

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.002

GF-5 卫星多角度偏振成像仪在轨偏振定标

李照洲¹, 伽丽丽², 谢一淞², 朱思峰², 李正强², 潘志强¹

(1 中国资源卫星应用中心, 北京 100094;

(2 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘 要: 2018 年 5 月, 我国成功发射了高分 5 号卫星, 其上搭载了多角度偏振成像仪。卫星载荷受发射时的振动、在轨空间环境变化以及元器件电路系统老化等因素的影响, 各种辐射特性发生变化, 从而导致整个载荷辐射性能与在轨前的实验室定标结果之间存在一定偏差。基于海洋耀光对高分 5 号卫星多角度偏振成像仪的偏振测量定标的方法, 并利用在轨测试期间数据, 对载荷进行了初步的偏振辐射定标测试。测试结果表明, 3 个偏振波段 (490, 670, 865 nm) 线偏振度测量值与理论值有很好的 consistency, 平均偏差分别约为 -0.03 、 -0.04 、 -0.01 , 载荷发射前后偏振测量状态未发生明显改变。基于自然目标的在轨替代定标方法, 还可用于多角度偏振成像仪偏振辐射性能随时间变化情况的长期监测。

关键词: 定标; 线偏振度; 太阳耀光; 多角度偏振成像仪

中图分类号: P407.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)01-0018-06

In-Flight Polarimetric Calibration of Directional Polarization Camera on GF-5 Satellite

LI Zhaozhou¹, QIE Lili², XIE Yisong², ZHU Sifeng², LI Zhengqiang², PAN Zhiqiang¹

(1 China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China;

2 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Chinese GF-5 satellite was launched successfully in May 2018, which was equipped with a directional polarization camera (DPC). The DPC sensor's radiometric characterization may be affected by many factors, such as the vibration during launch, the outgassing when instrument leaves atmosphere, the ageing of the optics and circuit system, resulting in a certain deviation between the in-flight performance and the preflight radiometric calibration. Based on the in-flight calibration method for polarization measurements of DPC, using the sunlight reflected within the sun's glitter over ocean, the DPC measurements were adopted during its commissioning phase. The preliminary result shows that the measured degree of linear polarization values are consistent with the theoretically values, with small average deviations of -0.03 , -0.04 , -0.01 for 490, 670, 865 nm bands, respectively. It indicates that the DPC's polarimetric characterization have not been changed significantly after launch. This method is based on natural target, and it can be used to monitor the temporal polarimetric sensitivity of DPC.

Key words: calibration; degree of linear polarization; the sun glint; directional polarization camera

基金项目: Supported by High-Resolution Earth Observation System of Systems(高分专项 [2016]640 号)

作者简介: 李照洲 (1975 -), 甘肃兰州人, 博士, 研究员, 主任设计师, 主要从事陆地观测卫星辐射定标、几何检校、GF-5 及“空基”专项卫星偏振载荷定标相关方面的研究。 **E-mail:** zzli_010@qq.com

收稿日期: 2018-12-02; **修改日期:** 2018-12-14

1 引言

卫星偏振测量是大气遥感的一种重要手段。大气散射辐射具有明显的偏振特性, 且与大气中粒子的光学和微物理特性密切相关^[1]。偏振探测不仅为大气遥感提供了新的信息维度, 同时还具有地表贡献相对较弱、对大气中粒子的尺度、形状等微物理特性更敏感等优点^[2], 因此, 可以有效提高气溶胶、云等大气成分的遥感精度。

2018 年 5 月, 我国成功发射了高分 5 号卫星 (GF-5), 其上搭载了多角度偏振成像仪 (Directional polarization camera, DPC)^[3], 主要探测目标为大气气溶胶和云, 可应用于大气环境监测和气候变化研究等领域。DPC 具备多角度、多光谱和偏振探测能力。DPC 采用面阵 CCD 探测器, 可获取沿轨和穿轨方向 $\pm 50^\circ$ 视场范围内 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 观测, 星下点像元大小为 3.3 km , 幅宽 1850 km ; 利用滤光片 - 偏振片组合转轮的方式实现了可见光、近红外波段共 8 个探测波段 ($443 \sim 910 \text{ nm}$) 测量, 其中 $490, 670, 865 \text{ nm}$ 波段为偏振测量波段; DPC 通过在卫星飞行过程中沿轨快速框幅式摄影, 形成大量影像的重复覆盖, 实现每个地面像元至少 9 个角度的观测。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。卫星发射前, GF-5-DPC 经过系统的实验室辐射定标, 各波段的强度辐射测量误差小于 5%, 线偏振度 (Degree of linear polarization, DOLP) 测量误差小于 0.02。然而, 卫星发射后, 传感器受发射时的振动、在轨空间环境变化以及元器件电路系统老化等因素的影响, 各种辐射特性发生变化, 从而导致传感器辐射性能与在轨前实验室定标结果之间存在一定的偏差。

GF-5-DPC 不具备星上辐射定标系统, 为对 DPC 传感器在轨前后辐射性能进行检测, 并监测传感器在轨后辐射性能随时间变化情况, 需发展基于自然目标的在轨替代定标方法^[4-6], 对 DPC 辐射测量进行实时定标。本文将介绍一种基于海洋耀光的 GF-5-DPC 偏振测量定标方法, 并利用在轨测试期间观测数据, 对 GF-5-DPC 进行初步的偏振辐射定标测试。

2 定标原理

2.1 DPC 偏振测量

DPC 光学系统由广角像方远心成像物镜、滤光片 - 偏振片组合转轮和面阵 CCD 探测器组成^[7]。对于偏振探测波段, 每个波段占用 3 个探测通道, 分别利用 3 个相对方向为 0° 、 60° 和 120° 的偏振片进行检偏, 测量入射光的偏振状态。地气系统反射的太阳辐射通常为部分偏振光。假设 DPC 光学系统中的镜头、滤光片和偏振片均为理想元件, 则某一偏振通道探测到的辐射强度为

$$I_a = \frac{I_{\text{np}}}{2} + I_{\text{pol}} \cos^2(\chi - \alpha_a), \quad (1)$$

式中 I_{np} 为非偏振光强度, I_{pol} 为线偏振光强度, 总辐射强度 I 为 I_{np} 和 I_{pol} 之和; χ 为偏振角, α_a 表示第 a 个通道的偏振片检偏方向; 线偏振度 $P = I_{\text{pol}}/I$ 。利用 3 个不同检偏方向的偏振通道所观测的 I_a , 可联立方程组求解出入射光的偏振态 $[I, P, \chi]^T$ 。DPC 实际的偏振测量需考虑光学镜头起偏度、偏振片绝对透过率、不同通道偏振片 - 滤光片组合相对透过率、光学镜头不同像素间相对透过率等多种因素的影响, 在轨前经过详细的实验室定标确定出整个偏振测量系统的现实模型参数, 才能获取精确的入射光偏振态测量结果^[7]。

2.2 在轨偏振定标

海洋耀光具有强偏振特性, 其反射易于通过海面耀光反射模型精确计算^[8], 可以作为偏振定标的强偏

振替代光源。大气顶卫星观测到的太阳耀光，会同时受到大气分子和气溶胶散射、海水离水辐射、白帽反射、气体吸收等因素的干扰。卫星观测的海面耀光区大气顶反射率 ρ 和偏振反射率 ρ^{pol} 可近似表示为^[9]

$$\rho \cong (\rho_g + \rho_w + \rho_f) \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a, \quad (2)$$

$$\rho^{\text{pol}} \cong \rho_g^{\text{pol}} \exp(-M\delta) + \rho_m^{\text{pol}} + \rho_a^{\text{pol}}, \quad (3)$$

式中 ρ_m 和 ρ_m^{pol} 为分子散射项， ρ_a 和 ρ_a^{pol} 为气溶胶散射项； ρ_w 为海面离水反射率，是叶绿素浓度的函数； ρ_f 为海面白帽反射率，是风速的函数； M 为大气质量， δ 为大气总光学厚度。其中， ρ_w 和 ρ_f 通常假设为朗伯反射，为非偏振项。大气顶线偏振度为

$$P = \rho^{\text{pol}} / \rho, \quad (4)$$

在海面风速较小，且洁净深海水体的条件下，海面白帽反射和离水辐射贡献可近似忽略，则大气顶线偏振度可近似表示为

$$P \cong \frac{\rho_g P_g \exp(-M\delta) + \rho_m P_m + \rho_a P_a}{\rho_g \exp(-M\delta) + \rho_m + \rho_a}, \quad (5)$$

式中 P_g 、 P_m 、 P_a 分别为海面耀光反射、大气分子、气溶胶贡献项的线偏振度。精确计算大气顶偏振还需考虑不同贡献项间的耦合，可通过海-气耦合的矢量辐射传输模式实现。

3 定标方法与结果

3.1 定标流程

从 GF-5 卫星 DPC 观测数据中选取海洋耀光区域数据，利用大气辐射传输模式计算大气顶传感器入

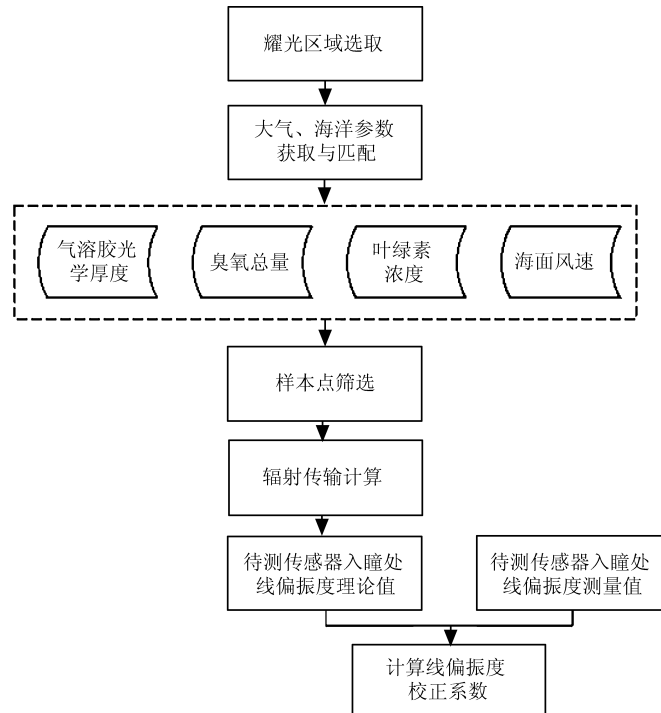


图 1 海洋耀光偏振定标流程

Fig.1 Flowchart for the polarization calibration using the sun glint over ocean

瞳处的偏振辐射理论值, 与传感器实际测量值进行比较。海洋耀光偏振定标流程如图 1 所示。首先, 从 DPC 观测数据中选取晴朗清洁并满足耀光发生条件的海域数据; 其次, 获取与定标区域时空匹配的其他大气、海洋辅助参数, 并筛选出满足海洋耀光偏振定标条件的数据样本; 然后, 利用大气辐射传输模式, 计算传感器入瞳处线偏振度理论值; 最后, 将传感器入瞳处线偏振度实测值与理论值进行比较, 获取线偏振度校正系数, 即定标系数。

3.2 定标数据选取

从 DPC 在轨测试期间获取的 1 级数据中, 选取晴朗无云的深海海域, 从快视图上初步选取太阳耀光区域, 共获取 2018 年 5 月 27 日、8 月 20 日、8 月 22 日的 4 个区域数据用于定标。选取的定标区域具体情况如图 2 和表 1 所示。然后, 下载定标区域大气、海洋辅助参数数据, 包括气溶胶光学厚度、叶绿素浓度、臭氧总量、海面风速风向等产品, 与 DPC 数据进行时间空间匹配。经筛选后, 共获得 1270 个满足海洋耀光偏振定标条件的数据样本。各定标区域日期、轨道号信息见表 1。

表 1 海洋耀光定标区域选取

Table 1 The sun glint calibration regions

序号	日期	轨道号
图 2(a)	2018-05-27	009912
图 2(b)	2018-05-27	009911
图 2(c)	2018-08-20	001518
图 2(d)	2018-08-22	001547

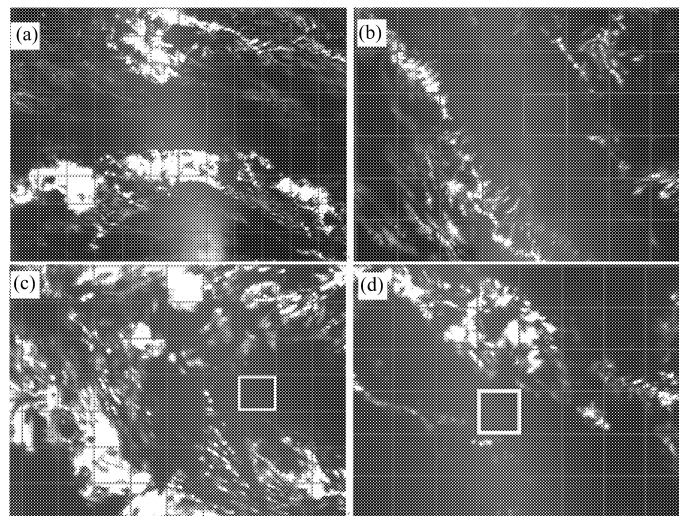


图 2 海洋耀光定标区域快视图

Fig.2 Locations of the sun glint calibration over ocean

3.3 定标结果

将定标样本的太阳、观测几何和匹配好的大气、海洋辅助参数, 及 DPC 3 个偏振波段的光谱响应函数, 输入大气辐射传输模式, 计算得到传感器入瞳处线偏振度的理论值, 与 DPC 的实际测量值进行比较。图 3 所示为 DPC 490, 670, 865 nm 3 个偏振波段 DOLP 理论值与实际测量值散点图。由图 3 可知, 定标区域获取的样本的 DOLP 变化范围约为 0.2~0.8。在该范围内, 3 个波段 DOLP 测量值与计算值均有很好的 consistency。

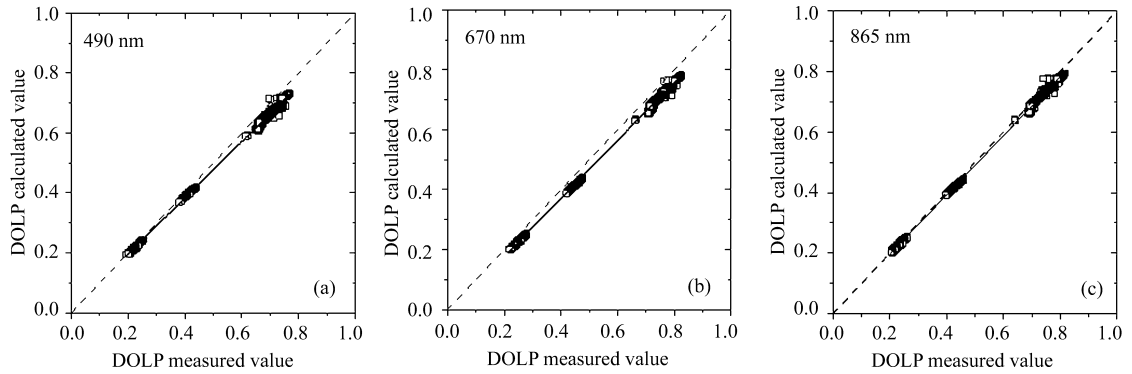


图3 海洋耀光线偏振度实际测量值与理论值散点图

Fig.3 Comparison between DPC measured DOLP and calculated value of the sun glint over ocean

计算偏振波段 DOLP 测量值与理论值的平均偏差

$$\delta_P = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{mea}} - P_{\text{cal}}}{N}, \quad (6)$$

计算结果见表 2。490, 670, 865 nm 波段 DOLP 测量值与理论值平均偏差分别约为 -0.03 、 -0.04 、 -0.01 。

表 2 DPC 海洋耀光线偏振度测量与理论值平均偏差

Table 2 Average deviations between DPC measured DOLP and calculated value of the sun glint over ocean

Wavelength (nm)	490	670	865
δ_P	-0.0295	-0.0371	-0.0123

进一步对各波段 DOLP 测量值与理论值进行线性拟合, 获取偏振波段 DOLP 测量校正系数, 即截距 a 和斜率 b , 作为此次定标结果

$$P_{\text{cal}} = a + bP_{\text{mea}}, \quad (7)$$

3 个波段偏振定标系数 a 和 b 如表 3 所示。由表 3 可知, 此次定标, 3 个波段 DOLP 测量值与理论值具有很好的线性相关性, 相关系数均在 0.998 以上。其中, 865 nm 波段截距 a 最接近 0, 为 0.0001; 斜率 b 最接近 1, 为 0.9804。

表 3 DPC 线偏振度定标系数

Table 3 Calibration coefficients for DPC DOLP measurements

Wavelength (nm)	a	b	R^2
490	0.0087	0.9374	0.9986
670	-0.0165	0.9686	0.9992
865	0.0001	0.9804	0.9992

综合 DPC 偏振波段 DOLP 测量值与理论值平均偏差和线性拟合结果, DPC 在轨后的偏振测量与在轨前实验室定标相比, 865 nm 波段二者结果最为一致, 490 nm 和 670 nm 波段二者偏差相对稍大。但由于 DPC 传感器 DOLP 测量标称误差为 0.02, 海面太阳耀光 DOLP 理论模拟误差约为 $0.02^{[9]}$, 本次在轨定

标各偏振波段测量值与理论值的平均偏差仍在二者误差限 (0.04) 以内, 此次结果表明 DPC 传感器发射前后偏振测量状态未发生明显改变。

4 结 论

海洋太阳耀光具有强偏振特性, 可作为卫星传感器在轨偏振定标的强偏振自然光源。利用 GF-5-DPC 在轨测试期间的海洋耀光数据, 对 GF-5 卫星发射后 DPC 传感器的偏振测量结果进行了初步验证, 并通过线性拟合初步获取了 DPC 偏振探测波段线偏振度校正系数。验证结果表明, DPC 偏振波段 DOLP 测量值与理论计算值有很好的 consistency, 490, 670, 865 nm 3 个波段 DOLP 测量偏差均在 0.04 以内。这表明 DPC 在轨后偏振测量状态与在轨前实验室定标结果相比, 未发生明显变化。但由于目前采用的海洋耀光数据样本仍较少, 获取更可靠的 DPC 的偏振测量精度评价, 有待更多定标样本的积累和进一步验证。

本研究表明了利用海洋太阳耀光这一自然目标对我国 GF-5 卫星 DPC 传感器进行偏振定标的可行性, 该方法还可用于 DPC 偏振辐射性能随时间变化的长期监测。

参考文献:

- [1] Mishchenko M I, Travis L D. Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(16): 98917013.
- [2] Waquet F, Cairns B, Knobelspiesse K, et al. Polarimetric remote sensing of aerosols over land [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**: D01206.
- [3] 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.
- [4] 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**: 15501566.
- [5] Fougnie B, Bracco G, Lafrance B, et al. PARASOL in-flight calibration and performance [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22): 5435-5451.
- [6] 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.
- [7] Qian Honghu, Ye Qinghao, Meng Binghuan, et al. The polarized radiometric theoretical error of spaceborne directional polarimetric camera [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(5): 1558-1565(in Chinese).
钱鸿鹤, 叶擎昊, 孟炳寰, 等. 星载多角度偏振成像仪偏振辐射测量的理论误差分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, **37**(5): 1558-1565.
- [8] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, **44**: 838-850.
- [9] Toubbé B, Bailleul T, Deuzé J L, et al. In-flight calibration of the POLDER polarized channels using the sun's glitter [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(1): 513-524.