with large

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41605021), Natural Science Foundation of Anhui Province of China(安徽省自然科学基金, 1708085QF131)

**作者简介:** 康 晴 (1988 -), 女, 汉族, 安徽蒙城人, 博士, 助理研究员, 主要从事光学遥感器偏振定标方法方面的研究。

**E-mail:** qkang@aiofm.ac.cn

**导师简介:** 郑小兵 (1969 -), 男, 汉族, 研究员, 主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学遥感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。 **E-mail:** xbzhen@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2018-10-08; **修改日期:** 2018-12-16

aperture and sectional viewing field measurement is used to eliminate the influence of the optical wedge plate on the non-consistency of the field view of DPC three partial channel, and high precision measurements of the high and low frequency relative transmittances are achieved. By using the Fourier series analysis method, the measurement model of the polarization degree of full view is established, and the measurement error introduced by the polarization azimuth absolute position of the reference light source is eliminated, which guarantees the precise measurement of polarization degree. The variable polarization light source and integrating sphere radiation source with large aperture are used for the comparison and precision analysis, the DPC full view polarization calibration uncertainty is better than 0.5%, and the DPC measured polarization degree uncertainty under natural light is better than 0.05%, which confirms the precision and reasonability of polarization remote sensor with wide field of view polarization radiation response calibration model. This system-level polarized calibration method can meet the requirements of high-precision polarization observation scientific application of wide field optical polarization remote sensor.

Key words: polarization sensing; polarization remote sensor; polarization calibration; calibration accuracy

## 1 引 言

偏振遥感探测作为新型的探测手段, 在气溶胶监测方面有着独特优势, 尤其是在云和大气气溶胶探测上的应用<sup>[1-3]</sup>。偏振遥感探测能力的高低主要取决于遥感器的设计理论和研制水平, 而偏振遥感器的性能很大程度上则受限于仪器定标水平。偏振遥感器实验室系统级偏振定标方法的目的是, 建立和完善偏振响应与目标辐射量值之间的定标模型, 分析不确定度因素的产生机理, 研究定标模型参量的测量、评估、校正和验证方法, 并提供高精度的定标数据, 从而为定量遥感及应用提供技术平台与数据支持, 对于实现预期的偏振探测精度, 提高云相态、大气校正和大气气溶胶等应用定量化水平具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。

多角度偏振成像仪 (Directional polarization camera, DPC) 是由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的多角度宽视场偏振遥感器<sup>[7]</sup>, 主要任务是从空间收集地球大气系统的偏振信息观测结果, 从而实现了对云与大气气溶胶等的环境监测。DPC 偏振定标精度依赖于偏振定标模型中关键参量的高精度测量<sup>[8-9]</sup>, 关键参量主要有高频和低频相对透过率, 以及偏振特性参数等。偏振特性响应参数是 DPC 三个检偏方向的光学系统起偏度、偏振方位角和偏振解析的函数, 测量的关键在于光学系统起偏度的测量。法国 POLDER 采用子午面和弧矢面响应差异的测量方法测量起偏度, 该方法要考虑参考光源偏振方位角的绝对位置引入的测量误差, 影响起偏度的准确测量。由于 DPC 采用分时偏振探测的方法, 为保证用同一像元进行测量, 连续三检偏通道采用光楔平板进行运动补偿。但实际上 DPC 进行实验室定标时, DPC 和偏振定标光源均处于静止状态, 与 DPC 在轨实际运行状态不一致, 导致偏振定标光源在三个偏振方向上探测器的成像像素位置不完全一致, 即光楔平板会对 DPC 三检偏通道视场非一致性产生影响, 影响低频和高频相对透过率的测量精度。

本文根据矩阵光学理论和辐射度学理论, 建立 DPC 偏振辐射响应定标模型。对 DPC 模型参量进行定标时, 通过大口径积分球辐射源进行相对透过率测试; 采用大口径积分球参考光源和分视场测量方法, 对高频和低频相对透过率进行测量, 消除光楔平板对 DPC 的三检偏通道视场非一致性的影响; 采用傅里叶级数的分析方法, 建立了全视场起偏度的测量模型, 消除了参考光源偏振方位角绝对位置引入的测量误差, 保证了起偏度的准确测量。最后, 采用可调偏振度光源和大口径积分球辐射源开展比对验证实验和精度分析, 验证宽视场偏振遥感器偏振辐射响应定标模型的合理性。

## 2 偏振测量原理

DPC 光学系统主要由三部分构成：超广角像方远心成像光学镜头、滤光片 / 偏振片组合转轮和面阵 CCD 探测器。光学镜头实现沿轨和穿轨方向约  $100^\circ$  宽视场的观测。组合转轮和面阵 CCD 探测器构成偏振解析光路，工作时通过旋转的方式依次获取  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$  三个不同偏振方向的强度探测图像。DPC 光学系统结构如图 1 所示。

超广角像方远心成像光学镜头在偏振解析光路之前，由多达 20 片光学透镜组成，具有一定的偏振敏感特性。大视场光学镜头的偏振敏感特性分析理论<sup>[9]</sup>和实验研究均表明<sup>[10-11]</sup>，其最大透过轴方向在子午面。图 2 所示为各视场子午面投影与检偏器组成的平面，即最大透过轴方向所在位置。

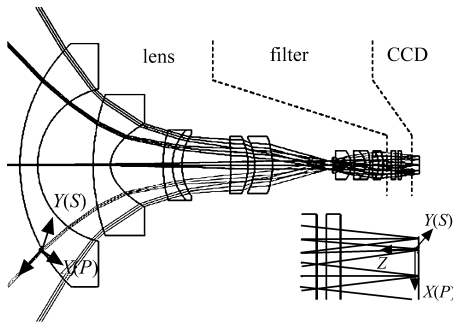


图 1 DPC 光学系统结构

Fig.1 Structure of the optical system of DPC

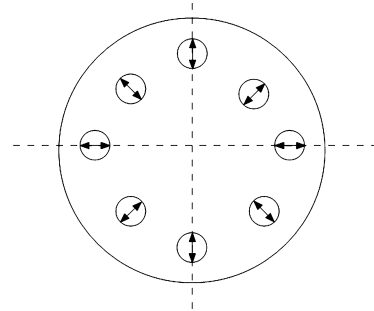


图 2 DPC 光学镜头最大透过轴方向

Fig.2 Maximum transmission axis direction of optical lens of DPC

以最大和最小透过轴方向作为参考坐标系，通过起偏度  $\varepsilon_\theta(\lambda)$  构成的 Mueller 矩阵  $\mathbf{M}_\theta(\lambda)$  对光学镜头视场角为  $\theta$  处的偏振敏感特性进行校正。当目标 Stokes 矢量  $\mathbf{S}_i^k = [I_i^k, Q_i^k, U_i^k]^T$  经过宽视场偏振有效载荷光学镜头后，达到偏振解析光路前的 Stokes 矢量为  $\mathbf{S}_o^k = [I_o^k, Q_o^k, U_o^k]^T$ ，即

$$\begin{bmatrix} I_o^k \\ Q_o^k \\ U_o^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_\theta(k) & 0 \\ \varepsilon_\theta(k) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & J_{\varepsilon_\theta}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i^k \\ Q_i^k \\ U_i^k \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$J_{\varepsilon_\theta}(k) = 2 \frac{\sqrt{[1 - \varepsilon_\theta(k)]/[1 + \varepsilon_\theta(k)]}}{1 + [1 - \varepsilon_\theta(k)]/[1 + \varepsilon_\theta(k)]}, \quad (2)$$

式中  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  分别为辐射强度、水平 / 垂直方向偏振、 $+45^\circ/-45^\circ$  方向偏振， $k$  为宽视场偏振有效载荷偏振波段号， $\varepsilon_\theta(k)$  为光学镜头视场角为  $\theta$  处的起偏度。

根据偏振辐射理论<sup>[12]</sup>，偏振解析光路前与光学镜头前的光强关系为

$$I_o^k = I_i^k [1 + \varepsilon_\theta(k) \cos 2\chi], \quad (3)$$

式中  $\chi$  为目标 Stokes 参量的振动方向与光学最大透过轴方向的夹角，即为目标的偏振角。从式 (3) 中可以看出，宽视场偏振遥感光学系统的偏振光效应对目标偏振态产生了明显的改变，与自身的起偏度和目标的偏振度、偏振方位角密切相关。对于偏振光效应的校正，起偏度  $\varepsilon_\theta(k)$  的高精度测量至关重要。

偏振解析光路前的 Stokes 矢量为  $\mathbf{S}_o^k = [I_o^k, Q_o^k, U_o^k]^T$ ，可通过式 (3) 反演获取，需要重点解决三检偏通道响应差异影响。三检偏通道响应差异主要包括光学镜头的空间低频差异，CCD 像面响应非均匀性以及光学系统灰点污染等引起的空间高频差异。

$$\begin{bmatrix} I_o^k \\ Q_o^k \\ U_o^k \end{bmatrix} = \frac{1}{A^k P^k(l, p)} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,1}) & \sin 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,1}) \\ 1 & \cos 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,2}) & \sin 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,2}) \\ 1 & \cos 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,3}) & \sin 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,3}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (D_{Ni,p}^{k,1} - D_{Cl,p}^k)/(T^{k,1} g_{l,p}^{k,1}) \\ (D_{Ni,p}^{k,2} - D_{Cl,p}^k)/(T^{k,2} g_{l,p}^{k,2}) \\ (D_{Ni,p}^{k,3} - D_{Cl,p}^k)/(T^{k,3} g_{l,p}^{k,3}) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $A^k$  为  $k$  波段不同偏振通道的绝对响应度;  $P^k(l, p)$  为  $k$  波段对应像元位置的低频相对透过率;  $D_{Ni,p}^{k,a}$  为  $k$  波段对应像元位置各偏振通道经过数据预处理后的响应;  $D_{Cl,p}^k$  为  $k$  波段对应像元位置的本底响应;  $T^{k,a}$  为  $k$  波段不同偏振通道的相对透过率;  $g_{l,p}^{k,a}$  为  $k$  波段对应像元位置的高频相对透过率;  $\varphi_{l,p}$  为对应像元位置的方位角;  $l$ 、 $p$  分别为像元的行和列序号;  $\alpha^{k,a}$  为  $k$  波段 3 个检偏方向的实测角度 ( $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$ )。

根据式 (1) 和式 (3), 可以得到系统 Mueller, 即为宽视场偏振有效载荷的偏振定标模型, 具体推算结果不再累述 [13-15]

$$M_{l,p}^k = A^k P^k(l, p) \begin{bmatrix} T^{k,1} g_{l,p}^{k,1} P_1^{k,1}(l, p) & T^{k,1} g_{l,p}^{k,1} P_2^{k,1}(l, p) & T^{k,1} g_{l,p}^{k,1} P_3^{k,1}(l, p) \\ T^{k,2} g_{l,p}^{k,2} P_1^{k,2}(l, p) & T^{k,2} g_{l,p}^{k,2} P_2^{k,2}(l, p) & T^{k,2} g_{l,p}^{k,2} P_3^{k,2}(l, p) \\ T^{k,3} g_{l,p}^{k,3} P_1^{k,3}(l, p) & T^{k,3} g_{l,p}^{k,3} P_2^{k,3}(l, p) & T^{k,3} g_{l,p}^{k,3} P_3^{k,3}(l, p) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $P_1^{k,a}(l, p)$ ,  $P_2^{k,a}(l, p)$  和  $P_3^{k,a}(l, p)$  为仪器的偏振特性响应参数, 它们分别是仪器 3 个检偏方向的实测角度  $\alpha^{k,a}$  和光学系统起偏度  $\varepsilon^k(\theta)$  的函数。

### 3 偏振参数的定标方法

由式 (4)、(5) 可知, 影响偏振通道定标模型需要定标的主要偏振参数有  $k$  波段对应像元位置的低频相对透过率  $P^k(l, p)$ , 不同偏振通道的相对透过率  $T^{k,a}$  ( $a = 1, 2, 3$ ),  $k$  波段对应像元位置的高频相对透过率  $g_{l,p}^{k,a}$ , 以及偏振特性响应参数。偏振特性响应参数包括对应像元位置的方位角  $\varphi_{l,p}$ ,  $\alpha^{k,a}$  为  $k$  波段 3 个检偏方向的实测角度 ( $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$ ), 光学镜头视场角为  $\theta$  处的起偏度  $\varepsilon_\theta(\lambda)$ 。

#### 3.1 相对透过率

相对透过率  $T^{k,a}$  为 DPC 三检偏通道响应的相对比值, 以通道 P2 为作为参考。通过大口径积分球辐射源 IS2500-1000 进行测量, 如图 3 所示。

相对透过率数据处理方法为

$$T^{k,a} = \frac{\sum_{l=l_0-1}^{l_0+1} \sum_{p=p_0-1}^{p_0+1} (D_{Ni,p}^{k,a} - D_{Cl,p}^k)}{\sum_{l=l_0-1}^{l_0+1} \sum_{p=p_0-1}^{p_0+1} (D_{Ni,p}^{k,2} - D_{Cl,p}^k)}, \quad (6)$$

式中  $D_{Ni,p}^{k,a}$ 、 $D_{Cl,p}^k$  分别为偏振通道的响应值和本底值,  $l_0$ 、 $p_0$  分别为中心视场像元的行和列序号。相对透过率测试结果如表 1 所示。

表 1 相对透过率测试结果

Table 1 Test results of relative transmittance

波段 (nm)	Relative transmittance		
	P0	P1	P2
490	1.000	1.001	1.000
670	1.000	1.001	1.035
865	1.000	1.008	1.005

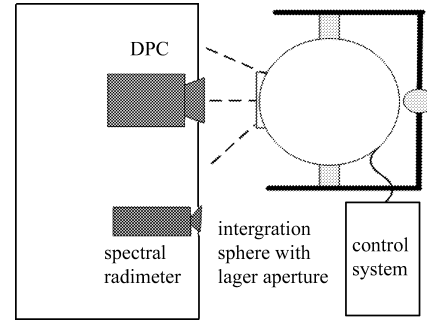


图 3 相对透过率定标示意图

Fig.3 Calibration schematic diagram of relative transmittance

由表 1 可知, 相对透过率的测量精度约  $\pm 0.2\%$ , 与法国地球反射偏振仪 (Polarization and directionality of the earth reflectance, POLDER) 定标水平相当, 对偏振定标精度影响可忽略不计。

### 3.2 低频相对透过率

低频相对透过率是指自然光经过光学镜头后, 偏振解析光路前, 进入各视场的光强相对变化。对于 DPC, 其三检偏通道的偏振方位角度间隔为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$ 。利用三角函数的正交性, 通过三检偏通道响应的加权均值计算光强<sup>[16]</sup>。取被测视场  $3 \times 3$  像元区域的三检偏通道响应值和中心视场  $3 \times 3$  像元区域的响应值, 计算光强相对变化, 即获取空间低频相对透过率

$$P^k(l, p) = \frac{\sum_{l=l_0-1}^{l_0+1} \sum_{p=p_0-1}^{p_0+1} \text{mean}(X_{l,p}^{k,1} + X_{l,p}^{k,2} + X_{l,p}^{k,3})}{3 \sum_{l=l_0-1}^{l_0+1} \sum_{p=p_0-1}^{p_0+1} \text{mean}(X_{l,p}^{k,2})}, \quad (7)$$

式中  $P^k(l, p)$  为  $k$  波段的空间低频相对透过率,  $l_0$ 、 $p_0$  分别为待校正视场像元的行、列序号,  $X_{l,p}^{k,a}$  为  $k$  波段经过数据预处理后的响应

$$X_{l,p}^{k,a} = (D_{Nl,p}^{k,a} - D_{Cl,p}^k) / T^{k,a}. \quad (8)$$

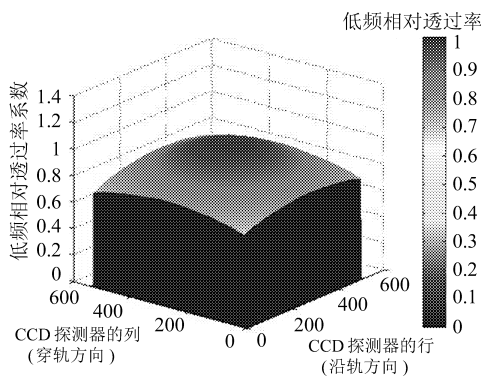


图 4 865 nm 波段低频相对透过率测量结果

Fig.4 Test results of low frequency part of the transmission variation of DPC 865 nm polarized channel

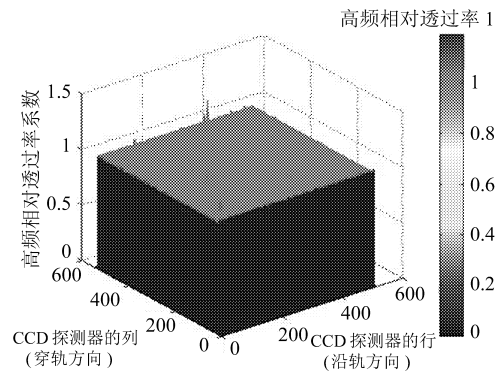


图 5 865 nm P1 通道高频相对透过率

Fig.5 High frequency part of the transmission variation of DPC 865 nm P1 polarized channel

图 4 为 DPC 865 nm 偏振波段空间低频相对透过率测量结果, 在相同入射辐亮度条件下边缘视场的响应明显小于中心视场的响应值, 与法国 POLDER 的测量曲线形状保持一致。

### 3.3 高频相对透过率

高频相对透过率为 DPC 三个偏振通道各像元响应与其对应视场响应的相对比值。采用大口径积分球参考光源和分视场测量方法, 取参考偏振通道被测像元的响应值和被测视场  $3 \times 3$  像元区域的响应值, 计算低频相对透过率

$$g^{k,a}(l,p) = \frac{3X_{l,p}^{k,a}}{\sum_{l=l_\theta+1}^{l_\theta+1+p_\varphi+1} \sum_{p=p_\varphi}^{p_\varphi+1} \text{mean}(X_{l,p}^{k,1} + X_{l,p}^{k,2} + X_{l,p}^{k,3})} \quad (9)$$

图 5 为 DPC 高频相对透过率测试结果, 高频相对透过率数值在 1 附近变化。图中突起和下降由 DPC 探测器像元响应差异导致。

### 3.4 偏振特性参数

偏振特性响应参数是仪器三个检偏方向的光学系统起偏度  $\varepsilon^k(\theta)$ 、偏振方位  $\alpha^{k,a}$  和偏振解析  $\varphi$  的函数, 即

$$\begin{cases} P_1^{k,a}(l,p) = 1 + \eta^k \varepsilon_{l,p}^k \cos 2(\varphi - \alpha^{k,a}) \\ P_2^{k,a}(l,p) = \eta^k \cos 2(\varphi - \alpha^{k,a}) + \varepsilon_{l,p}^k \\ P_3^{k,a}(l,p) = \eta^k \sin 2(\varphi - \alpha^{k,a}) \end{cases} \quad (10)$$

#### 3.4.1 起偏度

通过积分球参考光源和可旋转的偏振片组合装置, 开展偏振光效应的实验研究, 设计了一种高精度起偏度  $\varepsilon_\theta(\lambda)$  测量方法, 具体如下: 调节组合装置实现强度不变偏振度为  $P$  的近似完全线偏振光输出, 间隔  $30^\circ$  改变其偏振方位角, 沿穿轨和沿轨的对角线方向测量 DPC18 个视场的偏振响应变化。

像元  $(l,p)$  位置起偏度  $\varepsilon_{l,p}^k$  仅与视场角有关, 通过线性插值方法得到  $\varepsilon_{l,p}^k$  与  $\varepsilon_\theta^k$  之间关系。 $(l,p)$  位置的视场角  $\theta$  之间的关系通过几何定标实现。通过固定单个平行光管, 用精密二维转动机构带动 DPC 二维旋转测量, 测量方法见图 6。根据光斑中心位置的实测值和理论值, 对比运算获取 DPC 波段  $k$  的内方位定标元素, 即畸变中心  $X_k$  和  $Y_k$ , 畸变律的系数  $f1_k$ 、 $f3_k$  和  $f5_k$ 。通过内方位定标元素, 插值运算像元坐标  $(l,p)$  与  $(\theta, \varphi)$  的定量化关系。

通过傅里叶算法<sup>[17]</sup> 计算视场  $\theta$  位置起偏度

$$\varepsilon_\theta^k = \frac{2}{P} \frac{\sum_{n=0}^N (D_{N\theta}^k - D_{C\theta}^k) \cos 2 \frac{n\pi}{N}}{\sum_{n=0}^N (D_{N\theta}^k - D_{C\theta}^k)} \quad (11)$$

式中  $\varepsilon_\theta^k$  为  $k$  波段视场  $\theta$  位置起偏度,  $D_{N\theta}^k$  为  $k$  波段视场  $\theta$  位置的响应值,  $D_{C\theta}^k$  为  $k$  波段视场  $\theta$  位置的

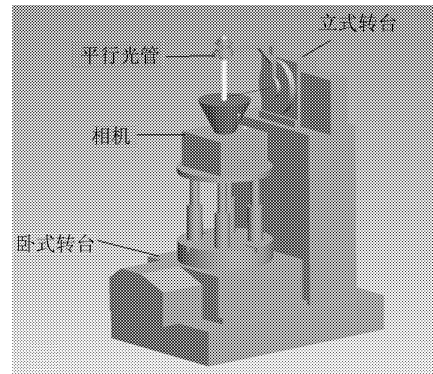


图 6 像元位置与视场角的关系测量示意图

Fig.6 Measurement sketch map of the relationship between pixel position and field of view

本底值。与法国 POLDER 子午面和弧矢面响应差异<sup>[18]</sup>的测量方法相比,不需要考虑参考光源偏振方位角的绝对位置,消除了参考光源偏振方位角绝对位置引入的测量误差,因而具有更高的精度。

根据 18 个视场的起偏度实测值,多角度偏振探测仪的起偏度根据实测数据,利用 7 次多项式拟合得到

$$\varepsilon_{\theta}^k = A + \sum_{n=1}^7 B_n \theta^n, \quad (12)$$

实现所有视场的起偏度拟合。490, 670, 865 nm 波段起偏度可表示为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta}^{490 \text{ nm}} = & 4.38269E^{-4} + 9.07637E^{-4} \cdot \theta - 2.10659E^{-4} \cdot \theta^2 + 2.10126E^{-5} \cdot \theta^3 - \\ & 9.65399E^{-7} \cdot \theta^4 + 2.28428E^{-8} \cdot \theta^5 - 2.67964E^{-10} \cdot \theta^6 + 1.24609E^{-12} \cdot \theta^7, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta}^{670 \text{ nm}} = & 0.00117 - 3.68456E^{-4} \cdot \theta + 1.00408E^{-4} \cdot \theta^2 - 9.70085E^{-6} \cdot \theta^3 + \\ & 5.13697E^{-7} \cdot \theta^4 - 1.41407E^{-8} \cdot \theta^5 + 1.90064E^{-10} \cdot \theta^6 - 9.61865E^{-13} \cdot \theta^7, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta}^{865 \text{ nm}} = & 0.00243 + 7.18288E^{-4} \cdot \theta - 2.77019E^{-4} \cdot \theta^2 + 2.97145E^{-5} \cdot \theta^3 - \\ & 1.44249E^{-6} \cdot \theta^4 + 3.64527E^{-8} \cdot \theta^5 - 4.57141E^{-10} \cdot \theta^6 + 2.27087E^{-12} \cdot \theta^7, \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $\theta$  为像元坐标对应的视场角。全视场起偏度多项式拟合曲线和实测曲线分别如图 7、8 所示。

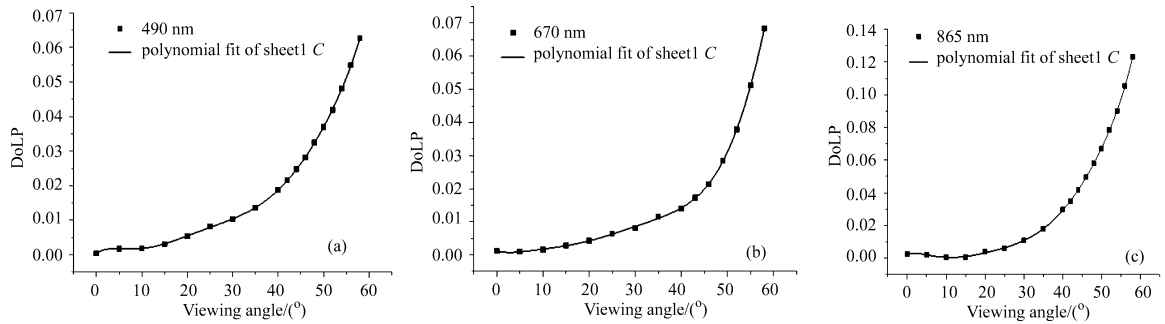


图 7 490 nm(a)、670 nm(b) 和 865 nm(c) 波段的起偏度多项式拟合曲线

Fig.7 Polynomial fitting curve of polarization rate of DPC 490 nm(a), 670 nm(b), 865 nm(c) polarized channel

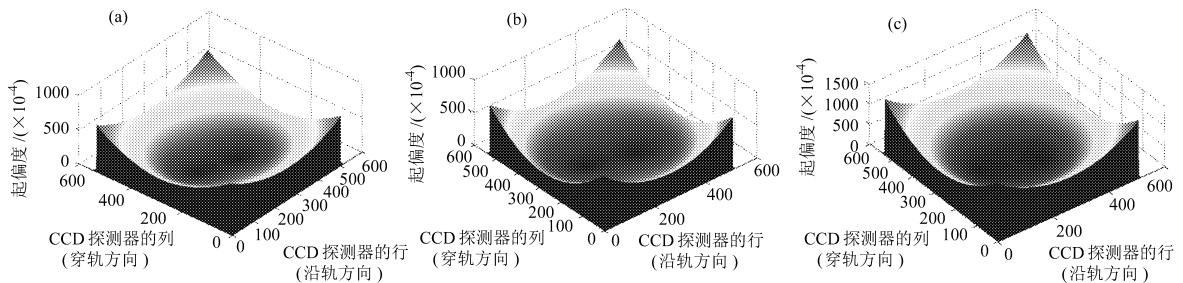


图 8 490 nm(a)、670 nm(b) 和 865 nm(c) 波段的起偏度实测曲线图

Fig.8 Measured graph of polarization rate of DPC 490 nm(a), 670 nm(b), 865 nm(c) polarized channel

由图 8 可知, DPC 偏振波段的起偏度随着视场角的增加呈增长趋势,符合菲涅尔定律和前期实验研究结果<sup>[10-11,13,15]</sup>,在视场角  $48^\circ$  时,起偏度最大,490, 670, 870 nm 的起偏度值分别为 0.063、0.068 和

0.123。DPC 的宽视场具有对称性, 通过分析比对十字交叉 4 个径向 14 个视场起偏度的偏差均值评估起偏度的测量精度为 0.36%。

### 3.4.2 绝对偏振方位角

绝对偏振方位角指检偏通道透光轴方向和棱镜坐标系轴的夹角, 通过测量参考偏振光的透过轴方向来确定。根据菲涅尔定律, 可调偏振度光源的透过轴方向平行于入射面。入射面为入射光线和可调偏振度光源平板玻璃的法线所成的平面。定义入射面与棱镜坐标系  $y$  坐标轴平行时, 偏振方位角为  $0^\circ$ 。通过对可调偏振度光源内部平板玻璃的绝对位置的检测和调整, 可精确获取可调偏振度光源的透过轴方向与棱镜坐标系  $\theta$  坐标轴的夹角。目前可调偏振度光源内部平板玻璃在棱镜坐标系中的安装角度精度和重复定位精度均小于  $10''$ , 检测精度小于  $5''$ 。

绝对偏振方位角的数据处理方式

$$\alpha^{k,a} = \arctan\left(\frac{\text{mean} \sum_{n=0}^N X_{l,p}^k \cos 2\frac{n\pi}{N}}{\sum_{n=0}^N X_{l,p}^k \sin 2\frac{n\pi}{N}}\right), \quad (16)$$

相关结果如表 2 所示。由表 2 可知, DPC 490, 670, 865 nm 的绝对偏振方位角均为  $-2.3^\circ$ 。

### 3.4.3 偏振解析

DPC 检测目标偏振辐射的三个方向, 以其中的一个方向作为  $0^\circ$  检偏方向。偏振解析方向测试示意图如图 9 所示。

表 2 绝对偏振方位角检测结果

Table 2 Test results of absolute polarization

azimuth	
波段 (nm)	$\alpha^{k,a} (^\circ)$
490	-2.3
670	-2.3
870	-2.3

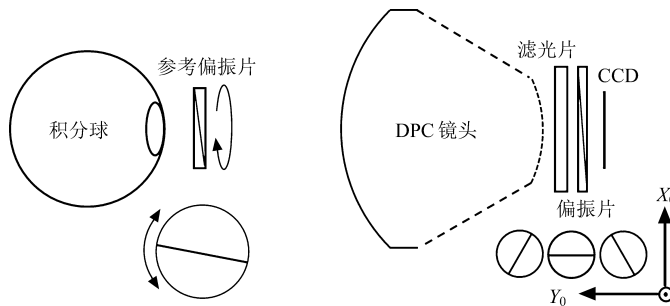


图 9 偏振解析方向定标示意图

Fig.9 Calibration schematic diagram of polarization analysis direction

将参考偏振片安装在一维精密旋转台上, 目标光斑成像在 DPC 中心视场; DPC 采集参数设置为陆地模式, 调节积分球电源使得 DPC 偏振通道响应在不饱和的合适状态; 一维精密旋转台带动参考偏振片在  $0\sim 180^\circ$  方位角范围内、以  $15^\circ$  间隔改变偏振方位角, 每种偏振方位角状态下, DPC 采集 10 组数据; 通过马吕斯拟合模型公式获取 DPC 每个偏振通道下的拟合初始方位角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$ ; 对各个偏振波段三个检偏方向的初始方位角进行相对差异计算, 将 P1 通道定为参考  $\theta_1$ ,  $\theta_2 - \theta_1$  值为 P2 通道相对解析方向,  $\theta_3 - \theta_1$  值为 P3 通道相对解析方向, 从而获得三检偏的相对偏振解析方向。

DPC 偏振解析通过旋转参考偏振片的测试方法获得, 相对偏振解析方向用马吕斯拟合模型计算, 即



$$y_k = y_{0,k} + A_k \sin^2(x - x_{c,k}), \tag{17}$$

式中  $y_k$  为  $k$  波段对应角度的成像响应 DN 值,  $y_{0,k}$  为  $k$  波段对应角度的成像响应本底 DN 值,  $A_k$  为绝对辐射定标系数,  $x$  为参考偏振片转台角度,  $x_{kc}$  为参考偏振片转台角度初始位置。偏振解析方向测试结果拟合曲线如图 10 所示, 测量结果如表 3 所示。

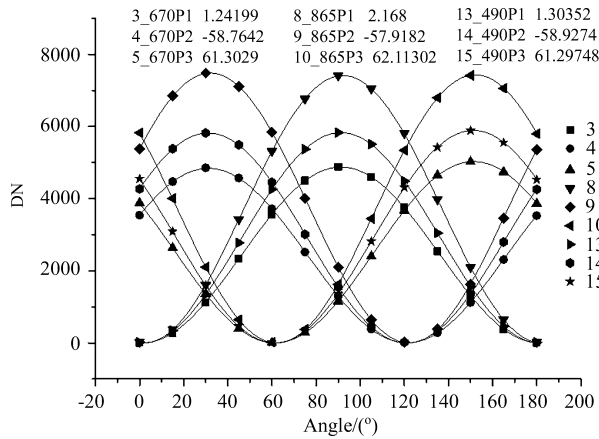


图 10 相对偏振解析方向测试结果

Fig.10 Test result of relative polarization analysis direction

表 3 偏振解析方向测试结果

Table 3 Test results of polarization analysis direction

波段 (nm)	通道	测量值 (°)
490	P1	0.00
	P2	60.23
	P3	120.01
670	P1	0.00
	P2	60.01
	P3	119.94
865	P1	0.00
	P2	60.09
	P3	120.06

## 4 偏振定标比对验证实验和精度分析

为了验证 DPC 偏振响应定标模型的合理性, 采用可调偏振度光源和大口径积分球辐射源开展比对验证实验, 并进行精度分析。

### 4.1 可调偏振度光源验证偏振定标精度

以 DPC 670 nm 为例分析偏振测量精度的验证过程, 偏振测试精度方法如图 11 所示。调节可调偏振度光源扩束准直光源; 调整大型二维电控旋转台角度, 根据扩束准直光源响应寻找 DPC 中心视场对应的像元位置, 像元位置坐标为沿轨 256、穿轨 272; 关闭可调偏振度光源扩束准直光源; 将光谱可调积分球参考光源切入到偏振测量光路中, 即调整积分球参考光源出光口对准可调偏振度光源偏振盒体入光口; DPC 开机, 设置观测模式为陆地模式; 打开积分球参考光源, 调节光谱辐亮度输出, 保证 DPC 响应值在工作

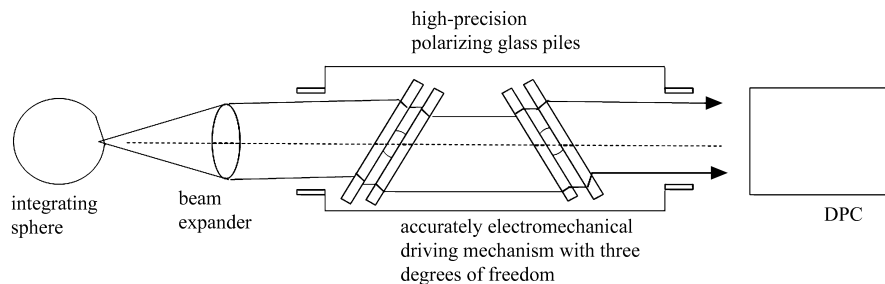


图 11 偏振定标精度测量示意图

Fig.11 Measurement schematic diagram of polarimetric calibration accuracy

范围之内, 并预热至稳定工作状态; 调节可调偏振度光源偏振盒内部玻片堆的旋转角度为  $26.32^\circ$ , 输出 670 nm 波段偏振度为 10% 的部分偏振光; DPC 对偏振度为 10% 的自然光状态, 分别进行中心视场, 沿轨方向 30%、60% 和 90% 最大视场的测试, 即进行沿轨方向  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $45^\circ$  视场的测量; 分别调节可调偏振度光源偏振盒内部玻片堆的旋转角度测试 670 nm 不同部分偏振光状态下偏振度; 最后计算不同部分偏振光状态下 DPC 偏振度测量值的统计偏差。

DPC 通过工作波段对应三个偏振通道 ( $a=1,2,3$ ), 目标 Stokes 矢量与 DPC 偏振响应的关系为

$$\begin{bmatrix} S_{l,p}^{k,1} \\ S_{l,p}^{k,2} \\ S_{l,p}^{k,3} \end{bmatrix} = M_{l,p}^k \begin{bmatrix} I_{l,p}^k \\ Q_{l,p}^k \\ U_{l,p}^k \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中  $S_{l,p}^{k,a}$  为 DPC 的视场响应, 有

$$S_{l,p}^{k,a} = \sum_{j=p-1}^p \sum_{h=l-1}^l D_{Nn,j}^{k,a} / 4, \quad (19)$$

式中  $D_{Nj,h}^{k,a}$  为像元预处理后的响应值。DPC 的输出偏振度为

$$P_M^k = \sqrt{(Q_{l,p}^k)^2 + (U_{l,p}^k)^2} / I_{l,p}^k, \quad (20)$$

DPC 偏振度测量值与参考值的绝对偏差为

$$\Delta P^k = |P_M^k - P_C^k|. \quad (21)$$

式中  $P_C^k$  为  $k$  波段偏振度理论值,  $P_M^k$  为  $k$  波段偏振度测量值,  $|P_M^k - P_C^k|$  为  $k$  波段偏振度测量值与理论值差异值的绝对值。可调偏振度光源验证 DPC 偏振定标精度测试现场图如图 12 所示。



图 12 可调偏振度光源验证 DPC 偏振定标精度测试现场图

Fig.12 Practical map of polarimetric calibration accuracy validation experiment with variable polarization degree at large dynamic range

表 4 所示为 670 nm 波段偏振度测量结果。可以看出, 在偏振度 10%~40% 范围内, DPC 670 nm 视场角  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $45^\circ$  测量值与理论值差异值的绝对值分别为 0.13%、0.44%、0.29% 和 0.33%, 即可调偏振度光源状态下 DPC 670 nm 全视场的偏振定标精度小于 0.5%。在偏振度 0 位置时, DPC 670 nm 各视场测量值与理论值差异值较大, 可调偏振度光源输出自然光状态时, 其平板玻璃处于垂直位置, 其输出的光辐射会在 DPC 镜头和平板玻璃之间来回反射, 无法实现高精度的偏振定标精度验证。因此需要采用大口径积分球辐射源 LEAIS 对 DPC 进行自然光状态下全视场的偏振定标精度验证。

表 4 670 nm 波段偏振度测量结果

Table 4 Test results of the degree of linear polarization within 670 nm

FOV(°)	0°		15°		30°		45°	
$P_C$ (%)	$P_M$ (%)	$ P_M - P_C $ (%)	$P_M$ (%) (%)	$ P_M - P_C $ (%)	$P_M$ (%) (%)	$ P_M - P_C $ (%)	$P_M$ (%) (%)	$ P_M - P_C $ (%)
0.00	1.25	1.25	1.08	1.08	1.08	1.08	1.66	1.66
10.00	10.13	0.13	10.44	0.44	10.29	0.29	10.33	0.33
15.00	15.04	0.04	15.09	0.09	15.17	0.17	15.16	0.15
20.00	20.10	0.10	19.95	0.05	20.18	0.18	20.14	0.14
25.00	25.08	0.08	24.94	0.06	25.17	0.17	25.12	0.12
30.00	30.11	0.11	29.98	0.02	30.23	0.23	30.09	0.09
40.00	40.13	0.13	40.14	0.14	40.29	0.29	40.07	0.07
Maximum deviation(%)	0.13		0.44		0.29		0.33	

#### 4.2 大口径积分球辐射源验证偏振定标精度

大口径积分球辐射源 (Large exit aperture integrating spheres reference light source) 主要用来对 DPC 进行自然光状态下全视场的偏振定标精度验证。LEAIS 输出的光辐射为接近理想的自然光光源, 采用光谱偏振分析仪<sup>[17]</sup> 对其进行测量。LEAIS 865 nm 波段偏振度测量结果和自然光状态下全视场的偏振定标精度验证图如图 13 所示。

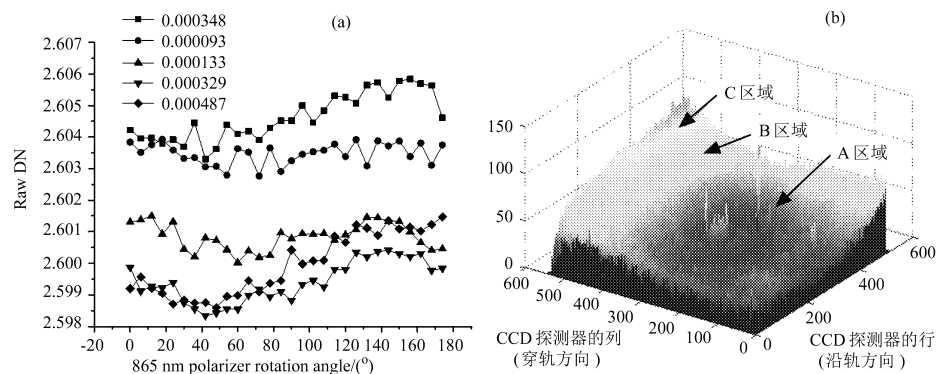


图 13 LEAIS 865 nm 波段偏振度测量结果 (a) 和自然光状态下全视场的偏振定标精度验证 (b)

Fig.13 Degree of linear polarization measurement results of LEAIS within 865 nm (a) and polarimetric calibration accuracy validation results of DPC 865 nm channel using LEAIS (b)

由图 13(a) 可知, LEAIS 865 nm 波段在自然光状态下全视场偏振定标精度小于 0.05%。从图 13(b) 可知, 自然光状态下 DPC 全视场定标结果为 A 区域至 B 区域偏振定标精度在 0.2%~0.5% 范围; B 至 C 区域偏振定标精度在 0.5%~0.8% 范围; 同时自然光状态验证实验表明, DPC 全视场偏振定标精度具有非对称性。初步分析, 极有可能是光楔与平板通道的差异引起透射和反射到三检偏通道面阵 CCD 探测器上的杂散光水平不一致, 导致全视场偏振定标精度的非对称性。图 13(b) 中心视场区域存在个别偏振度超出 0.5% 的异常点, 根据空间高频透过率数据分析, 考虑是偏振片 / 滤光片组合转轮上的灰点污染等引起的空

间高频差异。三检偏通道的空间高频透过率数据中, 相同位置的突起和下降差异对偏振定标精度无影响。

## 5 结 论

偏振遥感器的实验室定标能够建立偏振遥感器在实验室观测结果和在航空航天遥感平台观测结果之间的联系, 评估偏振遥感器得到的实验室仪器参数验证, 物理量验证和应用验证的准确程度。以多角度偏振遥感器 DPC 作为宽视场偏振遥感器应用示范, 建立了 DPC 偏振辐射响应定标模型, 对模型参量进行了定标, 并验证了定标模型的合理性。

通过大口径积分球辐射源进行相对透过率测试, 测试精度约  $\pm 0.2\%$ , 与法国 POLDER 定标水平相当。低频和高频相对透过率采用大口径积分球参考光源和分视场测量方法, 消除了光楔平板对 DPC 三检偏通道视场非一致性的影响, 与法国 POLDER 定标水平相当。重点分析了全视场起偏度的测量模型的建立, 该模型采用傅里叶级数的分析方法。与法国 POLDER 子午面和弧矢面响应差异的测量方法相比, 该方法不需要考虑参考光源偏振方位角的绝对位置, 消除了参考光源偏振方位角绝对位置引入的测量误差, 保证了起偏度的准确测量。通过分析比对十字交叉 4 个径向 14 个视场起偏度的偏差均值, 评估起偏度的测量精度为 0.36%。最后, 采用可调偏振度光源和大口径积分球辐射源开展了比对验证和精度分析, 全视场偏振定标精度优于 0.5%, 自然光状态下的偏振定标精度优于 0.05%, 验证了宽视场偏振遥感器偏振辐射响应定标模型的合理性, 可为偏振遥感器的工程研制、性能评估和定量化应用等提供理论依据和方法参考。

## 参考文献:

- [1] Yan Lei, Xiang Yun, Li Yubo, et al. Progress of polarization remote sensing research [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(3): 162-174(in Chinese).  
晏 磊, 相 云, 李宇波, 等, 偏振遥感研究进展 [J]. *大气与环境光学学报*, 2010, **5**(3): 162-174.
- [2] Barnes R A, Butler J J. Modeling spectral effects in Earth-observing satellite instruments [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6744**: 41.
- [3] Cremer F, de Jong W, Schutte K. Infrared polarization measurements and modelling applied to surface laid anti-personnel landmines [J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(5): 1021.
- [4] Chenault D B. Modeling of polarized light scattering in cirrus clouds: validation with in-situ measurements and ADEOS-POLDER reflectance observations [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3754**: 320-328.
- [5] Sano I, Mukai S, Takashima T. Multispectral polarization measurements of atmospheric aerosols [J]. *Advances in Space Research*, 1997, **19**(9): 1379-1382.
- [6] Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(3): 175-189(in Chinese).  
孙晓兵, 乔延利, 洪 津. 可见和红外偏振遥感技术研究进展及相关应用综述 [J]. *大气与环境光学学报*, 2010, **5**(3): 175-189.
- [7] Yang Weifeng, Hong Jin, Qiao Yanli. 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): 0822005(in Chinese)

- [8] Kang Qing. *Research on System-Level Radiometric and Polarized Calibration Methods in Laboratory of Polarization Remote Sensors* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of University of Science and Technology of China, 2018(in Chinese).  
康 晴. 偏振遥感器实验室系统级辐射与偏振定标方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学博士论文, 2018.
- [9] Kang Qing, Yuan Yinlin, Li Jianjun, *et al.* Effect of divergence angle of polarization calibration source on DPC polarization calibration: Analysis and validation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(2): 203-210(in Chinese).  
康 晴, 袁银麟, 李健军, 等. 光源发散角对 DPC 偏振定标的影响分析及验证 [J]. 遥感学报, 2018, **22**(2): 203-210.
- [10] Chen Ligang, Meng Fangang, Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing. Experimental study for the polarization characteristics of airborne polarization camera [J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2011, **22**(11): 1629-1632(in Chinese).  
陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 航空偏振相机的光学偏振特性实验研究 [J]. 光电子·激光, 2011, **22**(11): 1629-1632.
- [11] Chen Ligang. Polarimetric calibration of the polarization CCD camera with large viewing field [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(2): 15-20(in Chinese).  
陈立刚. 大视场偏振 CCD 相机的偏振特性实验标定 [J]. 光电工程, 2015, **42**(2): 15-20.
- [12] Zhang Sanhui. *University Physics* [M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 215-245(in Chinese).  
张三慧. 大学物理 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 215-245.
- [13] Chen Ligang, Meng Fangang, Yuan Yinlin, *et al.* Project of calibration method for polarization camera [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(3): 227-231(in Chinese).  
陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 偏振相机的光学定标方案研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2010, **5**(3): 227-231.
- [14] Qian Honghu. *Laboratory Full Field of View Polarization Calibration of Directional Polarimetric Camera* [D]. Hefei: Doctorial Disertation of University of Science and Technology of China, 2017(in Chinese).  
钱鸿鹄. 多角度偏振成像仪实验室全视场偏振定标 [D]. 合肥: 中国科学技术大学博士论文, 2017.
- [15] Chen Ligang. *Study of Laboratory Calibration of the airborne polarization CCD Camera with Wide Field of View* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, 2008(in Chinese).  
陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士论文, 2008(in Chinese).
- [16] Qian Honghu, Meng Binghuan, Yuan Yinlin, *et al.* Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera [J]. *Acta Physics Sinica*, 2017, **66**(10): 100701(in Chinese).  
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.
- [17] Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *et al.* A intensity modulated spectro-polarimetric analyzer based on Fourier transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(12): 1223001(in Chinese).  
袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪 [J]. 光学学报, 2014, **34**(12): 1223001.
- [18] Bret Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Preflight calibration of the POLDER instrument [C]. *Proceedings of SPIE*, 1995, **2553**: 218-231.