

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.04.005

高分五号 02 星多角度偏振成像仪 在轨辐射性能初步评价

朱思峰^{1,2,3}, 朱梦瑶⁴, 伽丽丽^{1*}, 许华¹, 李正强^{1,2*}, 谢一淞¹,
洪津⁵, 涂碧海⁵, 孟炳寰⁵

(1 中国科学院空天信息创新研究院, 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;

2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 上海卫星工程研究所, 上海 201109;

4 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

5 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)

摘要: 2021年9月我国成功发射的高分五号 02 星 [GF-5(02)] 上搭载有多角度偏振成像仪 (DPC) 和高精度偏振扫描仪 (POSP), 组成了“偏振交火”观测方案。为评价 GF-5(02) 卫星 DPC 传感器的在轨辐射性能, 基于 2022 年 1 月 DPC 和 POSP 观测数据, 采用海洋瑞利散射和“偏振交火”交叉定标两种方法, 实现了 DPC 在轨绝对辐射定标和视场内相对辐射一致性检验。结果表明, DPC/GF-5(02) 在轨后的绝对辐射和相对辐射响应较发射前的实验室定标结果均未发生明显改变, 在轨前后各波段绝对辐射系数差异均小于 5.3%, 视场内相对辐射响应变化均小于 2%。其中, 443 nm 波段瑞利散射和“偏振交火”交叉两种方法获得的绝对辐射定标系数一致性较高, 偏差约为 2%; 而 490 nm 和 670 nm 波段两方法定标结果偏差较大, 偏差分别为 7.4% 和 7.7%。整体上, DPC/GF-5(02) 在轨后的辐射稳定性优于 DPC/GF-5。

关键词: 高分五号 02 星; 多角度偏振成像仪; 绝对辐射系数; 相对辐射系数; 瑞利散射定标; “偏振交火”定标

中图分类号: TP931

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)04-310-013

Preliminary evaluation of in-flight radiation performance of directional polarimetric camera of Gaofen-5(02) satellite

ZHU Sifeng^{1,2,3}, ZHU Mengyao⁴, QIE Lili^{1*}, XU Hua¹, LI Zhengqiang^{1,2*}, XIE Yisong¹,

HONG Jin⁵, TU Bihai⁵, MENG Binghuan⁵

(1 State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

4 College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

5 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

基金项目: 国家自然科学基金 (42175148), 国家杰出青年科学基金 (41925019)

作者简介: 朱思峰 (1994-), 安徽安庆人, 博士研究生, 主要从事卫星传感器在轨定标方面的研究。E-mail: zhusf@aircas.ac.cn

导师简介: 李正强 (1977-), 河南洛阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: lizq@radi.ac.cn

收稿日期: 2022-07-18; 修改日期: 2022-10-11

*通信作者。E-mail: qiell@radi.ac.cn; lizq@radi.ac.cn

Abstract: In September 2021, China successfully launched the Gaofeng-5(02) satellite (GF-5(02)), which is equipped with a directional polarimetric camera (DPC) and a high-precision particulate observing scanning polarimeter (POSP), forming a "polarization crossfire" observation program. In order to evaluate the in-flight radiation performance of the DPC sensor loaded on GF-5(02) satellite, based on the DPC and POSP observation data in January 2022, two methods, ocean Rayleigh scattering and "polarization crossfire" cross-calibration between DPC and POSP, were used to achieve the absolute calibration in-flight and the relative radiometric consistency test in the field of view of DPC. The results show that compared with the laboratory calibration results before launch, the absolute radiometric and relative radiometric response of DPC/GF-5(02) after launch have not changed significantly, the absolute calibration coefficient of each band changes less than 5.3% after launch, and the change of relative radiometric response in the field of view is less than 2%. Specifically, the absolute calibration coefficients obtained by the two methods of Rayleigh scattering and cross calibration (DPC and POSP) at 443 nm band have a high consistency, with a deviation of about 2%, while the calibration results of the two methods at 490 nm and 670 nm bands have a large deviation, with a deviation of 7.4% and 7.7%, respectively. Overall, the radiation stability of DPC/GF-5(02) after orbit is better than that of DPC/GF-5.

Key words: Gaofen-5(02) satellite; directional polarimetric camera; absolute radiometric coefficient; relative radiometric coefficient; Rayleigh scattering calibration; "polarization crossfire" cross calibration

0 引言

可靠的辐射定标是实现光学遥感仪器高精度遥感应用的基本前提。卫星在轨运行前,通常通过实验室定标对卫星传感器的辐射性能进行全面定标和检测^[1-4];卫星在轨运行后,传感器受发射时的振动、在轨空间环境变化影响,其辐射性能较在轨前的实验室定标结果可能会发生变化。因此,卫星发射后,需对传感器的在轨辐射性能进行检测和评价。

2021年9月,我国成功发射了高分五号02星[GF-5(02)],其上搭载的多角度偏振成像仪(DPC)为法国POLDER同类型传感器^[5]。该传感器是继高分五号卫星(GF-5)搭载的DPC之后又一台在轨运行的具有获取全球多角度偏振观测数据能力的卫星传感器,持续为全球大气气溶胶和云的探测提供高精度观测数据。GF-5(02)同步搭载了高精度偏振扫描仪(POSP)传感器,与DPC组成“偏振交火”观测方案^[5]。DPC/GF-5(02)由于其宽视场特点,未配备星上辐射定标系统。POSP传感器配有高精度星上辐射和偏振定标系统,可以实现紫外至短波红外多个波段的辐射和偏振的高精度测量。因此,DPC可采用自然场景的替代定标方法或通过与同平台POSP传感器的“偏振交火”交叉定标,实现在轨绝对辐射定标和视场范围内相对辐射一致性检验。

卫星在轨辐射替代定标常用的自然目标有深对流云、海洋瑞利、海洋耀光和沙漠场地^[6-9]。在POLDER系列传感器在轨运行期间,POLDER定标团队分别利用厚云、沙漠、海洋耀光等地面自然场景,实现了POLDER传感器的在轨辐射和偏振定标^[6,7],并综合多种在轨替代定标方法对其生命周期内的在轨辐射响应系数进行了长时序跟踪监测,利用物理模型对其衰变过程进行了参数化描述^[8]。Lacherade等^[9]基于北非和

阿拉伯半岛沙漠定标场地对 MODIS 与 POLDER 进行了交叉辐射定标, 利用中等分辨率成像光谱仪 (MERIS) 多年统计的平均地表光谱数据和 POLDER/PARASOL 的二向反射 (BRDF) 产品进行了光谱差异和地表方向反射差异校正, 结果表明两传感器相应波段辐射响应差异在 6% 以内。基于 DPC/GF-5 在轨观测数据, 我国学者已开展了一些 DPC 传感器的在轨辐射替代定标研究。李照洲等^[10]采用海洋耀光偏振定标方法, 对 DPC/GF-5 在轨测试期间的偏振数据进行了测试, 结果表明载荷发射前后偏振测量状态未发生明显改变。Qie 等^[11]采用海洋场景的瑞利散射绝对辐射定标方法、太阳耀光波段间传递辐射和偏振定标方法实现了 DPC/GF-5 的在轨可见近红外波段辐射强度定标和线偏振度验证, 结果显示 DPC/GF-5 具有良好的在轨辐射和偏振探测性能。Chen 等^[12]建立了基于查找表的 DPC 瑞利散射定标方法, 利用 DPC/GF-5 2018 年 7 月的数据进行了大量样本的统计, 辐射定标结果不确定度为 2%~3%。Zhu 等^[13]基于海洋瑞利散射、太阳耀光波段间传递和沙漠场交叉三种定标方法, 对 DPC/GF-5 进行了长时间序列在轨辐射性能监测, 并结合定标结果提出了全视场辐射衰变校正方案, 有效提高了气溶胶光学厚度 (AOD) 等产品的反演精度。杨洪春^[14]基于“偏振交火”机载观测试验数据验证了“偏振交火”交叉定标视场匹配的可行性。

本文采用海洋瑞利散射定标方法和 DPC 与 POSP 沙漠场交叉定标方法, 进行 DPC/GF-5(02) 在轨绝对辐射定标, 并对 DPC 视场范围内相对辐射响应一致性进行检测, 对其在轨辐射性能进行初步评价。

1 仪器与方法

1.1 DPC/GF-5(02) 传感器

DPC 传感器仪器设计^[5]与法国 POLDER 传感器类似^[15], DPC 的光学系统由宽视场远心光学镜头、镶嵌有滤光片和偏振片的转轮及 CCD 面阵传感器组成。其中宽视场光学系统是由一个反伽利略望远镜和一个聚焦组件组成, 能够获取 $\pm 50^\circ$ 沿轨和 $\pm 50^\circ$ 穿轨视场范围内同一地面目标最多 17 个角度的观测数据。转动轮内嵌了 15 个插槽 (其中包括一个用于测量暗电流的不透明插槽)、5 个非偏振滤光片和 9 个偏振滤光片 (3 个偏振波段, 每个波段包括解析方向为 0° 、 60° 和 120° 的三个偏振片)。每个偏振组件中使用光楔补偿和配准非同时刻异步偏振测量, 可以获得 5 个非偏振波段 (443、565、763、765、910 nm) 和 3 个偏振波段 (490、670、865 nm) 的准同时刻观测结果。GF-5(02) DPC 的 CCD 传感器阵列由 1024×1024 个像元组成, 可实现太阳同步轨道星下点 $1.7 \text{ km} \times 1.7 \text{ km}$ 原始空间分辨率观测。同时, GF-5(02) 增加了 POSP 传感器与 DPC 共同组成“偏振交火”观测方案, 首次获取了“偏振交火”卫星观测数据。POSP 传感器为偏振扫描型辐射计, 仪器设计^[5]与美国 NASA 的 APS 型传感器^[6]类似, 利用两个正交的反射镜将光信号反射入一对相同望远系统中形成两条光路, 再分别通过两个渥拉斯顿棱镜将每一束光分成两个偏振方向, 每个光路由各自的双元探测器检偏得到 4 个方向 (0° 、 45° 、 90° 、 135°) 的偏振光, 解算得到 Stokes 偏振参量。POSP 具有紫外至短波红外共 8 个偏振探测波段 (380、410、443、670、865、1380、1610、2250 nm), 通过穿轨扫描方式获取天底方向约 $\pm 50^\circ$ 范围内的观测数据, 因此可以穿轨成像覆盖 DPC 图像幅宽, 星下点像元分辨率约为 $7 \text{ km} \times 7 \text{ km}$ 。POSP 配备了高精度星上定标系统, 利用太阳漫射板进行星上绝对辐射定标, 利用线偏振定标器和非偏振定标器分别进行星上辐射和偏振定标^[16]。因此, 可通过交叉传递定标将 POSP 高精度的辐射定标系数传递给 DPC 传感器。

DPC 影像像元的强度信息与输出信号 L 值呈线性相关, 其非偏振通道辐射模型^[2]可以表示为

$$L_k(i, j) = GtA_k P_k(i, j) [I_k(i, j) + \varepsilon_k(i, j) Q_k(i, j)] + C_k(i, j), \quad (1)$$

式中 (i, j) 表示不同 CCD 探元的位置, 经几何定标后可建立探元坐标 (i, j) 与仪器视场角度 (θ, φ) 的对应关系^[17]; G 为电子学相对增益 ($G = 1$); t 为曝光时间 ($t = 1$); A_k 为 k 波段的绝对辐射定标系数, 通常由 CCD 中心同时也是视场中心像元的辐射响应决定; $P_k(i, j)$ 表示视场范围内像元 (i, j) 的相对辐射响应变化, 可分解为由光学镜头透过率随视场变化引起的低频分量 (随视场位置慢变) 和由 CCD 探元响应差异引起的高频分量 (随视场位置快变) 的乘积; $I_k(i, j)$ 表示 CCD 接收的入射光强度; $\varepsilon_k(i, j)$ 表示镜头起偏度; $Q_k(i, j)$ 表示入射光垂直于或平行于参考平面的线偏振强度; $C_k(i, j)$ 表示暗电流。

卫星在轨前, DPC 仪器经过详细的实验室定标, 获取一整套的仪器辐射响应参数。卫星在轨后, 需通过替代定标方法获取 DPC 在轨绝对辐射定标系数并监测其视场内相对辐射响应衰变情况。

1.2 瑞利散射绝对辐射定标方法

在晴朗清洁的海面上, 卫星传感器探测到的可见光波段反射辐射中大气分子瑞利散射贡献可达 70% 以上^[18], 考虑气溶胶散射、海面离水辐射、白帽反射、气体吸收等因素的影响, 大气层顶 (TOA) 反射辐亮度可以利用辐射传输模式精确计算, 用于星载传感器可见光波段的绝对辐射强度定标^[7,8,19]。

通过严格控制定标样本像元的选择, 可以最小化大气气溶胶、离水辐射和海洋白帽反射的影响, 降低定标的不确定性。选择定标区时需要满足水体清洁 (叶绿素含量低)、气溶胶光学厚度小、风速低、避开耀光和云的干扰等, 瑞利散射定标常用的海洋定标场如图 1 所示^[19]。

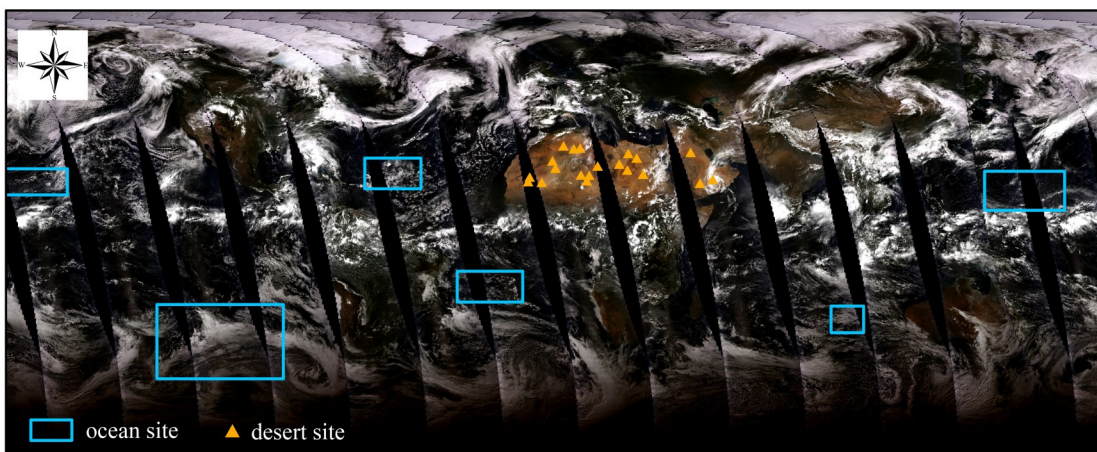


图 1 全球海洋定标场与北非和阿拉伯半岛准不变沙漠定标场分布图

Fig. 1 Distribution of global ocean calibration field and quasi-invariant desert calibration field in North Africa and Arabian Peninsula

瑞利散射方法的定标误差主要源于海-气辐射传输计算时输入的大气、海表辅助参数误差, 考虑典型输入误差情况, 可见光波段定标误差约为 2%~5%^[7,11,18], 随波长增加, 瑞利散射定标不确定度增大。在轨辐射定标系数 A'_k 的计算公式为

$$A'_k = \frac{A_{k, \text{in-flight}}}{A_{k, \text{pre-flight}}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{I_{\text{mea}, k, n}}{I_{\text{cal}, k, n}}, \quad (2)$$

式中 $A_{k, \text{in-flight}}$ 和 $A_{k, \text{pre-flight}}$ 分别为在轨绝对辐射定标系数和实验室绝对辐射定标系数; N 为定标样本个数; $I_{\text{mea}, k}$ 为基于实验室绝对辐射定标系数计算得到的 DPC 表观反射率, 可从 DPC Level 1 产品直接获取; $I_{\text{cal}, k}$ 为模拟

的表观反射率值,可通过输入太阳-观测几何及大气、海表辅助参数,利用6S辐射传输模型进行计算^[20]。瑞辐射定标系数 A_k^i 的标准差 σ 用来描述样本的稳定性,其计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{I_{\text{mea},k,n}}{I_{\text{cal},k,n}} - A_k^i \right)^2}{N-1}}. \quad (3)$$

DPC测量值与模拟值的均方根误差(RMSE, E_{RMS})描述二者整体偏差,其计算公式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I_{\text{mea},k,n} - I_{\text{cal},k,n})^2}. \quad (4)$$

1.3 DPC与POSP交叉辐射定标方法

卫星在轨交叉辐射定标是基于两颗传感器在相近的观测几何和观测时间条件下对同一目标的探测应具有有一致的反射率观测值的假设。同平台的DPC和POSP传感器在仪器设计时考虑了传感器测量的时空同步和光谱匹配问题,与不同平台卫星间的在轨交叉定标相比,“偏振交火”交叉定标具有像元匹配更容易、精度高等优势^[5]。同平台仪器交叉辐射定标前需要进行像元角度匹配、分辨率匹配、地理位置匹配和光谱匹配。在进行DPC和POSP的像元角度匹配时,仅需匹配DPC像元17个观测角度中的第9角度数据即可,该角度图像包含星下点探测像元,像元角度匹配判据为

$$\begin{cases} S_{\text{DPC}} - S_{\text{POSP}} \leq 2^\circ \\ V_{\text{DPC}} - V_{\text{POSP}} \leq 2^\circ, \\ R_{\text{DPC}} - R_{\text{POSP}} \leq 2^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中 S_{DPC} 和 S_{POSP} 分别代表DPC和POSP的太阳天顶角, V_{DPC} 和 V_{POSP} 分别代表DPC和POSP的观测天顶角, R_{DPC} 和 R_{POSP} 分别代表DPC和POSP的相对方位角。角度阈值设为 2° ,能够保证交叉定标精度和匹配样本数量满足定标需求。分辨率匹配即将DPC像元分辨率降采样为POSP分辨率大小,仅保留位置差异小于 $2/3$ 个DPC像元的样本。利用得到的匹配像元对,根据仪器光谱响应差异计算光谱匹配因子和DPC辐射定标系数。图2为GF-5(02)卫星POSP与DPC传感器各波段光谱响应函数。由图2可知,DPC与POSP的4个共有波段(443、490、670、865 nm)中心波长和带宽均非常一致,仅光谱响应曲线形状略有差异,这为“偏振交火”交叉辐射定标提供了有利条件。

理想的交叉辐射定标场要求选择满足大面积均一、长时间稳定、地表朗伯性好、光谱反射率光滑、大气清洁稳定、晴朗无云天气多和环境污染少等条件的沙漠区域。图1为国际常用的20个北非和阿拉伯半岛沙漠准不变定标场分布图,各场地空间均一性优于3%,且其地表反射特性几乎不随时间发生变化^[21]。

2 在轨辐射定标结果

2.1 绝对辐射定标结果

获取DPC/GF-5(02)2022年1月数据进行了瑞利散射定标,得到DPC的4个可见光波段(443、490、565、670 nm)在轨辐射定标系数。从遥感影像上选取晴空清洁海洋区域作为瑞利散射定标区域,匹配相应的大气和海洋辅助参数,其中AOD来源于MODIS Level 2级MOD04产品^[22],叶绿素浓度来源于S-NPP/VIIRS Level2 Chl-a数据集^[23],海表风速、风向和压强数据来自NCEP的再分析数据集^[24],臭氧柱浓度数据来源于

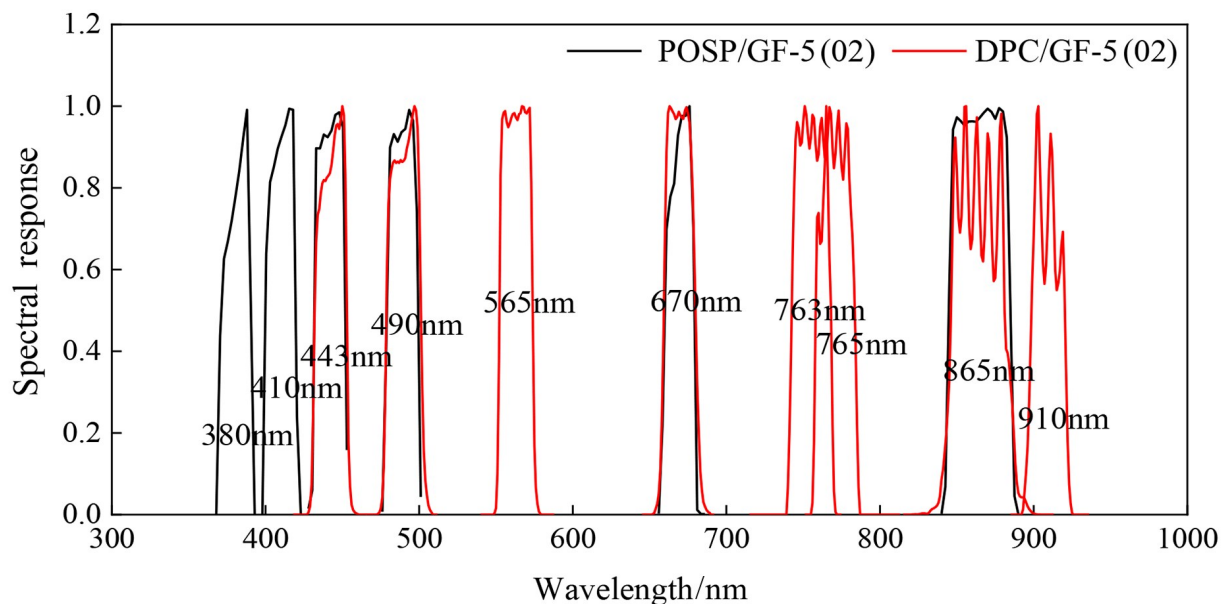


图2 GF-5(02)卫星 POSP与DPC各波段光谱响应函数对比

Fig. 2 Comparison of spectral response function between POSP and DPC onboard GF-5(02)

Aura/OMI反演的OMTO3日数据集^[25]。依据以下约束条件对瑞利散射定标区域样本进行进一步质控:剔除风速 $> 5 \text{ m/s}$ 的像元,减小海表面白帽反射影响;剔除气溶胶光学厚度 > 0.1 的像元,减少气溶胶对大气辐射传输的影响;剔除叶绿素浓度 $> 0.1 \text{ mg/m}^3$ 的像元,降低海表离水辐射的影响。经质控后,共获取3989组满足瑞利散射定标条件的样本。将质控后的定标样本的太阳-观测几何和大气、海表辅助参数输入6S辐射传输模型,精确计算DPC可见光波段表观反射率,利用式(2)和式(3)计算得到可见光波段辐射定标系数及其标准差。

4个波段瑞散射定标样本的表观反射率的计算值与测量值散点图如图3所示。由图可知,DPC实测反射率与瑞利散射理论计算反射率有很好的的一致性。443 nm和490 nm波段表观反射率的实测值与理论计算值线性相关系数分别为0.98和0.99;565 nm和670 nm波段二者线性相关系数略有下降,分别为0.93和0.94。瑞利散射辐射定标系数结果如表1所示。辐射定标系数标准差也有随波长增加而增大的趋势,4个波段定标系数标准差分别为0.031、0.023、0.059、0.066。这是因为随着波长增加,大气顶反射辐射中分子瑞利散射贡献权重下降,气溶胶散射贡献权重增加,导致大气顶表观反射率理论计算值不确定性增大。DPC/GF-5(02)的4个可见光波段辐射定标系数 A'_k 分别为0.992、0.975、0.947和0.972,即4个波段DPC的在轨绝对辐射响应较发射前实验室定标结果差异均小于5.3%。

选取GF-5(02)卫星2022年1月20—29日的DPC和POSP在北非和阿拉伯半岛准不变沙漠定标场上空的观测数据进行DPC与POSP的“偏振交火”交叉辐射定标,得到DPC的4个波段(443、490、670、865 nm)的在轨辐射定标系数。对定标区域DPC和POSP数据剔除云像元,进行分辨率匹配、角度匹配和光谱匹配后,共得到2816个匹配像元对。4个波段交叉辐射定标样本的DPC与POSP的表观反射率测量值散点图如图4所示。由图可知,DPC与POSP的表观反射率测量值有很好的线性相关性,其中443、490、670 nm三个波段的 R^2 均达到0.99,斜率介于1.007~1.012之间。交叉辐射定标系数结果如表1所示。由表可知,4个波段

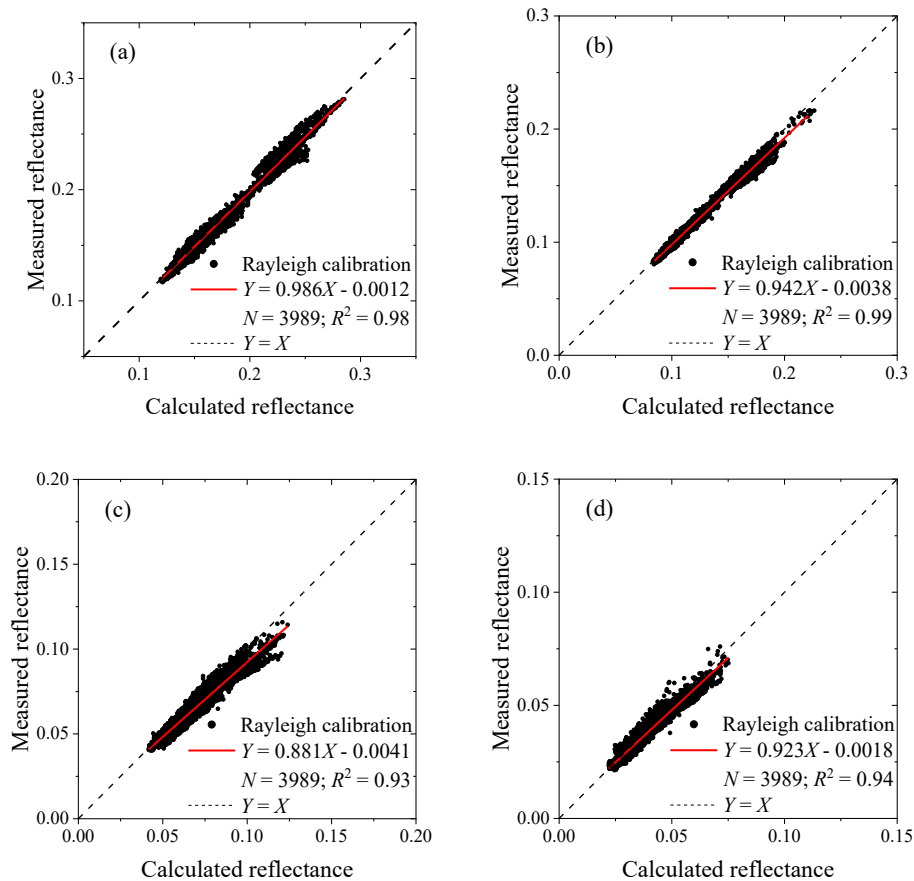


图3 DPC/GF-5(02) 2022年1月瑞利散射定标表观反射率理论计算值与实测值散点图。(a) 443 nm; (b) 490 nm;
(c) 565 nm; (d) 670 nm

Fig. 3 Scatter plot of simulated and measured apparent reflectance values during Rayleigh scattering calibration in January 2022 for DPC/GF-5(02). (a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 565 nm; (d) 670 nm

DPC与POSP的交叉辐射定标系数分别为0.971、1.049、1.049和1.048,即DPC的443 nm波段反射率测量值较POSP偏低约3%,而490、670、865 nm 3个波段反射率测量值较POSP偏高约5%。4个波段DPC与POSP的交叉辐射定标系数标准差分别为0.014、0.014、0.01和0.018,远低于海洋瑞利散射定标系数的标准差。分析其主要原因是DPC与POSP同平台搭载,像元的时空及角度匹配度均较高,交叉辐射定标过程受地表、大气等干扰因素影响较小,定标结果较为稳定。

表1中瑞利散射和“偏振交火”交叉定标两种方法得到的DPC在轨辐射定标系数中,443 nm波段两方法定标结果非常接近,偏差仅2.1%,在两定标方法理论误差范围内;而490 nm和670 nm波段两方法定标结果偏差较大,偏差分别7.4%和7.7%。分析其原因,一方面由于瑞利散射定标不确定性随波长增加而增大,在波长较短的443 nm波段,瑞利散射定标精度较高,在波长稍长的490 nm和670 nm波段,瑞利散射定标误差增大;另一方面,对于670 nm波段,由于海洋瑞利定标区域为暗目标,其定标样本反射率取值范围约为0.025~0.075,辐亮度值低且变化区间小,而沙漠场交叉定标区域为亮目标,其定标样本反射率取值范围约为0.25~0.375,辐亮度值高且变化区间较大,即两种定标样本分别对应DPC不同的辐亮度响应区间,可能是导致两种定标结果偏差较大的另一原因。

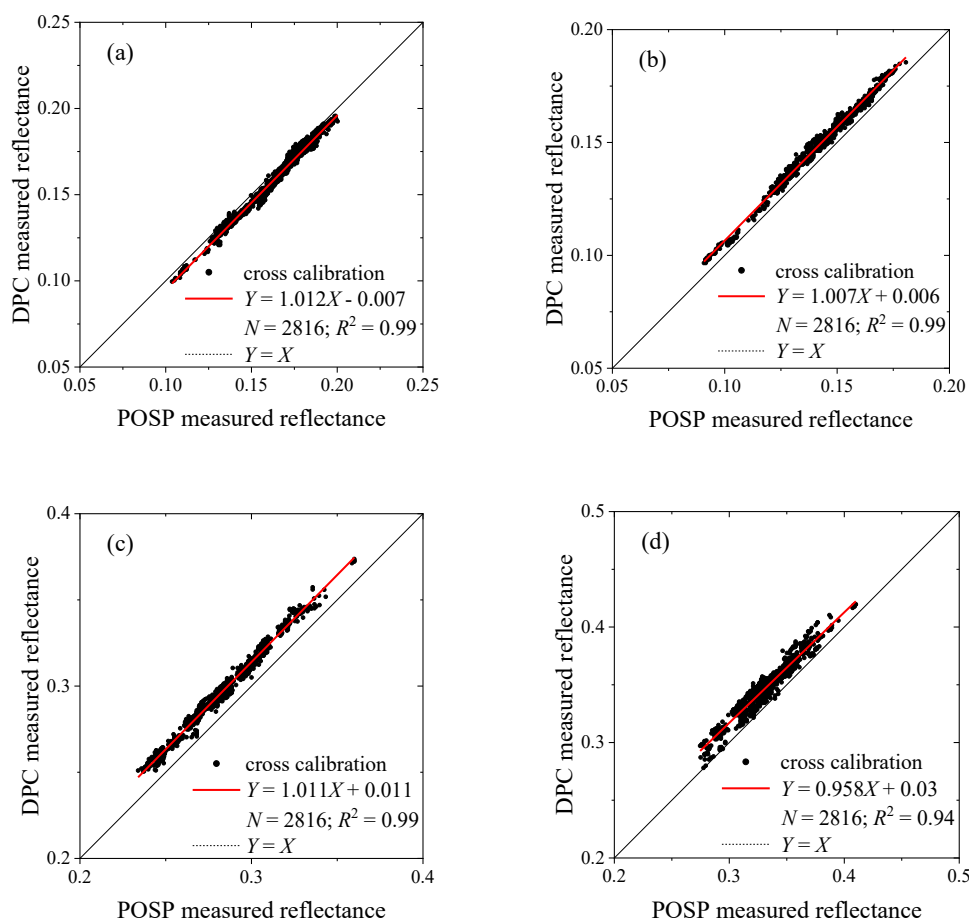


图 4 DPC/GF-5(02) “偏振交叉”交叉辐射定标 DPC 与 POSP 表观反射率实测值散点图。

(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm

Fig. 4 Scatter plot of measured apparent reflectance of DPC and POSP on GF-5(02) for "polarization crossfire" cross calibration.

(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm.

表 1 2022 年 1 月 DPC/GF-5(02) 瑞利散射定标和“偏振交叉”交叉定标辐射定标系数

Table 1 DPC/GF-5(02) Rayleigh scattering radiometric calibration and "polarization crossfire" cross radiometric calibration coefficients in January 2022

Band/nm	Rayleigh calibration A'_k	Rayleigh calibration σ	Cross calibration A'_k	Cross calibration σ
443	0.992	0.031	0.971	0.014
490	0.975	0.023	1.049	0.014
565	0.947	0.059	—	—
670	0.972	0.066	1.049	0.010
865	—	—	1.048	0.018

2.2 视场内相对辐射一致性检验

为检测 DPC/GF-5(02) 在轨后视场内相对辐射响应变化, 基于海洋瑞利散射定标样本和沙漠场“偏振交

火”交叉定标样本分析了DPC辐射定标系数随仪器视场角的变化情况。受限于定标样本数量和DPC 1级数据产品已经过像元重采样的特点,研究中忽略了相对辐射响应的高频分量的变化(CCD探元响应差异引起),仅检测由光学镜头变化引起的视场内的相对辐射响应低频分量的变化。由于DPC光学系统的轴对称特点,忽略相对辐射响应随视场方位角的变化,将DPC在轨相对辐射响应系数 $P'_k(\theta)$ 简化为观测天顶角的函数,即

$$P'_k(\theta) = \frac{A'_k(\theta)}{A'_k} = \frac{I_{\text{mea},k}(\theta)}{I_{\text{ref},k}(\theta)}, \quad (6)$$

式中 θ 为DPC的观测天顶角, $I_{\text{mea},k}(\theta)$ 与 $I_{\text{ref},k}(\theta)$ 分别为观测天顶角 θ 处定标样本的表观反射率测量值和参考值,参考值可为瑞利散射定标样本的表观反射率计算值或沙漠场交叉定标样本的POSP表观反射率测量值。

基于瑞利散射定标样本的DPC/GF-5(02)相对辐射响应系数 $P'_k(\theta)$ 随观测天顶角变化的散点图如图5所示,样本覆盖了DPC观测天顶角约 $0^\circ \sim 72^\circ$ 范围。由图5可知,4个瑞利散射定标波段(443、490、565、670 nm) $P'_k(\theta)$ 曲线基本呈 $Y=1$ 直线,各波段在视场边缘较视场中心的相对辐射响应变化均小于2%。“偏振交叉”交叉定标样本的DPC/GF-5(02)相对辐射响应系数 $P'_k(\theta)$ 随观测天顶角变化的散点图如图6所示,样本覆盖了DPC观测天顶角约 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围。通过拟合样本 $P'_k(\theta)$ 随观测天顶角的变化曲线,发现各波段在视场边缘较视场中心的相对辐射响应变化分别为2.5%、5%、3%和7.7%。但是其随观测天顶角的倾斜情况不同,其中443 nm波段 $P'_k(\theta)$ 随观测天顶角的增大有升高趋势,而490、670、865 nm波段 $P'_k(\theta)$ 随观测天顶角的增大呈减小趋势。可能的原因为随观测天顶角增大,DPC与POSP像元面积急剧增大,像元形状畸变增大,导致二者像元匹配误差增大。

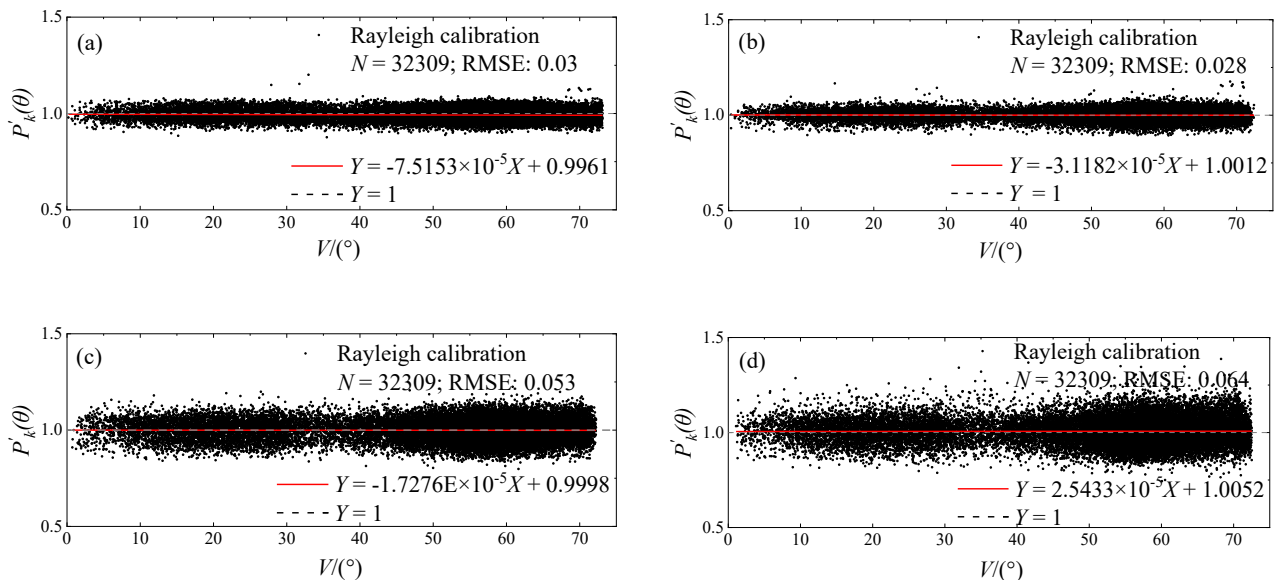


图5 DPC/GF-5(02) 2022年1月瑞利散射相对辐射定标结果。(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 565 nm; (d) 670 nm

Fig. 5 Relative radiometric calibration results of DPC/GF-5(02) based on Rayleigh scattering in January 2022.

(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 565 nm; (d) 670 nm

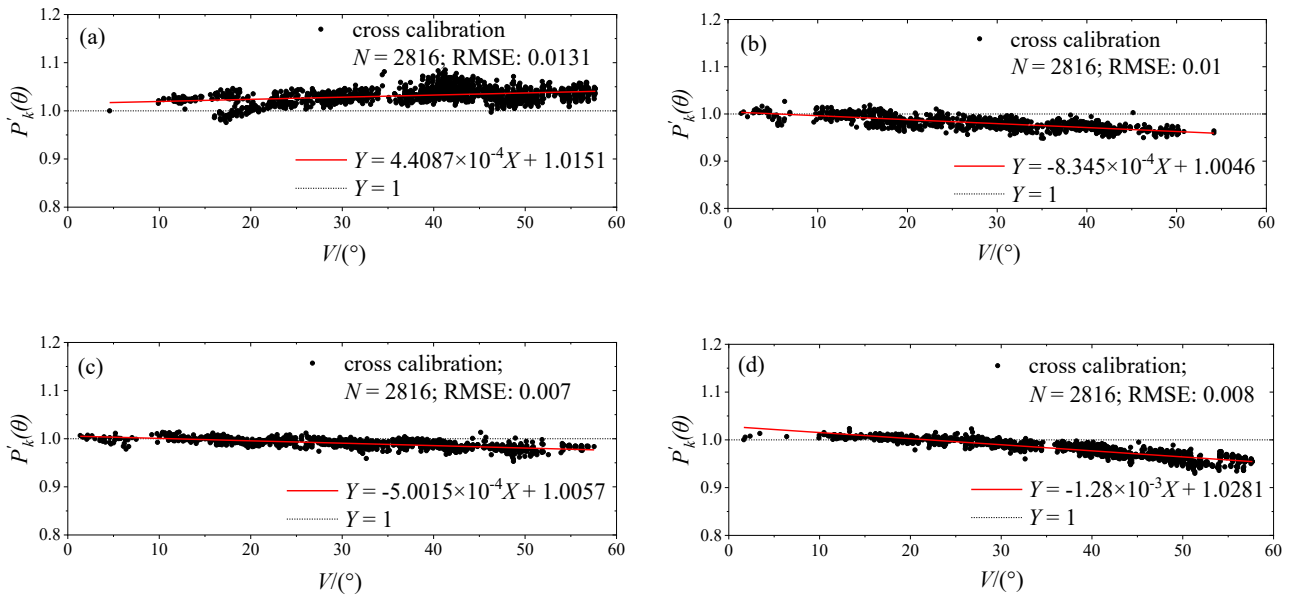


图 6 DPC/GF-5(02) 2022 年 1 月“偏振交叉”交叉相对辐射定标结果。(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865nm
 Fig. 6 Relative radiometric calibration results of DPC/GF-5(02) based on "polarization crossfire" cross radiation calibration.

(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865nm

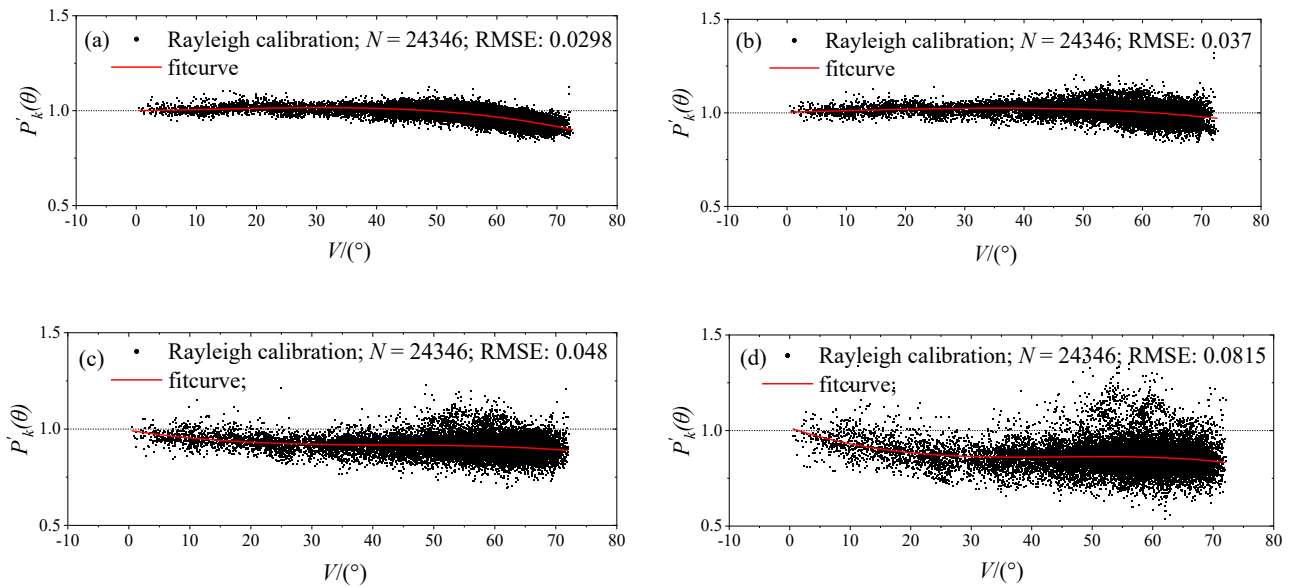


图 7 DPC/GF-5 2018 年 6 月瑞利散射相对辐射定标结果。(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 565 nm; (d) 670 nm
 Fig. 7 Relative radiometric calibration results of DPC/GF-5 based on Rayleigh scattering in June 2018.

(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 565 nm; (d) 670 nm

为横向对比 DPC/GF-5 与 DPC/GF-5(02) 的相对辐射性能, 图 7 显示了 DPC/GF-5 在轨测试期间 2018 年 6 月瑞利散射定标相对辐射响应系数结果。由图 5 与图 7 对比可知, DPC/GF-5(02) $P'_k(\theta)$ 拟合线较 DPC/GF-5 更加贴近 $Y = 1$ 直线。DPC/GF-5 的 443 nm 和 490 nm 两波段 $P'_k(\theta)$ 曲线在视场边缘 (观测天顶角大于 40°) 向

下倾斜, 相对视场中心 (观测天顶角为 0°) 变化分别为9.7%和2.7%; 而565 nm和670 nm两波段 $P'_k(\theta)$ 曲线在边缘视场 (观测天顶角大于 40°) 较为平稳, 在中心视场 (观测天顶角小于 30°) $P'_k(\theta)$ 曲线随观测天顶角增大呈减小趋势, 边缘视场与中心视场辐射响应变化分别约为11.2%和16.7%。DPC/GF-5和DPC/GF-5(02)都经过实验室定标, 而在轨检测结果表明, DPC/GF-5(02)在轨后各波段相对辐射响应较DPC/GF-5具有更高的稳定性。主要原因是在DPC/GF-5(02)的实验室定标时作了以下几个方面的改进: 一是重新构建了DPC的几何模型并提出了一种基于转台及欧拉变换的几何定标方法, 消除了由于角度信息获取偏差而导致的定标误差^[26]; 二是在杂散光校正方面, 对一类杂散光校正采用了基于多视场杂散光函数反卷积方法, 对二类杂散光校正将适用于线性CCD探测器的一维矩阵法改为适用于面阵探测器的二维矩阵法, 实现了至少93%的杂散光去除^[26,27]。此外, DPC/GF-5(02)的镀膜层较DPC/GF-5进行了优化, 且透镜采用了高折射材料使光线相对于透镜的入射角度小于 35° , 从而降低了透镜组的偏振效应^[26]。

3 结 论

基于DPC/GF-5(02)在轨测试期间2022年1月的观测数据, 采用海洋瑞利散射定标和“偏振交火”交叉定标两种定标方法, 实现了DPC在轨绝对辐射定标和视场内相对辐射一致性检验, 对DPC的在轨辐射性能进行了初步评价。

结果表明: 1) DPC/GF-5(02)在轨后绝对辐射响应较发射前的实验室定标结果未发生明显改变, 各波段在轨前后差异均小于5.3%。2) 瑞利散射和“偏振交火”交叉两方法辐射定标系数在443 nm波段处一致性较好, 偏差约为2%; 而490 nm和670 nm波段处一致性较差, 偏差分别为7.4%和7.7%。3) 视场内相对辐射一致性检验结果表明, DPC/GF-5(02)在轨后相对辐射响应较发射前也未发生明显改变, 各波段视场内相对辐射响应变化均小于2%, 在轨相对辐射响应稳定性优于DPC/GF-5。

本研究基于GF-5(02)卫星实测数据初步验证了DPC与POSP传感器的在轨交叉辐射定标的可行性, “偏振交火”交叉定标方法可作为DPC长时序在轨辐射定标和性能监测的有效手段。

参考文献:

- [1] Tu B H, Hong J, Yao P P, *et al.* Polarization detection performance and detection of multi-angle polarization imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0712003.
涂碧海, 洪津, 姚萍萍, 等. 多角度偏振成像仪偏振探测性能与检测 [J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0712003.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Weng J W. *Research on Calibration Data Processing Method of Multi-Angle Polarization Imager and Its Software Implementation* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
翁建文. 多角度偏振成像仪定标数据处理方法研究及软件实现 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.

- [5] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, *et al.* The polarization crossfire (PCF) sensor suite focusing on satellite remote sensing of fine particulate matter PM_{2.5} from space [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2022, 286: 108217.
- [6] Mishchenko M I, Cairns B, Kopp G, *et al.* Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: Introducing the glory mission [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(5): 677-692.
- [7] Hagolle O, Goloub P, Deschamps P Y, *et al.* Results of POLDER in-flight calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1550-1566.
- [8] Fougnie B. Improvement of the PARASOL radiometric in-flight calibration based on synergy between various methods using natural targets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(4): 2140-2152.
- [9] Lacherade S, Fougnie B, Henry P, *et al.* Cross calibration over desert sites: Description, methodology, and operational implementation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1098-1113.
- [10] Li Z Z, Qie L L, Xie Y S, *et al.* In-flight polarimetric calibration of directional polarization camera on GF-5 satellite [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(1): 18-23.
李照洲, 伽丽丽, 谢一淞, 等. GF-5卫星多角度偏振成像仪在轨偏振定标 [J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(1): 18-23.
- [11] Qie L L, Li Z Q, Zhu S F, *et al.* In-flight radiometric and polarimetric calibration of the Directional Polarimetric Camera onboard the GaoFen-5 satellite over the ocean [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(24): 7186-7199.
- [12] Chen F N, Luo D G, Li S, *et al.* The operational inflight radiometric uniform calibration of a directional polarimetric camera [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3823.
- [13] Zhu S F, Li Z Q, Qie L L, *et al.* In-flight relative radiometric calibration of a wide field of view directional polarimetric camera based on the Rayleigh scattering over ocean [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1211.
- [14] Yang H C. *On-Orbit Calibration of Atmospheric Particulate Matter Monitor* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
杨洪春. 大气颗粒物监测仪在轨定标研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [15] Tanré D, Bréon F M, Deuzé J L, *et al.* Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: The PARASOL mission [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(7): 1383-1395.
- [16] Yang H C, Yang B Y, Song M X, *et al.* Onboard polarimetric calibration methods of spaceborne scanning polarimeter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1110002.
杨洪春, 杨本永, 宋茂新, 等. 星载偏振扫描仪的星上偏振定标方法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1110002.
- [17] Huang C, Meng B H, Chang Y Y, *et al.* Geometric calibration method based on a two-dimensional turntable for a directional polarimetric camera [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(1): 226-233.
- [18] Vermote E, Santer R, Deschamps P Y, *et al.* In-flight calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(18): 3409-3429.
- [19] Fougnie B, Llido J, Gross-Colzy L, *et al.* Climatology of oceanic zones suitable for in-flight calibration of space sensors [C]. *SPIE Optical Engineering & Applications. Proc SPIE 7807*, Earth Observing Systems XV, San Diego, California, USA. 2010, 7807: 215-225.
- [20] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [21] Cosnefroy H, Leroy M, Briottet X. Selection and characterization of Saharan and Arabian Desert sites for the calibration of optical satellite sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(1): 101-114.
- [22] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(11): 2989-3034.
- [23] Hu C M, Lee Z P, Franz B. Chlorophyll algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C1): C01011.

- [24] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [25] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, *et al.* Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (toms) absorbing aerosol product [J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40 (1): 2-1-2-31.
- [26] Huang S. *Research on Laboratory Calibration Method of Multi-Angle Polarization Imager* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
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.
- [27] Huang C, Zhang M M, Chang Y Y, *et al.* Directional polarimetric camera stray light analysis and correction [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(26): 7042-7049.