

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.003

多角度偏振成像仪高精度辐射定标方法

袁银麟, 康 晴, 翁建文, 丁 蕾, 李健军, 李 双, 吴浩宇,
洪 津, 郑小兵

(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)

摘 要: 开展高精度辐射定标方法研究, 对于多角度偏振成像仪实现大气气溶胶粒子分布和微观物理特性探测反演的科学应用至关重要。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, 实现了光学系统偏振特性的准确测量。结合多角度偏振成像仪的辐射与偏振定标模型, 开展了光学系统偏振特性的校正方法研究, 实现偏振特性引起辐射定标不确定度由 8% 下降至 2.2% 以内。利用高精度二维转动平台和大口径积分球辐射源, 采用分视场测量方法, 校正像元响应非一致性, 实现相对辐射校正精度优于 0.5%。采用基于标准灯漫反射板的辐亮度量值传递链路, 经过各影响因素的分析评测, 所有波段辐射定标精度均优于 5%。

关键词: 遥感; 辐射定标; 不确定度; 气溶胶; 偏振; 传递

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1673-6141(2019)01-0024-012

High-Precision Radiometric Calibration of Directional Polarization Camera

YUAN Yinlin, KANG Qing, WENG Jianwen, DING Lei, LI Jianjun, LI Shuang,
WU Haoyu, HONG Jin, ZHENG Xiaobing

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Radiometric calibration of the directional polarization camera (DPC) with high-precision is very important for quantitative scientific application of acquiring an accurate description of aerosol distributions and microphysical properties. Using Fourier series analysis method, a polarization rate measurement model is established to eliminate the measurement error introduced by the absolute direction in the angle of linear polarization of the reference light source, so that the polarization property is measured with high accuracy. Combining radiometric and polarimetric calibration model of DPC, radiometric calibration uncertainty caused by polarization property decreased from 8.8% to 2.2% after

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(安徽省自然科学基金, 1708085QF131)

作者简介: 袁银麟 (1983 -), 男, 安徽青阳人, 博士, 副研究员, 主要从事先进辐射定标光源技术及偏振定标等方面的研究。

E-mail: ylyuan@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-10-07; **修改日期:** 2018-12-21

correction. Using an integrating sphere light source with large aperture and high-precision two-dimensional turntable platform, adopting sectional viewing field measurement method, the entire pixels response non-uniformity is measured and corrected, and the precision of relative radiometric calibration coefficient is better than 0.5%. To transfer the spectral radiance value, the standard lamp and diffuse reflection reference board system is introduced. According to analysis and evaluation of various factors, radiometric calibration accuracy of the entire waveband is better than 5%.

Key words: remote sensing; radiometric calibration; uncertainty; aerosol; polarization; transfer

1 引言

大气气溶胶多角度偏振成像仪 (directional polarization camera, DPC) 是高分五号卫星的主载荷之一, 通过大视场、多角度、多光谱的辐射和偏振测量, 反演获取大气气溶胶粒子分布、微观物理特性等实现千米幅宽、千米量级空间分辨率光学特性获取, 为遥感数据高精度大气校正和全球气候变化研究等领域的科学研究和定量化应用, 提供独特的基础数据^[1-6]。高精度的辐射定标是保障多角度偏振探测仪定量化应用的基本前提^[7-8], 通过建立最终信号输出与已知入射辐射量基准之间的定量化关系开展不确定度因素的产生机理分析, 研究测量、评估和校正验证方法, 最终提供高精度的定标数据。

多角度偏振成像仪具有超广角的折射式光学系统^[3], 其多个光学表面, 会产生一定的偏振特性。这种偏振特性会改变入射光束的偏振态, 包括强度、偏振度和偏振方位角信息, 显著影响目标的辐射和偏振定标精度。前期实验研究表明, 未经校正的偏振特性导致子午面和弧矢面偏振响应差异 (即为起偏度) 达到 6%~13%, 以及 3%~6.5% 的辐射定标不确定度^[9-11]。

多角度偏振成像仪采用 512×512 像元阵列探测器和滤光片 - 偏振片 (衰减片) 组合转轮, 实现画幅式多角度偏振探测。阵列探测器制造工艺和光学系统加工安装的非理想性, 导致像元间响应存在一定的非一致性^[12]。多角度偏振探测仪通过光楔平板补偿同一光谱波段的 3 个检偏通道的 -1、0 和 1 像元偏移, 保证在轨飞行中 3 个检偏通道同一像元探测同一目标。实验室静止测量的定标状态与在轨运行的工作状态差异进一步增大像元间响应非一致性的测量难度。

本文介绍了多角度偏振成像仪的结构组成和探测原理, 设计了光学系统偏振特性和像元间响应非一致性的测量方法。采用线偏振光源和傅里叶变化方法实现偏振特性的高精度测量, 并建立了全视场起偏度的测量模型。利用高精度二维转动平台和大口径积分球辐射源, 采用分视场测量方法, 测量和校正像元响应非一致性。采用基于标准灯漫反射板的辐亮度量值传递链路, 评测多角度偏振成像仪的辐射定标精度, 为类似的多角度光学偏振载荷的高精度辐射定标提供参考。

2 DPC 结构组成和定标模型

2.1 结构组成

DPC 光机结构和超广角成像光学系统示意图如图 1 所示。DPC 光学系统主要由超广角像方远心成像物镜、滤光片 - 偏振片 (衰减片) 组合转轮和面阵 CCD 探测器三部分构成。其中超广角成像光学系统可实现沿轨和穿轨方向约为 100° 视场的观测。DPC 的组合转轮具有 15 个通道, 包括 443, 550, 763, 765, 910 nm 5 个非偏观测通道; 490, 670, 865 nm 3 个偏振观测波段 9 个通道; 1 个用于测量暗电流的本底通道。

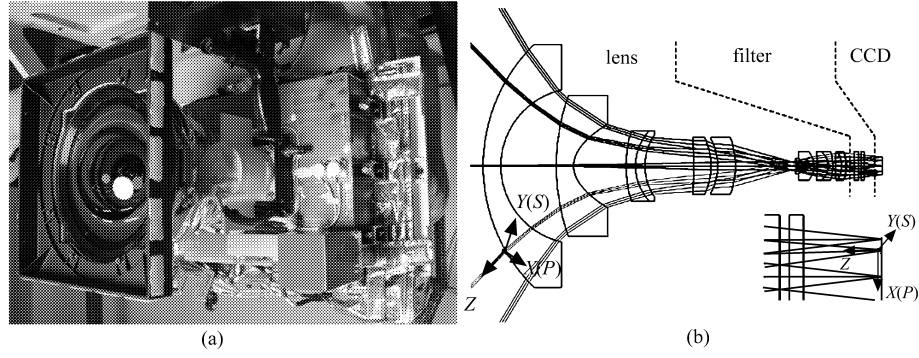


图 1 DPC 的光机结构实物图 (a) 和超广角成像的光学系统示意图 (b)

Fig.1 Mechanical real figure (a) and ultra-wide-angle imaging optical system schematics of DPC (b)

超广角成像光学系统的特点在于大视场角入射的光束斜入射经过多层光学透镜会产生一定的偏振特性。这种偏振特性会改变入射光束的偏振态，包括强度、偏振度和偏振方位角信息，显著影响目标的辐射和偏振定标精度。光学系统偏振特性，是起偏度 $\varepsilon^k(\theta)$ 的函数^[2,9]。强度不变的完全线偏振光源经过子午面和弧矢面的最大相对响应差异为起偏度。根据前期研究，最大透过轴方向在子午面，即主光线和光轴构成的平面。主光线为轴外点发出的光束中通过入瞳中心的光线。最小透过轴方向在弧矢面，与子午面垂直。

2.2 定标模型

综合法国地球反射偏振仪 (Polarization and directionality of the earth reflectance, POLDER)^[2] 和多角度偏振探测仪航空原理样机的理论和实验研究^[9-11]，设计了 DPC 偏振通道的辐射与偏振定标模型

$$\begin{bmatrix} I_{l,p}^k \\ Q_{l,p}^k \\ U_{l,p}^k \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_{l,p}^k)^{-1} \begin{bmatrix} (S_{l,p}^{k,1} - D_{l,p}^k) \\ (S_{l,p}^{k,2} - D_{l,p}^k) \\ (S_{l,p}^{k,3} - D_{l,p}^k) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 k 为光谱波段； a 为检偏通道号； l 、 p 分别为探测器像元行、列位置序号； $I_{l,p}^k$ 为 (l,p) 位置像元探测光强； $Q_{l,p}^k$ 和 $U_{l,p}^k$ 为 2 个 Stokes 参量； $S_{l,p}^{k,a}$ 为 k 波段对应像元位置 l 、 p 的响应， $D_{l,p}^k$ 为 k 波段对应像元位置的本底响应； $\mathbf{M}_{l,p}^k$ 和 $(\mathbf{M}_{l,p}^k)^{-1}$ 分别为系统的 Mueller 矩阵和逆矩阵

$$\mathbf{M}_{l,p}^k = \frac{1}{A^k \cdot t^s \cdot P^k(l,p)} \begin{bmatrix} T^{k,1} \cdot g_{l,p}^{k,1} \cdot P_1^{k,1}(l,p) & T^{k,1} \cdot g_{l,p}^{k,1} \cdot P_2^{k,1}(l,p) & T^{k,1} \cdot g_{l,p}^{k,1} \cdot P_3^{k,1}(l,p) \\ T^{k,2} \cdot g_{l,p}^{k,2} \cdot P_1^{k,2}(l,p) & T^{k,2} \cdot g_{l,p}^{k,2} \cdot P_2^{k,2}(l,p) & T^{k,2} \cdot g_{l,p}^{k,2} \cdot P_3^{k,2}(l,p) \\ T^{k,3} \cdot g_{l,p}^{k,3} \cdot P_1^{k,3}(l,p) & T^{k,3} \cdot g_{l,p}^{k,3} \cdot P_2^{k,3}(l,p) & T^{k,3} \cdot g_{l,p}^{k,3} \cdot P_3^{k,3}(l,p) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 A^k 为绝对辐射定标系数； t^s 为积分时间档位，分为陆地、海洋和自定义模式； $P^k(l,p)$ 为 k 波段对应像元位置的低频相对透过率； $T^{k,a}$ 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； $P_1^{k,a}$ 、 $P_2^{k,a}$ 和 $P_3^{k,a}$ 为仪器的偏振特性响应参数，它们分别是仪器三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，即

$$\begin{cases} P_1^{k,1}(l,p) = 1 + \eta^k \varepsilon^k(l,p) \cos 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,a}) \\ P_2^{k,1}(l,p) = \eta^k \cos 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,a}) + \varepsilon^k(l,p) \\ P_3^{k,1}(l,p) = \eta^k \sin 2(\varphi_{l,p} - \alpha^{k,a}) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\varphi_{l,p}$ 为对应像元位置的方位角, $\alpha^{k,a}$ ($a = 1, 2, 3$) 为 k 波段三个检偏方向的实测角度 (0° 、 60° 和 120°), a 为 k 波段的偏振通道号。

对于非偏振通道, 定标模型为

$$L_{l,p}^k = \frac{(A^k \cdot t \cdot R_{l,p}^k)^{-1}(S_{l,p}^k - D_{l,p}^k)}{1 + \varepsilon^k(l,p) \cdot D_{\text{olp}}^k \cos(2A_{\text{op}}^k)}, \quad (4)$$

式中 A^k 为绝对辐射定标系数, $R_{l,p}^k$ 为相对辐射校正系数, $\varepsilon_{l,p}^k$ 为像元 l 、 p 位置的起偏度, D_{olp}^k 为观测目标的偏振度, A_{op}^k 为观测目标的偏振方位角, t 为探测器的积分时间。

3 起偏度的测量方法

通过积分球参考光源和可旋转的偏振片组合装置, 开展了 DPC 非偏振通道偏振特性的实验研究。设计了一种高精度的起偏度 $\varepsilon_\theta(\lambda)$ 测量方法^[13], 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° 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。

DPC 光学观测通道 910 nm 波段 56° 视场的偏振响应与偏振方位角的测量结果如图 2(a) 所示。从测量曲线来看, 偏振响应与偏振方位角之间的曲线形状遵循余弦规律。如式 (5) 所示, 通过傅里叶算法计算视场 θ 位置起偏度。18 个视场的起偏度测试结果见图 2(b)。与法国 POLDER 子午面和弧矢面响应差异的测量方法相比, 不需要考虑参考光源偏振方位角的绝对位置, 因而具有更高的精度。

$$\varepsilon_\theta^k = \frac{2 \sum_{i=0}^N (S_\theta^k - D_\theta^k) \cos 2 \frac{i\pi}{N}}{\sum_{i=0}^N (S_\theta^k - D_\theta^k)}, \quad (5)$$

式中 ε_θ^k 为 k 波段视场 θ 位置起偏度, S_θ^k 为 k 波段视场 θ 位置的响应值, D_θ^k 为 k 波段视场 θ 位置的本底值。

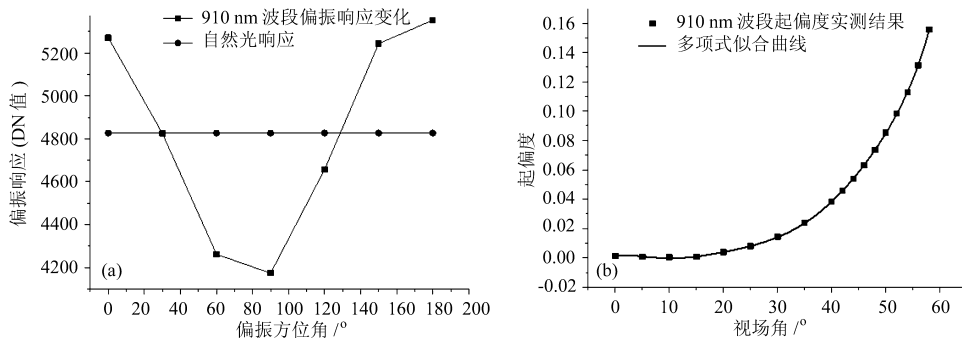


图 2 DPC 910 nm 波段 56° 视场偏振响应的测量情况 (a) 和起偏度测量结果 (b)

Fig.2 Polarized response measurement in 56° viewing field of DPC 910 nm channel(a) and polarization rate measurement in 18 viewing fields(b)

根据 18 个视场的起偏度实测值, 利用 7 次方多项式拟合

$$\varepsilon_{\theta}^k = A + \sum_{i=1}^7 B_i \times \theta^i \quad (6)$$

实现所有视场的起偏度拟合，其中 910 nm 所有视场的起偏度拟合结果为

$$\varepsilon_{\theta}^{910 \text{ nm}} = 1.17 \times 10^{-3} + 8.416 \times 10^{-4} \times \theta - 3.059 \times 10^{-4} \times \theta^2 + 3.393 \times 10^{-5} \times \theta^3 - 1.705 \times 10^{-6} \times \theta^4 + 4.472 \times 10^{-8} \times \theta^5 - 5.814 \times 10^{-10} \times \theta^6 + 2.987 \times 10^{-12} \times \theta^7 \quad (7)$$

全视场起偏度实测曲线和多项式拟合曲线见图 2(b), 可以看出 DPC 的起偏度, 随着视场角度增加而变大, 符合菲涅尔定律和前期实验研究结果。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%^[13]。

图 3 给出了 DPC 30° 和 58° 视场的起偏度与波段之间曲线关系, 其中 30° 视场以内的起偏度均小于 1.5%。在相同视场角条件下, DPC 在 565 nm 的起偏度最小, 在 910 nm 波段的起偏度最大, 其数值分别为 0.0397 和 0.161。初步分析 DPC 光学镜头增透膜系的厚度和折射率对起偏度产生了明显的改变, 其改变机理仍有待进一步研究。

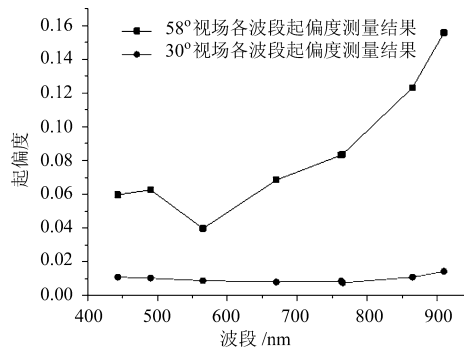


图 3 DPC 30° 和 58° 起偏度与波段之间的关系

Fig.3 Relationship between polarization rate and wavelength of DPC 30° and 58° viewing field

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 ε_{θ}^k 之间关系。通过几何定标方法确定 (l, p) 位置与视场角 θ 之间的关系, 具体过程如下。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, 测量示意图见图 4(a)。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 (θ, φ) 的量化关系。建立的 865 nm 波段全视场 $\varepsilon_{l,p}^k$ 的测量模型如图 4(b) 所示, 具体数据处理方法和过程不再累述。

图 4(b) 起偏度的实际测量结果为坐标值除以 10000。可以看出视场边缘区域起偏度在 0.1~0.161, 这意味着针对完全线偏振光的测量, 偏振特性引起辐射定标不确定度高达 5%~8%。针对高精度的辐射观测应用, 例如实现辐射定标不确定度分别优于 5% 要求, 偏振特性必须予以校正。根据式 (1) 分析, 开展了偏振特性校正。经过分析评估, 偏振特性校正后对 DPC 辐射定标精度的影响在 0.4%~2.2% 之间^[13], 具体分析过程不再累述。

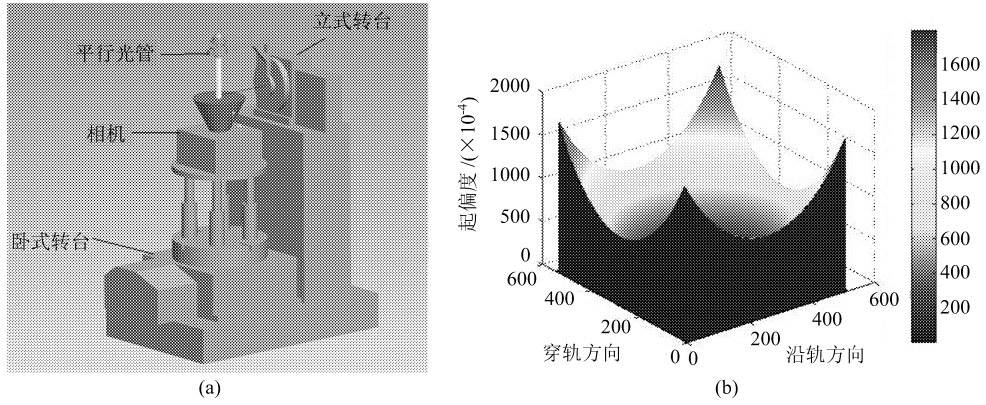


图 4 像元位置与视场角的关系测量示意图 (a) 和 910 nm 波段起偏度 $\varepsilon_{i,p}^k$ 测量结果 (b)

Fig.4 Measurement sketch map (a) and result of polarization rate $\varepsilon_{i,p}^k$ measurement (b)

4 响应非一致的测量方法

对于非偏振和偏振通道, 采用相对辐射校正系数 $R_{i,p}^k$ 和低频与高频相对透过率进行响应非一致性的校正。相对辐射校正系数 $R_{i,p}^k$ 、低频相对透过率 $R^k(l,p)$ 与 $g_{i,p}^{k,a}$ 均通过高精度二位转动平台和大口径积分球辐射源进行测量, 测量过程如下。

通过高精度二位转动平台调整 DPC 各分视场对准积分球辐射源, 采用分视场方法进行测量, 测量点数为 15×15 , 测试时间为 1 h。积分球辐射源出光口直径为 1000 mm。DPC 距离积分球辐射源为 2 m, 能够照亮的圆斑直径约为 100 pixel。1 h 内 DPC 的信噪比均高于 500, 通过平均值和标准偏差的比值获得。相对辐射校正系数为

$$R_{i,p}^k = \frac{S_{i,p}^k - D_{i,p}^k}{\frac{1}{64} \sum_{l'=l_0}^{l_0+7} \sum_{p'=p_0}^{p_0+7} (S_{i',p'}^k - D_{i',p'}^k)}, \quad (8)$$

式中 l_0 、 p_0 分别为中心视场像元行、列序号; $R_{i,p}^k$ 为相对辐射校正系数; $S_{i,p}^k$ 和 $D_{i,p}^k$ 分别为 k 通道对应像元位置 l 、 p 的响应值和本底响应值, $S_{i',p'}^k$ 和 $D_{i',p'}^k$ 分别为中心视场周围像元 l' 、 p' 的响应值和本底响应值。

根据 DPC 信噪比、积分球的非稳定性、角度非均匀性和面非均匀性数据分析^[14-15], 相对辐射校正系数的测量精度 (相对辐射校正精度) 在 0.5% 以内, 限于篇幅不再累述。从图像上可直观验证响应差异测量精度, 图 5 为 490 nm 波段检偏通道 3 的测量点数分别为 7 pixel \times 7 pixel 和 15 pixel \times 15 pixel 的响应差异测量结果, 其中图 5(a) 中间存在约为 0.5% 的拼接缝隙。图 5(b) 中已经不存在拼接缝隙, 而且面阵 CCD 短波处的骨节图像清晰可辨, 其中骨节与边缘区域的明暗差异最大约为 0.7%。图中的骨节图像信息为 DPC 采用的 CCD 探测器固有特征。

相对透过率 $T^{k,a}$ 为 DPC 三检偏通道响应的相对比值, 以检偏通道 2 为作为参考。通过 LEAIS 进行测量, 数据处理方法为

$$T^{k,a} = \frac{\sum_{l=l_0-1}^{l_0+1} \sum_{p=p_0-1}^{p_0+1} (S_{l,p}^{k,a} - D_{l,p}^k)}{\sum_{l=l_0-1}^{l_0+1} \sum_{p=p_0-1}^{p_0+1} (S_{l,p}^{k,2} - D_{l,p}^k)}, \quad (9)$$

式中 l_0 、 p_0 分别为中心视场像元行、列序号。

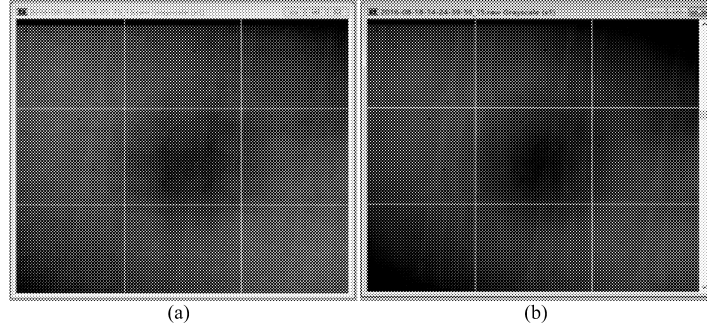


图 5 490 nm 波段 P3 通道测量点数分别为 7×7(a) 和 15×15(b) 的测量结果

Fig.5 Uniformity measurement of DPC 490 nm P3 channel with test position matrix 7×7 (a) and 15×15 (b)

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° 、 60° 和 120° 。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^[16]。取被测视场 3 pixel×3 pixel 区域的三检偏通道响应值和中心视场 3 pixel×3 pixel 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

$$P^k(l,p) = \frac{\sum_{l=l_0-1}^{l_0+1} \sum_{p=p_0-1}^{p_0+1} \text{mean}(X_{l,p}^{k,1} + X_{l,p}^{k,2} + X_{l,p}^{k,3})}{3 \sum_{l=l_0-1}^{l_0+1} \sum_{p=p_0-1}^{p_0+1} \text{mean}(X_{l,p}^{k,2})}, \quad (10)$$

式中 $X_{l,p}^{k,a}$ ($a = 1, 2, 3$) 为 k 波段经过数据预处理后的响应，即

$$X_{l,p}^{k,a} = (S_{l,p}^{k,a} - D_{l,p}^k) / T^{k,a}. \quad (11)$$

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。取参考偏振通道被测像元的响应值和被测视场 3 pixel×3 pixel 区域的响应值，高频相对透过率为

$$g^{k,a}(l,p) = \frac{3X_{l,p}^{k,a}}{\sum_{l=l_0}^{l_0+1} \sum_{p=p_0}^{p_0+1} \text{mean}(X_{l,p}^{k,1} + X_{l,p}^{k,2} + X_{l,p}^{k,3})}. \quad (12)$$

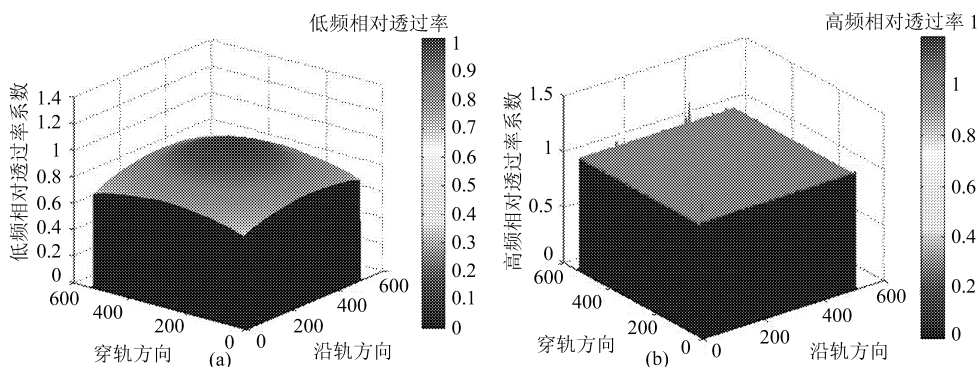


图 6 865 nm 偏振波段低频相对透过率 (a) 和 865 nm P1 偏振波段通道高频相对透过率 (b)

Fig.6 Low frequency part of the transmission variation of DPC 865 nm polarized channel (a) and high frequency part of the transmission variation of DPC 865 nm P1 polarized channel (b)

图 6(a) 为 DPC 865 nm 偏振波段空间低频相对透过率测量结果, 为在相同入射辐亮度条件下, 边缘视场与中心视场响应值的比值。图 6(b) 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。图中突起和下降差异为 DPC 探测器像元响应差异导致。经过数据分析, 相对透过率、低频和高频相对透过率测量精度约 $\pm 0.2\%$ 。CCD 探测器像面左上角为像元 (0,0) 位置。像元行和列方向分别为沿轨和穿轨方向, 均以 pixel 表示, 如图 6 所示。

5 辐射定标精度分析

绝对辐射定标^[7]采用大口径积分球辐射源实现定标, 示意图和实物图如图 7 所示, 包括积分球辐射源、光谱辐亮度计、观测切换装置等。在要求的辐射亮度档位下, DPC 与光谱辐亮度计分别对准积分球出口中心位置并采集数据。

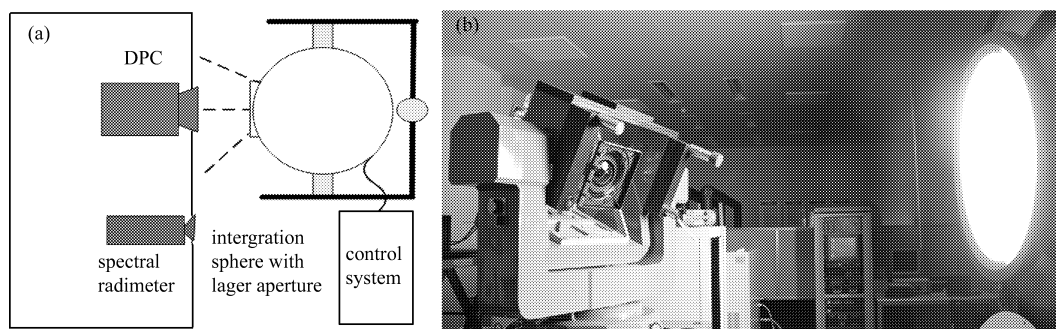


图 7 绝对响应度定标示意图 (a) 和实物图 (b)

Fig.7 Absolute radiance responsivity measurement sketch map(a) and object map(b)

将 DPC、SVC 先后对准积分球开口中心位置, 积分球辐射源出射面充满 DPC 视场。打开大气气溶胶多角度偏振成像仪、积分球辐射源进行预热至稳定工作状态。然后 DPC、SVC 同步开始多次测量, 测量次数为 36 次。绝对响应度 A^k 通过 DPC 的响应值与 SVC 测量的辐亮度值的比值计算得到

$$A^k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i}{L^k}, \quad (13)$$

式中 S_i 为 DPC 中心视场 8 pixel×8 pixel 第 i 次的响应均值; L^k 为积分球对应被测波段的辐亮度值

$$L^k = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L(\lambda)r(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} r(\lambda)d\lambda}, \quad (14)$$

式中 $L(\lambda)$ 是通过 SVC 测得的波长辐亮度。 $r(\lambda)$ 是相对光谱响应率。 DPC 陆地模式绝对响应度测量结果如表 1 所示。

表 1 DPC 陆地模式绝对响应度测量结果

Table 1 Absolute radiance responsivity A^k measurement result of terrestrial observation mode

Spectral band	Response (DN)	Radiance ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$)	Radiance responsivity ($\text{DN}\cdot\mu\text{W}^{-1}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}$)
443 nm	2370.786	17.444	135.909
490 nm	5004.146	31.114	160.835
550 nm	7582.835	43.118	175.862
670 nm	5367.197	23.281	230.543
763 nm	5889.208	14.185	415.178
765 nm	4419.585	14.281	309.480
865 nm	5503.295	7.858	700.323
910 nm	7878.288	15.853	496.956

辐射定标精度是指 DPC 绝对辐射绝对响应度的定标不确定度。通过非线性、非稳定性检测, 评测绝对辐射定标精度。非线性计算公式为

$$u^k(l) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [\hat{S}^{k,i}/\bar{S}^{k,i} - 1]^2}{M-1}} \times 100\%, \quad (15)$$

式中 $u^k(l)$ 为波段 k 的响应非线性系数; $\bar{S}^{k,i}$ 为 DPC 波段 k 的中心视场 8 pixel×8 pixel 线性测量平均响应值; $\hat{S}^{k,i}$ 为 DPC 波段 k 的中心视场 8 pixel×8 pixel 线性拟合响应值, M 为总的线性测量档位, i 为测量档位序号。

非稳定性计算公式为

$$u^k(s) = \frac{1}{\bar{S}^k} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [S^k(i,t) - \bar{S}^k]^2}{M-1}} \times 100\%, \quad (16)$$

式中 $u^k(s)$ 为规定时间段内, 中心视场 8 pixel×8 pixel 响应的非稳定性; $S(i,t)$ 为在 t 次时间测量中, 中

心视场 8×8 像元第 i 次响应; \bar{S}^k 为中心视场 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 在总时间 T 内输出响应平均值; t 为测量时间序号; M 为总的测量次数。

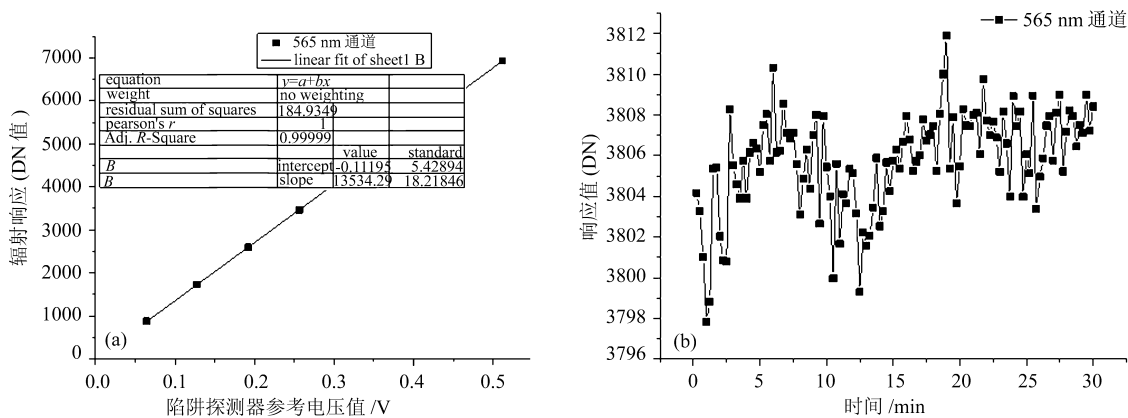


图 8 DPC 565 nm 通道非线性 (a) 和非稳定性 (b) 测试结果

Fig.8 Measurement result of 565 nm channel non-linearity (a) and non-stability (b)

辐射定标精度的评测结果如表 2 所示, 其中传递不确定度是指光谱辐亮度计测量大口径积分球辐射源的辐亮度的不确定度, 包括积分球辐射源的非均匀性和非稳定性。光谱辐亮度计的辐亮度标准溯源与标准灯和漫射板系统。对于 DPC 偏振通道和非偏振通道反演的辐亮度精度, 可分别依据式 (2) 和式 (4), 结合表 2 中的评测结果, 以及其它参数的校正结果进行综合评估, 限于篇幅不再累述。

表 2 DPC 辐射定标精度评测结果

Table 2 Combined uncertainty of absolute radiance responsivity

Spectral band	Uncertainty factor(%)			Combined uncertainty(%)
	Transfer uncertainty	Non-linearity	Non-stability	
443 nm	3.11	0.16	0.07	3.12
490 nm	3.08	0.07	0.05	3.09
565 nm	3.07	0.14	0.06	3.08
670 nm	3.06	0.03	0.05	3.07
763 nm	2.92	0.05	0.11	2.93
765 nm	2.92	0.07	0.11	2.93
865 nm	3.13	0.13	0.10	3.14
910 nm	3.94	0.17	0.10	3.95

6 结 论

偏振特性和响应非一致性是 DPC 辐射定标精度的关键影响因素之一, 如果不进行校正, 可导致视场角 50° 之外高达 $5\% \sim 8\%$ 的辐射测量误差。对于高精度的辐射观测应用, 例如实现辐射定标不确定度优于 5% 的技术要求, 偏振特性和响应非一致性必须予以准确测量和校正。

采用傅里叶分析方法提出了一种全视场起偏度的测量模型, 实现了偏振特性优于 0.36% 的高精度测量。与法国 POLDER 子午面和弧矢面响应差异的测量方法相比, 不需要考虑参考光源偏振方位角的绝对位置, 因而具有更高的精度。利用高精度二维转动平台和大口径积分球辐射源, 采用分视场测量方法, 校正像元响应非一致性, 实现相对辐射校正精度优于 0.5%。

采用基于标准灯漫反射板的辐亮度量值传递链路, 经过各影响因素的分析评测, 所有波段辐射定标精度均优于 5%。辐射定标方法在偏振特性和响应非一致性方面测量和校正方面具有一定的参考价值, 可为类似的多角度光学载荷的研制和定量化应用提供定标技术支持。

参考文献:

- [1] Gonzalez A, Mayer B, Gayet J F, *et al.* Multilayer cirrus cloud property retrieval using dual-view ATSR-2 instrument[C]// *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VII. International Society for Optics and Photonics*, 2003, **4882**: 224-232.
- [2] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Preflight calibration of the POLDER instrument [C]// *Infrared Spaceborne Remote Sensing III. International Society for Optics and Photonics*, 1995, **2553**: 218-232.
- [3] Tang Weiping, Hong Jin, Wang Yuanjun, *et al.* Airborne directional polarization camera and its optical system design [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(3): 213-216(in Chinese).
汤伟平, 洪津, 汪元钧, 等. 航空多角度偏振成像仪及其光学系统设计 [J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(3): 213-216.
- [4] Frouin R, Deschamps P Y, Rothschild R, *et al.* MAUVE/SWIPE: An imaging instrument concept with multi-angular, -spectral, and -polarized capability for remote sensing of aerosols, ocean color, clouds, and vegetation from space [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6406**: 64060E.
- [5] Ohring G, Tansock J, Emery W, *et al.* Achieving satellite instrument calibration for climate change (ASIC3) [J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2007, **88**(11): 1-136.
- [6] Deuze J L, Breon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D5): 4913-4926.
- [7] Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, *et al.* Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 616-623(in Chinese).
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标 [J]. *遥感学报*, 2006, **10**(5): 616-623.
- [8] Zheng Xiaobing. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, **32**(5): 36-43(in Chinese).
郑小兵. 高精度卫星光学传感器辐射定标技术 [J]. *航天返回与遥感*, 2011, **32**(5): 36-43.
- [9] 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.
- [10] Chen Ligang, Meng Fangang, Yuan Yinlin, *et al.* 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] 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: 8-74(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: 8-74.
- [13] Qian Honghu, Meng Binghuan, Yuan Yinlin, *et al.* The full field of view polarization effects measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(10): 100701(in Chinese).
钱鸿鹤, 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.
- [14] Yuan Yinlin, Xu Jun, Zhai Wenchao, *et al.* Design and test of a spectrum-tunable integrating spheres reference light source with large exit aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7): 0712004(in Chinese).
袁银麟, 徐 骏, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测 [J]. 光学学报, 2013, **33**(7): 0712004.
- [15] Xie Ping, Wu Haoyu, Zheng Xiaobing, *et al.* Automatic directional radiometric testing system for large aperture integrating spheres [J]. *Optics Precision Engineering*, 2010, **18**(9): 1943-1950(in Chinese).
谢 萍, 吴浩宇, 郑小兵, 等. 大口径积分球辐出度分布自动测试系统 [J]. 光学精密工程, 2010, **18**(9): 1943-1950.
- [16] Leng Jianhua. *Fourier transform* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 16-22(in Chinese).
冷建华. 傅里叶变换 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 16-82.