

# 光学学报

## DPC/GaoFen-5 与 MODIS/Aqua 在轨交叉辐射定标

朱思峰<sup>1,2,3</sup>, 伽丽丽<sup>1\*</sup>, 许华<sup>1</sup>, 谢艳清<sup>1,2</sup>, 李正强<sup>1,2\*\*</sup>, 谢一淞<sup>1</sup>, 葛邦宇<sup>1</sup>, 李凯涛<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院遥感卫星应用国家工程实验室, 北京 100101;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院空天信息研究院海南研究院海南省地球观测重点实验室, 海南 三亚 572000

**摘要** 高分五号(GaoFen-5)卫星搭载的多角度偏振成像仪(DPC)未装备星上定标器,需依赖不同替代方法进行在轨辐射定标。为此,发展了一种在轨交叉辐射定标方法,考虑实时地表方向反射及仪器光谱响应差异,实现了DPC/GaoFen-5与中分辨率成像光谱仪(MODIS)/Aqua的在轨交叉辐射定标。该方法选用具备高精度星上定标的MODIS/Aqua卫星为参考传感器,选择北非沙漠准不变定标场观测数据,通过输入卫星同步地表双向反射率产品和大气辐射传输计算,精确校正两传感器间太阳-观测几何和光谱响应差异带来的表观辐射量偏差,最终得到待定标传感器在轨交叉辐射定标系数。理论分析结果表明,该方法在DPC非吸收波段的定标不确定度为2.41%~3.70%。DPC/GaoFen-5与MODIS/Aqua的交叉辐射定标初步结果表明,两者辐射一致性较高,各波段表观辐射量差异均小于4%。

**关键词** 遥感; 交叉定标; 大气辐射传输; 地表双向反射率分布函数; 多角度偏振成像仪; 中分辨率成像光谱仪

中图分类号 P407.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1828008

### In-Flight Cross Radiometric Calibration of DPC/GaoFen-5 and MODIS/Aqua

Zhu Sifeng<sup>1,2,3</sup>, Qie Lili<sup>1\*</sup>, Xu Hua<sup>1</sup>, Xie Yanqing<sup>1,2</sup>, Li Zhengqiang<sup>1,2\*\*</sup>, Xie Yisong<sup>1</sup>,  
Ge Bangyu<sup>1</sup>, Li Kaitao<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Laboratory for Satellite Remote Sensing Applications, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Hainan Research Institute, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, Hainan, China

**Abstract** The directional polarimetric camera (DPC) on the GaoFen-5 satellite is not equipped with an on-board calibrator, and thus it requires different alternative methods for the in-flight radiometric calibration. For this purpose, an in-flight cross radiometric calibration method is developed, and the real-time surface directional reflectance and spectral response differences are considered to realize the in-flight cross radiometric calibration of DPC/GaoFen-5 and MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)/Aqua. In this method, MODIS/Aqua with a high accuracy on-board calibration ability is selected as the reference sensor, and the observation data over the pseudo-invariant calibration site in North Africa is used. By inputting the real-time satellite bidirectional reflection product and calculating the atmospheric radiative transfer, this paper accurately corrects the apparent radiation deviation caused by the sun-observation geometry and spectral response differences between the two sensors and finally obtains the in-flight cross radiometric calibration coefficient of the sensor to be calibrated. Theoretical analysis results show that the calibration uncertainty of this method is 2.41%–3.70% at the non-absorption band of DPC. The preliminary results of the cross radiometric calibration between DPC/GaoFen-5 and MODIS/Aqua show that they have a good radiometric consistency, and the apparent radiation

收稿日期: 2022-01-26; 修回日期: 2022-03-22; 录用日期: 2022-05-05

基金项目: 海南省重点研发计划科技合作方向项目(ZDYF2020206)、国家自然科学基金(42175148)、国家杰出青年科学基金(41925019)

通信作者: \*qiell@radi.ac.cn; \*\*lizq@radi.ac.cn;

difference of each band is less than 4%.

**Key words** remote sensing; cross calibration; atmospheric radiative transfer; surface bidirectional reflectance distribution function; directional polarimetric camera; moderate-resolution imaging spectroradiometer

## 1 引言

大气气溶胶是地球-大气系统中最重要的成分之一,与全球辐射平衡、气候变化、环境污染和人类健康等方面息息相关。为了获取更详细的大气气溶胶信息,偏振、多角度、多光谱等多维度探测手段被用于提高探测精度。

法国里尔大学光学实验室研制的 POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectance) 传感器先后三次搭载于不同卫星入轨运行,于 1996—2013 年间获取了大量极具科研价值的对地观测遥感数据。由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的多角度偏振成像仪(DPC),是与 POLDER 类似的卫星传感器,于 2018 年 5 月 9 日成功搭载于高分五号卫星入轨运行,是当时唯一在轨的多角度偏振遥感探测仪器。可靠的辐射定标是遥感数据量化应用必不可少的前提和基础,DPC 因其宽视场的特点,难以装载星上定标器,需要利用不同替代定标方法进行在轨辐射定标。在高分五号发射之前,DPC 进行了一系列高精度实验室几何、辐射和偏振定标<sup>[1-2]</sup>。高分五号在轨后,Qie 等<sup>[3-4]</sup>基于海洋瑞利散射和太阳耀光进行了 DPC 的在轨辐射和偏振定标,结果表明 DPC 可见光波段的绝对辐射定标系数与发射前差异小于 2%,线偏振度精度优于 0.04。陈斐楠等<sup>[5]</sup>利用海洋瑞利散射法和沙漠场地法验证了 DPC 绝对辐射定标系数,结果显示 DPC 各波段在轨定标系数与发射前的差异为 1.24%~4.76%。这些基于地球特殊自然目标的在轨替代定标方法均表明 DPC 在轨后有良好的辐射探测性能。交叉定标法作为另一种基于其他高精度卫星传感器的辐射定标系数传递定标方法,可作为一种独立方法用于 DPC 传感器的在轨辐射性能的验证。

卫星在轨交叉辐射定标常用的方法主要有辐亮度法、反射率法和辐射传输模型(RTM)法。辐亮度法是在参考传感器和待定标传感器获取的辐亮度相同的假设条件下,通过直接对比辐亮度来换算辐射定标系数的方法。彭光雄等<sup>[6]</sup>利用该方法计算得到了 Landsat-5 的 TM 和 CBERS-02 的 CCD 传感器各对应波段计数值之间的一元线性回归方程。反射率法基于两传感器获取图像的表现反射率相等的假设,这种假设相比辐亮度法可以降低由太阳角度及两传感器角度差异引起的不确定性,并且该方法考虑了传感器光谱响应差异。Teillet 等<sup>[7]</sup>利用轨道接近的 Landsat-7 ETM+ 和 Landsat-5 TM 的反射率数据进行交叉对比,结果表明二者大部分波段辐射一致性在 3% 以内。这两种方法操作简单,但对两传感器的观测匹配度要求很高,难以进行实际在轨应用。在此基础上发展的 RTM 法利用大气辐射传输模型和地表同步测量的大气、地表光学

参数来校正传感器的观测几何差异,从而确定参考传感器和待定标传感器观测值之间的关系,最终实现定标系数传递。该方法广泛应用于各类传感器的在轨定标,如 Chander 等<sup>[8]</sup>基于北非沙漠场地 EO-1 Hyperion 高光谱观测数据计算光谱匹配因子(SBAF),利用 Landsat-7 ETM+ 和中分辨率成像光谱仪(MODIS) Terra 对 EO-1 ALI 进行在轨交叉定标,然而该研究忽略了地表双向反射率分布函数(BRDF)的影响。Feng 等<sup>[9]</sup>利用敦煌场地 Landsat-8 OLI 观测数据对高分一号 WFV 传感器进行交叉定标,该研究利用地表光谱数据库计算了 SBAF,并基于 MODIS BRDF 产品对地表方向特性进行了校正,然而这种 SBAF 计算方式假设同类型地物光谱特性是一致的,具有一定不确定性。Lacherade 等<sup>[10]</sup>在对北非和阿拉伯半岛沙漠场地评价筛选的基础上对 MODIS 与 POLDER 进行交叉辐射定标,并利用多年统计的 MERIS 平均地表光谱数据和 PARASOL 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的辐射差异在 6% 以内。MODIS 传感器具备星上定标器,自 1999 年至今一直长期稳定在轨运行,提供高精度的辐射观测数据。本研究参考 Lacherade 等<sup>[10]</sup>的工作,同样选用 MODIS/Aqua 为参考传感器,与 DPC/GaoFen-5 进行在轨交叉辐射定标和验证,以期在不同时空层面对比国产 DPC 传感器和法国 POLDER 传感器的在轨辐射特性差异,为卫星多角度偏振观测数据在时间序列上的连续性和辐射一致性研究提供支撑。

本文发展了一种基于辐射传输模型的改进的交叉定标方法,通过输入卫星实时 BRDF 产品进行地表方向反射特性校正和光谱差异校正,实现参考传感器与待定标传感器在轨辐射定标系数的传递。本研究详细介绍了交叉定标的方法流程,并分析了大气和地表因素带来的定标不确定度,最后实现了 DPC/GaoFen-5 与 MODIS/Aqua 的交叉辐射定标。

## 2 仪器与数据

### 2.1 DPC/GaoFen-5

高分五号卫星搭载的 DPC 传感器是我国第一颗以大气气溶胶和云为探测目标的星载多角度偏振成像仪<sup>[11-12]</sup>,卫星过境时间为当地时间 13:30。DPC 传感器设计与 POLDER 类似,由宽视场光学系统、滤光片-偏振片组合转轮和面阵 CCD 探测器组成。宽视场光学系统可获取沿轨和穿轨方向  $\pm 50^\circ$  范围内幅宽为 1850 km 的影像,星下点分辨率约为 3.3 km。滤光片-偏振片组合转轮可获取 8 个波段的探测信息,包括 443, 565, 763, 765, 910 nm 这 5 个非偏探测波段和 490, 670, 865 nm 这 3 个偏振探测波段。CCD 探测器是由  $512 \times 512$  面阵探元构成,支持画幅式成像方式,

获取地面目标至少 9 个角度的观测数据。DPC 在发射前经过了系统的几何定标和辐射定标,标称绝对辐射定标精度为 5%<sup>[2-3,5,13]</sup>。卫星在轨运行后,仪器因在轨环境的变化和光电器件的老化,辐射性能可能发生衰变,需要进行在轨辐射定标监测。

## 2.2 MODIS/Aqua

MODIS 是多光谱中分辨率观测卫星传感器,目标是对太阳辐射、大气、海洋和陆地进行综合观测。MODIS 传感器共有 36 个探测波段,通过扫描镜摆动获取 2330 km 幅宽的观测数据。约三周进行一次在轨辐射定标,由于配备有星上定标器,太阳光波段反射率定标精度为  $\pm 2\%$ <sup>[14]</sup>。MODIS/Aqua 卫星过境时间为当地时间 13:30,自 2002 年发射以来,一直提供高精度

的地-气系统辐射观测数据。选取其中 5 个与 DPC 相近探测波段[中心波长分别为 645 nm(B1)、865 nm(B2)、555 nm(B4)、443 nm(B9)和 488 nm(B10)]的观测数据,与 DPC 进行交叉辐射定标。其中,B1、B2 波段为 250 m 分辨率重采样为 1 km 数据,B4 为 500 m 分辨率重采样为 1 km 数据,B9 和 B10 为 1 km 数据。

表 1 为 MODIS/Aqua 和 DPC/GaoFen-5 卫星轨道和传感器参数对比情况。MODIS/Aqua 和 DPC/GaoFen-5 轨道高度、观测时间和视场角大致相同。二者设置相近的探测波段,如图 1 所示。此外,DPC 还具有面阵成像和多角度观测的优势,为两传感器交叉辐射定标的像元和观测角度匹配提供了有利条件。

表 1 MODIS/Aqua 和 DPC/GaoFen-5 卫星轨道和传感器参数对比

Table 1 Comparison of satellite orbit and sensor parameters between MODIS/Aqua and DPC/GaoFen-5

Instrument	MODIS/Aqua	DPC/GaoFen-5
Orbit	Sun-synchronous	Sun-synchronous
Passing time	13:30	13:30
Altitude /km	705	705
Scanning mode	Whisk broom	Frame imaging
Band / $\mu\text{m}$	0.4-15.0	0.443-0.91
Field of view /( $^{\circ}$ )	$\pm 49.5$	$\pm 50$
Swath width /km	2330	1850
Spatial resolution /m	250/500/1000	3300
Radiative calibration uncertainty /%	2	5
Number of angles	1	$\geq 9$

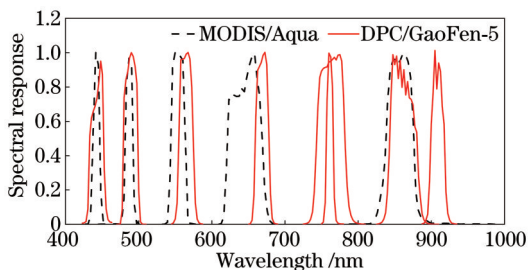


图 1 MODIS/Aqua 和 DPC/GaoFen-5 的光谱响应函数对比图  
Fig. 1 Comparison of spectral response function between MODIS/Aqua and DPC/GaoFen-5

## 2.3 数据介绍

本研究使用的数据主要有 DPC/GaoFen-5 和 MODIS/Aqua 的 1 级反射率产品,以及同步的大气气溶胶和地表 BRDF 产品。MODIS/Aqua 数据是交叉定标参考辐射数据源,大气气溶胶、地表 BRDF 等辅助数据用于校正 DPC/GaoFen-5 和 MODIS/Aqua 太阳-观测几何和光谱响应差异造成的两传感器入瞳处表观辐射量差异。

DPC L1 级数据为将基于实验室辐射定标系数产生的辐亮度数据经过几何定标、观测角度重排序、像元重采样后转换得到的反射率产品,采用 WGS84 地理坐标系及正弦曲线投影,数据格式为 HDF5。MODIS

L1B 级数据为经过星上辐射定标的辐亮度数据,经过几何定标、像元重采样转换为反射率产品,采用 WGS84 地理坐标系及正弦曲线投影,数据格式为 EOS-HDF。大气气溶胶光学厚度选用 MODIS/Aqua 深蓝算法 C6 版气溶胶光学厚度 (AOD) 产品 MYD04\_L2,像元分辨率为 10 km<sup>[15]</sup>。采用 MODIS MYD06 L2 云掩模产品进行定标场上空云和云影的辅助剔除,该产品具有与 MODIS L1 级数据相同的像元分辨率。选用 VIIRS/Suomi NPP 的地表 BRDF 产品 VNP43C1<sup>[16]</sup>,对定标场地表方向反射特性进行精细化校正。VNP43C1 产品提供卫星过境时 16 d 平均的 Ross Thick LiSparse(Ross\_Li)模型三参数、空间分辨率为 0.05 $^{\circ}$  的全球网格,探测波段覆盖 412,445,488,555,672,672,865,1240,1610,2250 nm 共 10 个通道,涵盖 DPC/GaoFen-5 和 MODIS/Aqua 交叉定标的 5 个波段。这里未选用 MODIS BRDF 产品的原因是该产品波段范围覆盖 469,555,645,865,1240,1640,2130 nm 这 7 个波段,无法覆盖 DPC 443 nm 波段,且与 DPC 的 490 nm 波段波长差距较大,在进行光谱波段插值时会产生较大不确定度(尤其在 443 nm 光谱外插时)。

## 3 在轨交叉定标方法

### 3.1 定标原理

卫星在轨交叉辐射定标实际上是基于相同轨道的



参考传感器和待定标传感器在同一时刻观测同一地面目标时反射率理论上相同的原理,将参考传感器的高精度定标系数传递到待定标传感器上的过程。而由于卫星实际运行情况往往难以达到观测目标、角度、光谱响应等完全一致的理想状态,因此需利用大气辐射传输模型进行辐射差异校正。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、远离城市和工业区、环境污染少等条件的沙漠区域。国际上常用的定标场地主要有北非和阿拉伯半岛的 20 个沙漠准不变定标场,经美国地质调查局(USGS)对这些站点长期测量和监测,发现各站点空间均一性优于 3%,且其地表反射特性几乎不随时间发生变化<sup>[17]</sup>。

卫星在轨交叉辐射定标算法流程如图 2 所示: 1) 从沙漠定标场筛选晴朗无云区域作为定标区域; 2) 根据两传感器的像元空间分辨率和观测时间,对定标区域内观测数据进行像元时空匹配,并根据两传感器太阳和观测角度匹配阈值,进一步筛选几何角度相匹配的像元对; 3) 利用卫星地表 BRDF 产品模拟两传感器地表方向反射率,并进行光谱插值,得到两传感器相应波段的地表方向反射率; 4) 根据大气参数产品和地表方向反射率,以及两传感器的光谱响应函数,通过 6SV 模拟计算待交叉定标波段的 SBAF; 5) 利用参考传感器观测的表观反射率和步骤 4) 计算的 SBAF,计算待定标传感器表观反射率的参考值,最终得到待定标传感器的辐射定标系数或辐射定标校正系数。

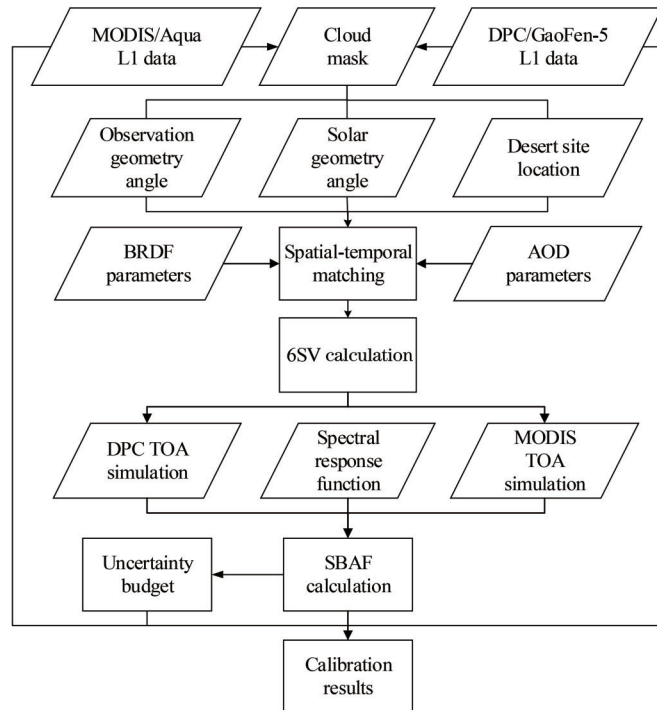


图 2 沙漠场在轨交叉辐射定标流程

Fig. 2 In-flight cross radiative calibration process over desert site

### 3.2 定标流程

#### 1) 云掩模

云和云影由于方向反射特性复杂,不适用于交叉定标。利用MODIS和DPC各自的云掩模产品进行云和云影的剔除,当任意一个产品将像元识别为云和云影时,认为该像元为云像元。其中DPC云掩模利用的是波段阈值法进行识别,要求 $\rho_{443} < 0.55$ ,  $\rho_{490} < 0.55$ ,  $\rho_{670} < 0.2$ ,  $\rho_{763} < 0.2$ ,  $\rho_{765} < 0.2$  ( $\rho$ 代表反射率,下标代表波长)。基于准不变沙漠场地均一性优良的特点,剔除 $3 \times 3$ 窗口内反射率差异大于2%的像元,该类像元可能包含薄云和云影。剔除以上所有识别为云和云影的像元,并剔除周边一定距离的像元以防止引入混合像元带来的不确定性,最终得到可用于交叉定标计算的两传感器匹配像元对的遥感数据集。图3给出了DPC云掩模结果示例。

#### 2) 像元匹配

通过临近像元平均的方法将高分辨率MODIS数据的分辨率降低到与DPC像元分辨率一致,并进行像元时空匹配。像元匹配距离阈值设置为DPC像元大小的 $2/3$ ,并且去除图像边缘像元以减小成像时的像元形变造成的不确定性。此外,基于DPC L1级数据日期和像元地理位置,逐像元进行MYD04\_L2以及VNP43C1辅助数据的相同观测日期及地理位置的时空匹配操作。为了减小气溶胶贡献带来的不确定性,筛选AOD小于0.4的清洁大气条件下的像元作为定标样本。

交叉定标要求传感器太阳-观测几何相近,可通过太阳入射角度和卫星观测角度进行筛选匹配,几何角度匹配规则如下:

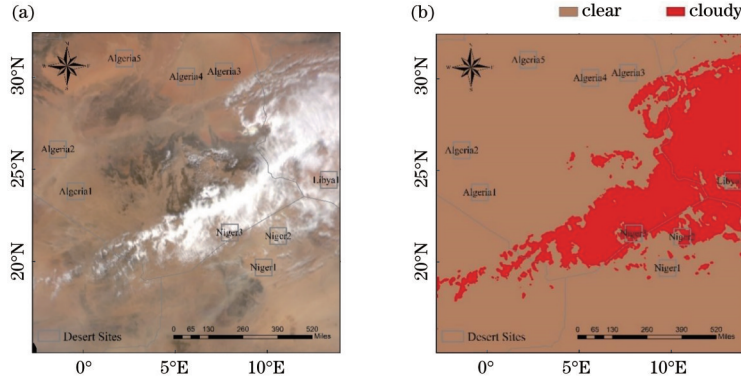


图 3 DPC 沙漠场地上空云识别结果。(a)真彩色合成图;(b)云掩模图

Fig. 3 DPC cloud identification results over desert sites. (a) True color band fusion image; (b) cloud mask image

$$\begin{cases} S_{DPC} - S_{MOD} \leq 3^\circ \\ V_{DPC} - V_{MOD} \leq 3^\circ \\ R_{DPC} - R_{MOD} \leq 5^\circ \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $S_{DPC}$  和  $S_{MOD}$  分别代表 DPC 和 MODIS 的太阳天顶角;  $V_{DPC}$  和  $V_{MOD}$  分别代表 DPC 和 MODIS 的观测天顶角;  $R_{DPC}$  和  $R_{MOD}$  分别代表 DPC 和 MODIS 的太阳-卫星相对方位角。角度匹配阈值可根据定标样本数量进行适当调整,可适当放宽调整为  $5^\circ$ 、 $5^\circ$  和  $10^\circ$ 。

### 3) 地表方向反射特性校正

尽管经像元匹配后两传感器观测几何相近,但这种方向反射差异对于卫星传感器在轨辐射定标是不容忽视的<sup>[18]</sup>,因此需对地表方向反射特性进行精确校正。选择 VNP43C1 逐日地表 BRDF 产品,精确模拟所需角度的地表方向反射率。

卫星传感器接收到的大气层顶表观信号主要由大气和地表信号构成,在假设地表为朗伯体时<sup>[19]</sup>,大气层顶表观反射率可表示为

$$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \frac{\rho_t}{1 - \rho_t S} T(\theta_s) T(\theta_v), \quad (2)$$

式中:  $\theta_s$  和  $\theta_v$  分别是太阳天顶角和观测天顶角;  $\varphi$  表示传感器与太阳的相对方位角;  $\rho_a$  代表大气反射率;  $\rho_t$  是地表反射率;  $S$  为大气球面反照率;  $T(\theta_s)$  和  $T(\theta_v)$  分别代表总上行和下行透射率。当地表为非朗伯体时,地表反射率可利用半经验 BRDF 模型表示, BRDF 模型主要由各向同性散射、体散射、几何光学散射 3 个参数组成,通过 BRDF 模型可精确校正定标场地的方向反射差异。

由于 VNP43C1 产品的光谱通道中心波长与 DPC 略微存在差异,本研究利用光谱内插的方法得到 MODIS 和 DPC 两个传感器观测方向的波段方向反射率。插值方法具体步骤为: 1) 利用 VNP43C1 BRDF 模型参数值分别计算 DPC 和 MODIS 观测方向的地表方向反射率,得到产品各通道地表方向反射率; 2) 基于样条函数插值法内插得到如图 4 实线所示的 412~900 nm 光谱范围内的方向反射率值; 3) 通过光谱卷积计算得到 DPC 和 MODIS 相应通道的地表方向反射

率。最终在无地表实测光谱数据的情况下获取待定标传感器观测的场地地表方向反射率。由于沙漠地表光谱较为平滑,且相应通道的波长差异较小,光谱插值引入的地表方向反射率不确定度可忽略不计。

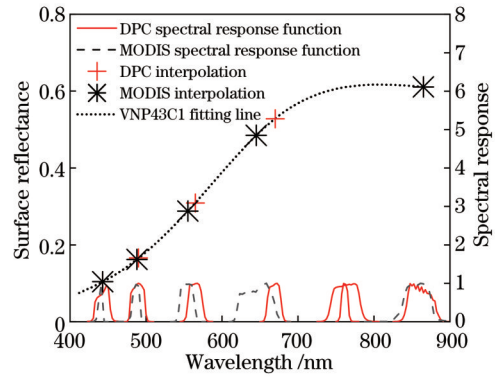


图 4 基于 VIIRS BRDF 产品的 DPC 和 MODIS 方向反射率插值方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of interpolation method for directional reflectance of DPC and MODIS based on VIIRS BRDF product

### 4) 光谱匹配因子计算

假设两传感器观测的是同一大气和地表目标,在考虑传感器的光谱响应函数、观测角度和光照条件差异的情况下,结合地表方向反射特性校正得到的 DPC 和 MODIS 地表方向反射率,通过 6SV 大气辐射传输模型模拟两传感器在不同观测状态下的表观辐亮度值<sup>[19]</sup>,两者的比值即为 SBAF (可用  $S_k$  表示),其计算公式为

$$S_k = \frac{\rho_{TOA\_DPC,k}}{\rho_{TOA\_MOD,k}}, \quad (3)$$

式中:  $k$  代表两传感器匹配的响应通道;  $\rho_{TOA\_DPC,k}$  代表 DPC 的  $k$  波段理论 TOA 反射率;  $\rho_{TOA\_MOD,k}$  代表  $k$  波段 MODIS 理论 TOA 反射率。SBAF 用于校正因待定标传感器与参考传感器间太阳-观测几何和光谱差异引起的表观辐射量差异。交叉定标主要针对两传感器波长范围相近的相应通道进行定标系数的交叉传递,当通道波长和范围差异较大时,难以取得高精度的定标

结果。通过对 DPC 和 MODIS 所有波段光谱进行匹配,得到 443 nm(443 nm)、490 nm(488 nm)、565 nm(555 nm)、670 nm(645 nm)和 865 nm(865 nm)共 5 个相近波段(MODIS 波段),如图 1 所示。

5) 定标系数计算

对于待定标传感器的第  $k$  波段,当其对地面目标进行观测时,卫星遥感图像第  $k$  波段入瞳处表观辐亮度  $L_k$  与表观反射率之间的关系为

$$\rho_k = \frac{\pi d^2 L_k}{E_k \cos \theta_s}, \quad (4)$$

式中: $\rho_k$ 为待定标传感器过顶时刻 $\theta_s$ 对应的表观反射率; $E_k$ 为对应波段的等效太阳辐照度; $d$ 为日地距离校正因子。

结合以上步骤计算的 SBAF,利用 6SV 模拟场地上空表观反射率比值,构建两传感器对应波段的表观辐亮度转换计算模型,通过转换计算模型得到待定标传感器的仿真表观反射率:

$$\rho_{\text{DPC}_{\text{Ref}},k} = S_k \cdot \rho_{\text{MOD},k}, \quad (5)$$

式中: $\rho_{\text{MOD},k}$ 代表 MODIS 的 TOA 观测反射率; $\rho_{\text{DPC}_{\text{Ref}},k}$ 代表利用交叉定标方法模拟得到的 DPC TOA 仿真观测反射率。

利用计算的待定标波段表观反射率参考值和基于原定标系数解算的表观反射率测量值,计算交叉辐射定标校正系数。基于原定标系数解算的表观辐亮度测量值 $\rho_{\text{DPC}_{\text{Mea}}}$ 与待定标波段表观辐亮度参考值 $\rho_{\text{DPC}_{\text{Ref}}}$ 求比值,即得到交叉辐射定标校正系数 $A'_k$ 。交叉辐射定标结果为所有定标样本定标系数的平均值。 $A'_k$ 的计算公式为

$$A'_k = \frac{A_{\text{in-flight},k}}{A_{\text{pre-flight},k}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_{\text{DPC}_{\text{Mea}}}}{\rho_{\text{DPC}_{\text{Ref}}}}, \quad (6)$$

式中: $A_{\text{pre-flight},k}$ 是实验室获取的 DPC 定标系数; $A_{\text{in-flight},k}$ 是利用交叉定标方法得到的在轨定标系数; $\rho_{\text{DPC}_{\text{Mea}}}$ 为

DPC 观测反射率; $N$ 为样本个数。 $A'_k$ 的标准差的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A'_k - \bar{A}'_k)^2}{N - 1}}. \quad (7)$$

4 交叉定标不确定度分析

利用大气辐射传输模型模拟分析卫星在轨交叉辐射定标方法的不确定度。交叉辐射定标方法的不确定度主要来源于参考传感器的定标精度、地表方向反射率、AOD 和气溶胶模型。用于模拟的具体参数设置(表 2)为:参考传感器的定标不确定度设为 MODIS 的 2.0% 的星上定标精度;地表反射率不确定度是指使用输入地表方向反射率与输入 BRDF 时得到的 TOA 反射率的不确定度;气溶胶模型不确定度假设真实气溶胶模型为沙漠型,而交叉定标时输入城市型气溶胶;AOD 模拟范围设为 0.1~0.4,步长为 0.1,AOD 不确定度为 $\pm 0.05 \pm 0.15$ ;6SV 辐射传输模型的计算不确定度设为 1.0%<sup>[19]</sup>,计算不确定度包含了 6SV 内置的太阳光谱辐照度曲线与 DPC 产品使用的太阳光谱辐照度数据的差异、辐射传输模型计算误差等。两传感器观测时刻的太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角差异分别设为 $3^\circ$ 、 $3^\circ$ 和 $5^\circ$ 。太阳天顶角设为 $0^\circ \sim 50^\circ$ ,步长为 $10^\circ$ ;观测天顶角设为 $0^\circ \sim 60^\circ$ ,步长为 $10^\circ$ ;相对方位角设为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ,步长为 $45^\circ$ 。大气和地表参数不确定度为所有角度下不确定度的平均值。

卫星在轨交叉辐射定标方法的理论不确定度分析结果如表 2 所示。由表 2 可知,各波段定标总不确定度在 2.41%~3.70% 之间。不确定度主要来源于地表 BRDF 和参考传感器本身的定标精度,大气参数不确定度影响均较小,其中气溶胶模型的影响可能与不同类型气溶胶的散射函数存在差异相关。

表 2 本研究中交叉定标方法的不确定度分析

Table 2 Uncertainty analysis of cross calibration method in this research

Uncertainty source	Reference	Input uncertainty	Total uncertainty / %				
			443 nm	490 nm	565 nm	670 nm	865 nm
Reference sensor calibration	—	—	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Surface reflectance	BRDF	Surface directional reflectance	1.42	0.67	2.3	2.92	1.09
Aerosol model	Desert	Urban	0.42	0.57	0.45	0.36	0.5
AOD	0.1-0.4 with step of 0.1	$\pm 0.05 \pm 0.15$	0.21	0.20	0.17	0.11	0.07
Radiative transfer model	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Total uncertainty	—	—	2.69	2.41	3.24	3.70	2.54

为了详细分析地表方向特性引起的不确定度,利用两传感器各自方向的 BRDF 输入辐射传输模型计算 SBAF 的精确值,再使用替代的垂直方向的地表反射率作为地表输入计算 SBAF 的替代值,通过二者的比值即可确定在输入 BRDF 时 SBAF 的不确定度的影响<sup>[18]</sup>。设置太阳天顶角为 $10^\circ$ 、相对方位角为 $60^\circ$ 时,不确定度分析结果如图 5 所示。结果表明:各波段

SBAF 不确定度在观测天顶角小于 $50^\circ$ 时小于 3%,在观测天顶角大于 $50^\circ$ 时不确定度均明显增大,在 443, 565, 670 nm 观测天顶角为 $70^\circ$ 时不确定度分别为 5.15%、4.17% 和 4.01%,而 490 nm 和 865 nm 处的不确定度对地表方向特性敏感性很低,整体不确定度低于 2%。这说明若不进行地表方向特性校正,在大观测天顶角下的短波段定标将产生较大误差,因此在大



观测天顶角下 443, 565, 670 nm 交叉定标的 BRDF 校正能有效提高定标精度。

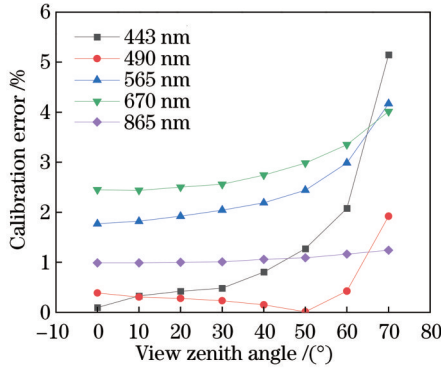


图 5 不同观测天顶角下地表 BRDF 对交叉定标不确定度的影响

Fig. 5 Uncertainty of cross calibration caused by surface BRDF at different view zenith angles

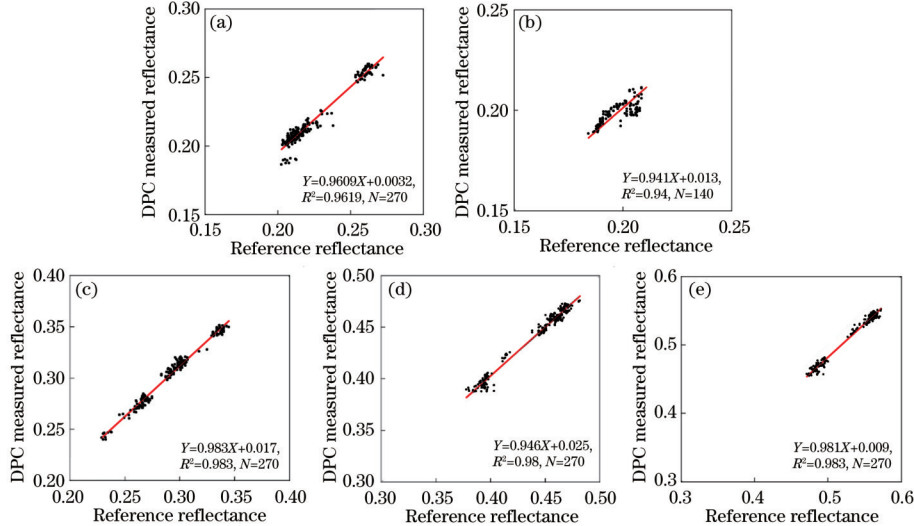


图 6 DPC 在轨交叉定标理论参考反射率与观测反射率对比图。(a) 443 nm 波段; (b) 490 nm 波段; (c) 565 nm 波段; (d) 670 nm 波段; (e) 865 nm 波段

Fig. 6 Comparison of theoretical reference reflectance and observed reflectance for DPC in-flight cross calibration. (a) 443 nm band; (b) 490 nm band; (c) 565 nm band; (d) 670 nm band; (e) 865 nm band

DPC 与 MODIS 交叉辐射定标校正系数结果如表 3 所示。结果显示: DPC 的 5 个交叉定标波段与 MODIS 相应波段的辐射差异均小于 4%, 定标样本  $A'_k$  的标准差约为 0.8%~2.25%; 670 nm 波段 DPC 与 MODIS 辐射一致性最好, 二者相对偏差最小; 490 nm 波段二者相对偏差仅次于 670 nm 波段, 约为 1%; 443 nm、865 nm 波段二者相对偏差分别约为 2.5% 和 3.5%; 565 nm 波段二者相对偏差最大, 约为 4%, 这可能由两传感器在该波段光谱响应函数差异较大所致。交叉定标结果与海洋瑞利散射、太阳耀光、沙漠场地定标结果一致<sup>[3,5]</sup>, 这说明本文方法的精度较高, 定标结果可靠。而这些不同亮度自然地物定标结果仍一致, 说明了 DPC 传感器动态范围内的线性响应良好。

## 5 结果与分析

选取 GaoFen-5 在轨测试期间 (2018 年 6 月) DPC 观测数据与 MODIS/Aqua 数据进行了交叉辐射定标。经像元质控和数据匹配后, 获得 Algeria5, Arabia1, Mali1, Niger1 和 Niger2 共 5 个沙漠定标场交叉定标样本, 各波段交叉定标样本和结果如图 6 和表 3 所示。由于选择了多个不同的沙漠定标场, 场地间地表反射亮度不同, 因此各波段定标样本的反射率可覆盖不同的亮度区间。结果表明 DPC 与 MODIS 交叉定标反射率与 DPC 观测反射率有很好的 consistency。各波段下二者的线性拟合斜率在 0.941~0.983 之间, 截距介于 0.003~0.025 之间, 这表明 DPC 观测值与交叉定标参考值之间拟合效果良好, 未出现明显差异。由于 MODIS 490 nm 波段设计主要用来观测海洋目标, 在亮地表沙漠上空的观测值有可能超出其动态范围, 因此可用于交叉定标的样本较少, 这导致拟合结果稍差。

表 3 DPC/GaoFen-5 与 MODIS/Aqua 交叉辐射定标系数与定标样本  $A'_k$  的标准差

Table 3 Cross radiometric calibration coefficients and standard deviation of calibration samples  $A'_k$  of DPC/GaoFen-5 and MODIS/Aqua

Band	443 nm	490 nm	565 nm	670 nm	865 nm
$A'_k$	0.975	1.010	1.040	1.000	0.965
$\sigma$	0.0183	0.0225	0.0137	0.0108	0.0080

文献 [10] 中 POLDER/PARASOL 与 MODIS 在 443, 490, 565, 670, 865 nm 波段的交叉辐射定标系数分别为 1.061, 1.042, 0.982, 1.028, 1.013, 样本标准差分别为 0.069, 0.053, 0.037, 0.028, 0.022。将 DPC 和 POLDER 各自与 MODIS 交叉辐射定标系数进行

横向对比,结果表明 DPC 与 MODIS 的辐射一致性和 POLDER 与 MODIS 的辐射一致性相当。这说明国产卫星传感器 DPC/GaoFen-5 数据能够在时间序列上填补 POLDER 型多角度偏振卫星探测数据的空缺,为大气气溶胶和云长时间序列研究提供数据支撑。

## 6 结 论

高精度可靠的辐射定标对卫星遥感应应用至关重要。尽管 DPC 在发射之前进行了系统级的实验室定标,其辐射特性仍会因受发射过程和轨道衰变的影响而发生变化。由于 DPC 没有装备星上定标器,因此需要多种独立的方法进行在轨替代辐射定标和相互验证。本文发展了一种基于辐射传输计算的 DPC 与 MODIS 的在轨交叉辐射定标方法,利用卫星实时 BRDF 产品对传感器间的光谱响应和地表方向反射差异进行校正,成功将 MODIS/Aqua 高精度星上辐射定标系数传递至 DPC/GaoFen-5 上,实现了 DPC 与 MODIS 观测辐射一致性的验证。

基于辐射传输模拟分析了该卫星在轨交叉辐射定标方法的不确定度,结果表明:在 DPC 的 443~865 nm 探测波段,定标方法的不确定度约为 2.54%~3.94%。最大不确定度因素为地表 BRDF 影响,且该不确定度影响随观测天顶角的增大而增大。DPC 与 MODIS 的交叉辐射定标结果表明 DPC 与 MODIS 各波段辐射一致性优于 4%。通过对比 POLDER 与 MODIS 的交叉辐射定标结果,发现国产 DPC/GaoFen-5 观测数据能够在时间序列上填补 POLDER 型星载偏振多角度探测数据的空缺,为大气气溶胶和云的长时间序列研究提供重要数据支撑。同时本研究也为我国后续即将发射的 DPC 型载荷的在轨辐射定标和时序监测提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [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] 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.
- [4] 李照洲, 伽丽丽, 谢一淦, 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.  
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.
- [5] 陈斐楠, 樊依哲, 洪津, 等. 高分五号多角度偏振探

仪可见光波段在轨辐射定标研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2328001.

Chen F N, Fan Y Z, Hong J, et al. In-flight radiation calibration of a directional polarimetric camera at visible bands onboard GF-5[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2328001.

- [6] 彭光雄, 何宇华, 李京, 等. 中巴地球资源 02 星 CCD 图像交叉定标与大气校正研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(1): 22-25, 34.  
Peng G X, He Y H, Li J, et al. Study on CBERS-2' CCD image cross calibration and atmospheric correction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(1): 22-25, 34.
- [7] Teillet P M, Barker J L, Markham B L, et al. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(1/2): 39-54.
- [8] Chander G, Angal A, Choi T, et al. Radiometric cross-calibration of EO-1 ALI with L7 ETM and terra MODIS sensors using near-simultaneous desert observations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(2): 386-399.
- [9] Feng L, Li J, Gong W S, et al. Radiometric cross-calibration of Gaofen-1 WFV cameras using Landsat-8 OLI images: a solution for large view angle associated problems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 56-68.
- [10] Lacherade S, Fournie 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.
- [11] 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.
- [12] 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.  
Tu B H, Hong J, Yao P P, et al. Polarization detection performance of directional polarimetric camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0712003.
- [13] 张苗苗, 孟炳寰, 钱鸿鹄, 等. 多角度偏振成像仪杂散光校正方法研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1112003.  
Zhang M M, Meng B H, Qian H H, et al. Research on correction method of stray light in directional polarization camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1112003.
- [14] Xiong X X, Sun J Q, Xie X B, et al. On-orbit calibration and performance of aqua MODIS reflective solar bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 535-546.
- [15] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, et al. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: the second generation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(16): 9296-9315.
- [16] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction



- of remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D18): 20455-20468.
- [17] 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.
- [18] Wang Z, Xiao P F, Gu X F, et al. Uncertainty analysis of cross-calibration for HJ-1 CCD camera[J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(3): 713-723.
- [19] 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.