

FY-4A/AGRI反射波段的深对流云辐射定标方法研究

张北^{1,2}, 胡秀清^{1,2*}, 周为伟^{1,3}, 沙金⁴, 陈林^{1,2}

1. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心),北京 100081;
2. 许健民气象卫星创新中心,北京 100081;
3. 河南理工大学,河南 焦作 454003;
4. 南京航空航天大学,南京 210016

摘要: 风云四号A星(FY-4A)先进的静止轨道辐射成像仪(AGRI)已进入设计寿命末期阶段,部分太阳反射通道的辐射性能出现明显退化,影响了定量遥感产品应用精度。本研究采用基于深对流云(DCC)的定标跟踪方法对AGRI反射波段辐射响应变化进行定量评估。为提高评估的精度和稳定性,研究了DCC方法对红外亮温阈值、像元邻域空间均一性条件和DCC角度分布模型(ADM)的敏感性。结果表明:对于红外亮温阈值,可见光通道DCC反射率均值的敏感性低于概率密度函数(PDF)峰值反射率;而在短波红外通道,DCC PDF峰值反射率的敏感性略低于反射率均值。在可见光-近红外波段采用CERES ADM模型能较好地校正DCC反射率各向异性的影响,且明显优于H_u模型,但两种ADM模型在短波红外波段均无明显校正效果。基于上述敏感性研究优化了DCC方法中的阈值选择和ADM策略,对2017年3月至2023年4月FY-4A/AGRI反射波段的辐射响应进行跟踪评估。结果发现:0.47 μ m、0.65 μ m和2.25 μ m通道出现显著退化,总衰减率分别为45.55%、26.22%和6.362%,该结果为AGRI反射波段定标系数更新提供了参考依据。

关键词: 遥感和传感器,辐射定标,深对流云,先进的静止轨道辐射成像仪,角度分布模型,表观反射率,反射太阳波段

中图分类号: TP732

引用格式: 张北,胡秀清,周为伟,沙金,陈林.XXXX.FY-4A/AGRI反射波段的深对流云辐射定标方法研究.遥感学报,XX(XX):1-11

Zhang Bei, Hu XiuQing, Zhou WeiWei, Sha Jin, Chen Lin. XXXX. Research on the radiometric calibration method for deep convective clouds in the reflective bands of FY-4A/AGRI. National Remote Sensing Bulletin, DOI:10.11834/jrs.20243528]

1 引言

风云四号A星(FY-4A)是我国第二代静止轨道系列气象卫星的首发星,于2016年12月11日成功发射,目前已在轨运行超过6年。FY-4A搭载了一台先进的静止轨道辐射成像仪(Advanced Geostationary Radiation Imager, AGRI),可实现分钟级区域扫描成像。FY-4A/AGRI遥感数据在天气系统预报、生态环境监测、农林水利等领域发挥着重要作用(Yang等,2017)。高精度辐射定标是

定量遥感应用的基础,而仪器在轨运行期间不可避免受到太阳辐照、空间粒子侵蚀和器件老化等因素影响,其辐射性能会出现衰减,直接影响遥感数据质量和定量产品的应用效益。因此,长期跟踪监测星载仪器的在轨辐射性能并进行相应的定标更新,是确保遥感应应用质量不可或缺的环节(Zhang等,2019;杨敏等,2021;李秀举等,2022)。然而,FY-4A/AGRI现有的反射波段星上定标设备和定标算法精度有待提升,需要采用多种在轨替代定标方法开展辐射响应跟踪和衰减

收稿日期:XXXX-XX-XX;预印本:XXXX-XX-XX

基金项目:国家重点研发计划课题:空间辐射测量基准溯源全链路误差传递指标体系研究(编号:2022YFB3902901)

第一作者简介:张北,研究方向为传感器辐射定标的理论和应用。E-mail:kevincol22@aliyun.com

通信作者简介:胡秀清,研究方向为卫星遥感器辐射定标、遥感数据预处理及质量提升、遥感反演科学算法和遥感大数据应用等方面。E-mail:huxq@cma.cn

校正。

深对流云 (Deep Convective Cloud, DCC) 是对流旺盛、顶部极冷且在可见光波段非常明亮的稳定目标。DCC在可见光 (Visible, VIS)、近红外 (Near Infrared, NIR) 和短波红外 (Short-wave Infrared, SWIR) 光谱平坦, 具有稳定的反射率、接近于朗伯体 (Lambertian) 各向同性特点, 并且 DCC 上方的水汽和气溶胶含量极少 (Chen 等, 2013)。近年来, 国内外学者广泛使用基于 DCC 目标的在轨替代定标方法对卫星光学传感器进行辐射性能跟踪评估。Hu 等人最早根据红外亮温 (Brightness Temperature, BT) 阈值和云光学厚度识别 DCC 目标, 通过跟踪 DCC 月度反照率的变化评估多种星载仪器辐射性能的稳定性 (Hu 等, 2004)。Doelling 等人首次使用 DCC 定标方法评估了第一代 NOAA 卫星高级甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 的辐射性能退化 (Doelling 等, 2004)。Wang 等人基于 DCC 目标对 NPP 和 VIIRS 传感器进行了 10 年长时间序列的辐射响应评估, 证明了 DCC 定标方法的可靠性 (Wang 等, 2022)。周为伟等人基于日本葵花 8 号 (Himawari-8) 成像仪在不同观测角度区间的平均反射率来表征 DCC 双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 特性并进行建模, 在短波红外通道取得了较好的各向异性校正效果 (周为伟等, 2023)。然而, DCC 定标跟踪方法依赖于大样本统计分析, 但在先前的研究中对该方法可能受到的影响因素缺乏系统性分析, 这些因素会对定标精度和稳定性产生不可忽视的影响。因此, 本文重点研究 DCC 定标跟踪方法中红外亮温阈值、DCC 像元邻域空间均一性和 DCC 反射率角度分布模型 (Angular Distribution Model, ADM) 等主要影响因素的敏感性。根据分析结果建立最优方案, 并采用优化后方法定量评估 FY-4A/AGRI 反射波段辐射性能变化。

2 仪器和方法

2.1 FY-4A/AGRI

FY-4A/AGRI 是一种星载多通道辐射成像仪, 具有精密设计的双扫描镜机构, 能够实现精确的二维指向和分钟级快速扫描。AGRI 的观测数据应用于数值天气预报模式、卫星辐射资料同化、气

候变化研究、大气温湿度廓线以及云、大气痕量、气体成分等研究方向。FY-4A/AGRI 具有 14 个光谱通道: 3 个可见光/近红外通道, 3 个短波红外通道, 2 个中波红外通道, 2 个水汽通道和 4 个长波红外通道 (Yang 等, 2017), 具体指标见表 1。

表 1 FY-4A/AGRI 光谱波段指标
Table 1 FY-4A/AGRI spectral bands specifications

Band	Central wave-	Spectra band-	Sensitivity
	length (μm)	width (μm)	
1	0.470	0.45~0.49	$S/N \geq 90 @ \rho = 100\%$
2	0.650	0.55~0.75	$S/N \geq 200 @ \rho = 100\%$
3	0.825	0.75~0.90	$S/N \geq 200 @ \rho = 100\%$
4	1.375	1.36~1.39	$S/N \geq 90 @ \rho = 100\%$
5	1.61	1.58~1.64	$S/N \geq 200 @ \rho = 100\%$
6	2.25	2.1~2.35	$S/N \geq 200 @ \rho = 100\%$
7	3.75	3.5~4 (High)	$NE\Delta T \leq 0.7K @ 300K$
8	3.75	3.5~4 (Low)	$NE\Delta T \leq 0.2K @ 300K$
9	6.25	5.8~6.7	$NE\Delta T \leq 0.3K @ 260K$
10	7.10	6.9~7.3	$NE\Delta T \leq 0.3K @ 260K$
11	8.50	8.0~9.0	$NE\Delta T \leq 0.2K @ 300K$
12	10.8	10.3~11.3	$NE\Delta T \leq 0.2K @ 300K$
13	12.0	11.5~12.5	$NE\Delta T \leq 0.2K @ 300K$
14	13.5	13.2~13.8	$NE\Delta T \leq 0.5K @ 300K$

2.2 DCC 定标跟踪方法

基础 DCC 定标跟踪方法的步骤是: 首先从 FY-4A/AGRI 观测数据中提取出 DCC 目标像元, 然后计算目标像元的反射率并使用 ADM 进行各向异性校正, 最后构建每日或每月的 DCC 反射率概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 并跟踪其特征值的变化来监测和评估 FY-4A/AGRI 仪器辐射响应性能。

DCC 定标跟踪方法的关键是准确地识别 DCC 目标像元。在卫星观测下, 深对流云团具有高冷且明亮云顶的显著特征。在国内外的相关研究中通常使用红外窗区 $11\mu\text{m}$ 附近通道亮温来识别 DCC 像元 (Wang 等, 2022; 周为伟等, 2023)。首先选取纬度小于 20 度的热带地区数据, 通过 AGRI 红外窗区通道亮温阈值来初步识别 DCC 目标像元。接着, 通过像元邻域空间均一性筛选出处于对流发展核心区域的稳定 DCC 像元, 避免边缘区域和快速变化地不稳定对流单体的影响。分别计算初

步识别到的 DCC 像元和其相邻 3*3 区域像元的反射率和亮温标准差, 筛选出同时满足可见光 0.65 μm 通道反射率标准差小于 3% 和红外 10.8 μm 通道亮温标准差小于 1K 的 DCC 像元。最后, 限制像元的太阳天顶角 (Solar Zenith Angle, SZA) 和观测天顶角 (View Zenith Angle, VZA) 在 40 度以内。图 1 以 2023 年 4 月 30 日 FY-4A/AGRI 一景全圆盘观测数据为例, 展示了 DCC 目标像元的识别过

程。图 1 (a) 表示所有热带地区有效像元的红外通道亮温值; 图 1 (b) 表示红外通道亮温小于 205K 的潜在 DCC 像元; 图 1 (c) 表示进一步经过视场角度和空间均一性阈值筛选后的 DCC 像元; 图 1 (d)、图 1 (e) 和图 1 (f) 分别为相对应 DCC 像元集合的 0.65 μm 通道反射率 PDF 曲线, 图中 Pixels

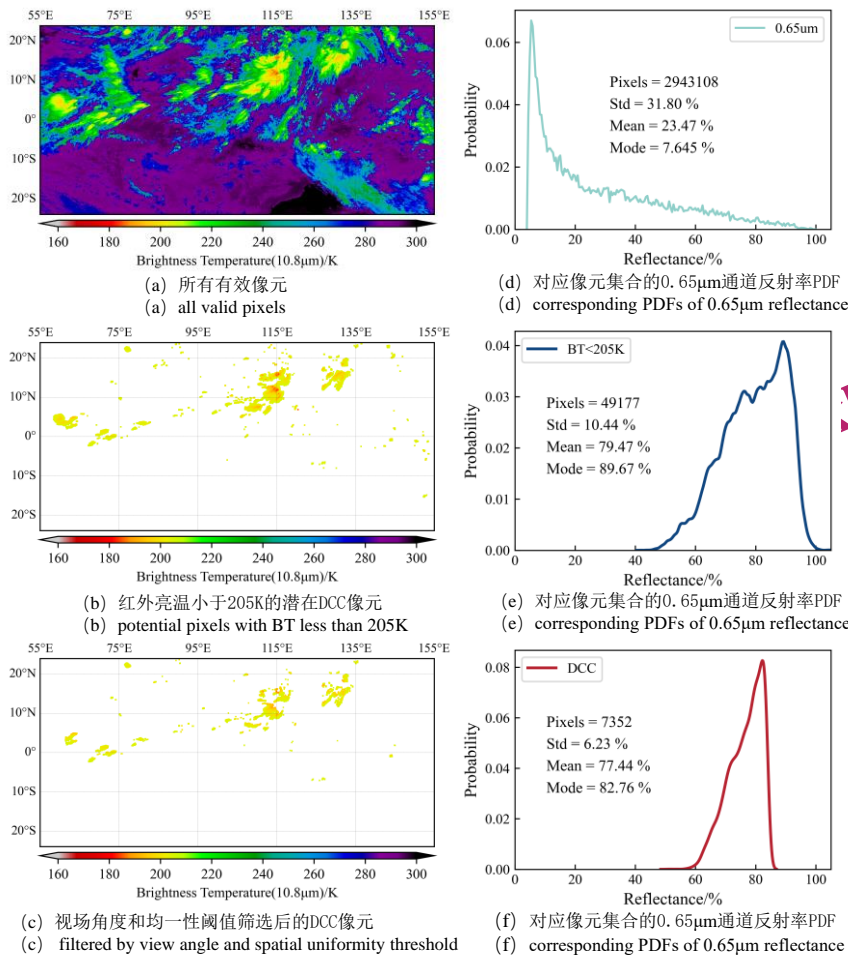


图 1 DCC 目标像元的识别过程

Fig.1 The identification process of DCC target pixels

表示 DCC 像元数量, Std 表示 DCC 像元集合的反射率标准差, Mean 表示反射率均值, Mode 表示 PDF 峰值反射率。对比图 1 (e) 和图 1 (f), 当应用严格的视场角度和空间均一性阈值对潜在 DCC 像元进一步筛选后, 得到的 DCC 像元集合反射率 PDF 曲线更平滑, 并且反射率标准差从 10.44% 减小到 6.23%。

为了校正不同观测角度引起的反射率偏差, 使用 DCC 角度分布模型 (Angular Distribution

Model, ADM) 进行各向异性校正。经 ADM 校正后的 DCC 表观反射率如公式 (1) 所示:

$$R_i = \frac{R^*i}{D^2 * \cos(sza) * ADM(sza, vza, raa)} \quad (1)$$

式中 R_i 是 AGRI 第 i 通道经 ADM 校正后的 DCC 表观反射率, D 是日地距离修正因子, R^*i 是根据 AGRI 第 i 通道业务定标系数和数码值 (Digital Number, DN) 计算得到的反射率, $ADM(sza, vza, raa)$ 是各向异性校正因子, 对应一组太阳天顶角 (sza)、

观测天顶角 (vza) 和相对方位角 (raa)。

最后, 构建日或月度 DCC 反射率 PDF, 通过跟踪长时间序列 PDF 峰值反射率或反射率均值的变化来评估仪器辐射响应性能。选择较短时间的数据构建 DCC 反射率 PDF 会导致 DCC 样本数量减少, 增加反射率均值或 PDF 峰值反射率时间序列的不稳定性, 但是可以捕捉到短时间内的仪器辐射响应变化。相反地, 选择较长时间的数据可以提供大量的 DCC 样本, 使反射率均值或 PDF 峰值反射率时间序列更稳定, 但是无法监测短时变化。因此, 应根据实际需求选择适当的时间尺度。若需关注短时期的仪器辐射响应变化, 建议采用每日数据构建 DCC 像元集合; 若更关注长时期的变化趋势, 则建议采用月度数据构建 DCC 像元集合, 或者使用每日数据构建 DCC 像元集合, 再通过对多天数据的平均来平滑反射率变化趋势曲线, 从而获得更为稳定和准确的长期变化信息。

图 2 (a) 和图 2 (b) 分别比较了从 2020 年 10 月至 2023 年 4 月间, 可见光 $0.65\mu\text{m}$ 通道和短波红外 $1.37\mu\text{m}$ 通道在不同月份的 DCC 反射率 PDF 曲线, 以及对应的反射率均值 (Mean) 和峰值反射率 (Mode)。如图 2 (a) 所示, $0.65\mu\text{m}$ 通道月度反射率 PDF 曲线逐月向左偏移, DCC 反射率均值和峰值反射率减小了约 11.12%。而对于 $1.37\mu\text{m}$ 通道, 其不同月度 DCC 反射率 PDF 曲线几乎重合, 反射率均值和峰值反射率的标准偏差非常小, 分别为 0.34% 和 0.36%。

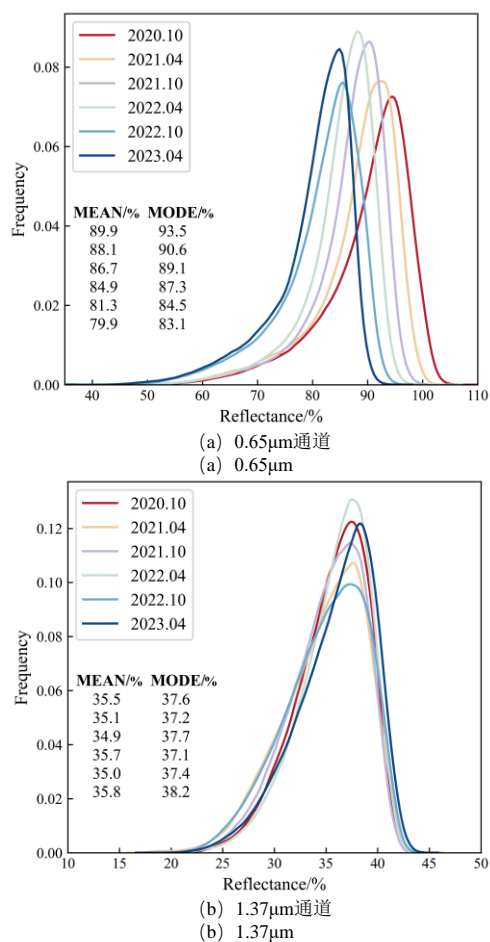


图 2 不同月份的 DCC 反射率 PDF 曲线
Fig 2 DCC reflectance PDFs for different months

3 敏感性分析

在 DCC 像元识别和反射率校正过程中, 红外通道亮温阈值、DCC 像元邻域空间均一性条件和 DCC 反射率角度分布模型等不确定性因素将会在传感器自身辐射性能变化的基础上增加噪声, 影响评估结果的准确性和稳定性。在本章节中对这些影响 DCC 定标结果的因素逐一进行敏感性分析, 并依据结果对 DCC 模型进行订正, 建议最优方案, 达到提高 DCC 定标方法精度和稳定性的目的。

3.1 红外亮温阈值

红外通道亮温阈值是识别 DCC 像元的关键的影响因素。图 3 以 2021 年 5 月的数据为例, 展示了不同红外亮温 (BT) 阈值下的 $0.65\mu\text{m}$ 通道 DCC 反射率 PDF。图 3 (a) 中红外亮温阈值在 205K 至 190K 之间以 5K 递减。红外亮温阈值每降低 5K, $0.65\mu\text{m}$ 通道 DCC 反射率均值 (MEAN) 和峰值反

射率 (MODE) 分别增加约 1.9% 和 1.1%。但是, 严格的红外亮温阈值显著减少了 DCC 像元数量 (PIXELS), 当亮温阈值从 205K 分别降低到 200K 和 195K 时, DCC 像元数量分别减少到 44% 和 12%。当亮温阈值为 190K 时, DCC 像元样本数量急剧减少到 1.3%, 导致峰值反射率不明确, PDF 曲线出现双峰特征, 影响了定标跟踪的可靠性。

设置红外亮温阈值在 195K 至 205K 间以 2K 为一个区间, 图 3 (b) 和图 3 (c) 分别展示了 0.65 μm 通道和 1.61 μm 通道 DCC 反射率在不同红外亮温区间的 PDF 曲线。可见光和短波红外通道的 DCC 反射率 PDF 曲线具有不同的形态特征: 0.65 μm 通道反射率 PDF 呈现左侧拖尾的负偏态高斯分布, 反射率均值 (MEAN) 小于峰值反射率 (MODE), 反射率均值的变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 大于峰值反射率。而 1.61 μm 通道则呈现近似正态高斯分布, 反射均值约等于峰值反射率, 反射率均值的变异系数 (CV) 略小于峰值反射率。

为进一步研究不同波段 DCC 反射率均值和 PDF 峰值反射率对红外亮温阈值的敏感性, 以 1K 为间隔, 将红外亮温阈值从 195K 至 205K 划分为十个区间。图 4 (a) 和图 4 (b) 分别展示了 0.65 μm 通道和 1.61 μm 通道在每个阈值区间内的 DCC 反射率均值 (Mean) 和 PDF 峰值反射率 (Mode) 以及 DCC 像元样本数量 (DCC Pixels) 的变化趋势。随着红外亮温阈值的增大, DCC 像元样本数量随之增加, 而两个通道 DCC 反射率均值和 PDF 峰值反射率都随之降低。在 0.65 μm 通道, DCC 反射率均值在 195K 和 205K 间的总偏移量 (Drift) 为 4.759%, PDF 峰值反射率的总偏移量较小, 为 2.518%。PDF 峰值反射率对于红外亮温阈值的敏感性更低, 约为反射率均值的 52%。不同的是, 在 1.61 μm 通道, DCC 反射率均值在 195K 和 205K 间的总偏移量 (Drift) 为 5.122%, PDF 峰值反射率的总偏移量为 6.276%。DCC 反射率均值对于红外亮温阈值的敏感性略低, 约为 PDF 峰值反射率的 81%。因此, 在可见光/近红外波段选用对红外亮温敏感性较低的 PDF 峰值反射率, 在短波红外波段选用对红外亮温敏感性较低的反射率均值是最优方案。

红外亮温阈值是 DCC 像元识别方法的首要因素, 因此待评估仪器的红外通道定标精度是 DCC

定标方法的一个重要不确定性来源。FY4A/AGRI 携带了面源黑体作为红外通道在轨辐射定标基准, 通过南北扫描镜转动指向黑体, 得到红外各通道黑体观测数据 (陈博洋等, 2018), 其热辐射通道设计指标要求定标精度优于 1K。图 4 展示的研究结果表明 DCC 反射率的偏移量与红外亮温阈值基本呈线性变化关系, 将 DCC 反射率在 195K 至 205K 间的总偏移量 (Drift) 除以 10, 即得到近似的红外亮温阈值每 1K 波动引起的 DCC 反射率的不确定性范围。对于 0.65 μm 通道, 亮温阈值每增加 1K, DCC 反射率均值 (PDF 峰值反射率) 随之降低约 0.4759% (0.2518%)。对于 1.61 μm 通道, 红外亮温阈值每增加 1K, DCC 反射率均值 (PDF 峰值反射率) 随之降低约 0.5122% (0.6276%)。因此, FY4A/AGRI 红外通道定标精度对于 DCC 反射率的不确定性影响范围约为 0.25% 至 0.63%。

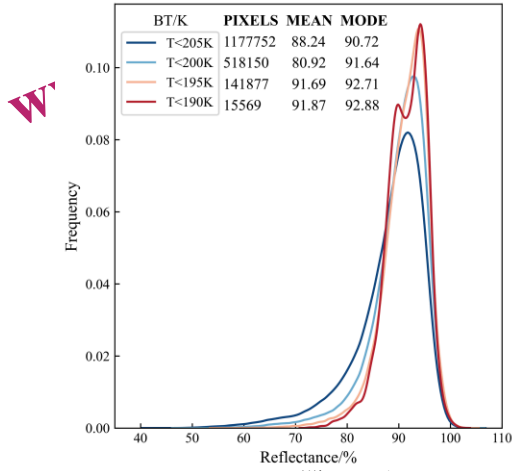
3.2 像元邻域空间均一性

在红外亮温阈值条件的基础上, 计算相邻像元间的可见光通道反射率标准差和红外通道亮温标准差, 筛选出处于对流发展核心区域的 DCC 像元, 提高 DCC 像元识别的准确性以及 DCC 反射率的稳定性 (陈林等, 2016)。以 2021 年 5 月的 FY-4A/AGRI 观测数据为例, 分别研究 3*3 区域相邻像元和 7*7 区域相邻像元条件下, 可见光 0.65 μm 通道反射率标准差和红外通道亮温标准差阈值条件对 DCC 反射率的影响。

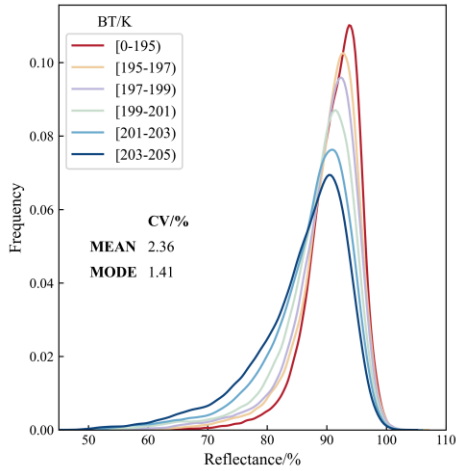
图 5 展示了不同 DCC 像元邻域空间均一性条件下的 0.65 μm 通道 DCC 反射率分布图。图中纵坐标为 0.65 μm 通道 DCC 像元反射率值, 色带表示该反射率值出现的概率密度, 黑色虚线为设定的阈值标准。图 5 (a) 和图 5 (b) 的横坐标分别为相邻 3*3 区域和 7*7 区域的 0.65 μm 通道反射率 ($R_{0.65\mu\text{m}}$) 标准差 (STD)。可以看到, 绝大多数 DCC 像元反射率标准差在 3% 以内, 反射率值在 0.8 至 1 之间。而部分反射率值在 0.5 至 0.8 之间的低反射率像元与图 3 (b) 中反射率 PDF 曲线在左侧低值区的拖尾相对应。并且, 与 3*3 区域相比, 7*7 区域反射率标准差小于 3% 阈值条件下低反射率像元数更少, DCC 反射率值分布更为稳定集中。图 5 (c) 和图 5 (d) 的横坐标分别为相邻 3*3 区域和 7*7 区域红外通道亮温 ($BT_{10.8\mu\text{m}}$) 标准差 (STD)。当红外亮温标准差阈值设置为 1K 时, 3*3

区域条件下的DCC像元数量占比约65%。而7*7区域条件下的DCC像元数量占比仅约12%，过少的

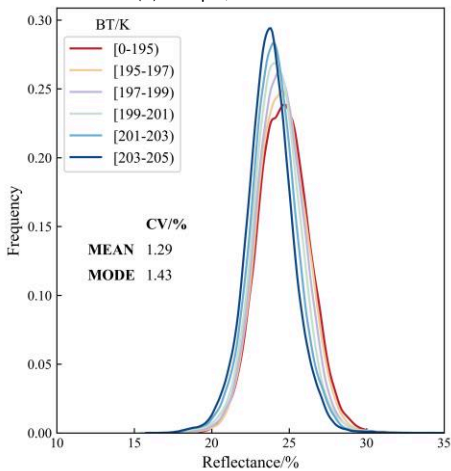
DCC像元样本数量可能不能准确反应DCC像元集合的反射率特征。



(a) 0.65μm通道, 190K至205K
(a) 0.65μm, 190K to 205K



(b) 0.65μm通道, 195K至205K
(b) 0.65μm, 195K to 205K



(c) 1.61μm通道, 195K至205K
(c) 1.61μm, 195K to 205K

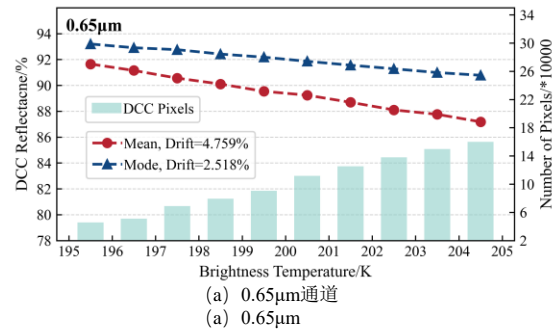
图3 不同红外亮温阈值下的DCC反射率PDF

Fig.3 DCC reflectance PDFs under different infrared brightness temperature thresholds

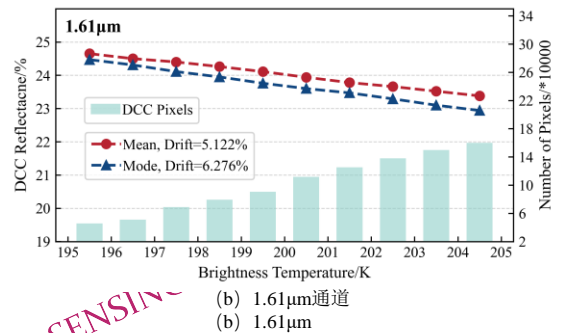
NATIONAL
REMOTE
SENSING BULLETIN

遥感学报

www.ygxb.ac.cn



(a) 0.65μm通道
(a) 0.65μm



(b) 1.61μm通道
(b) 1.61μm

图4 DCC反射率均值和PDF峰值反射率对红外亮温阈值的敏感性

Fig.4 Sensitivity of DCC reflectance mean and PDF peak reflectance to infrared brightness temperature threshold

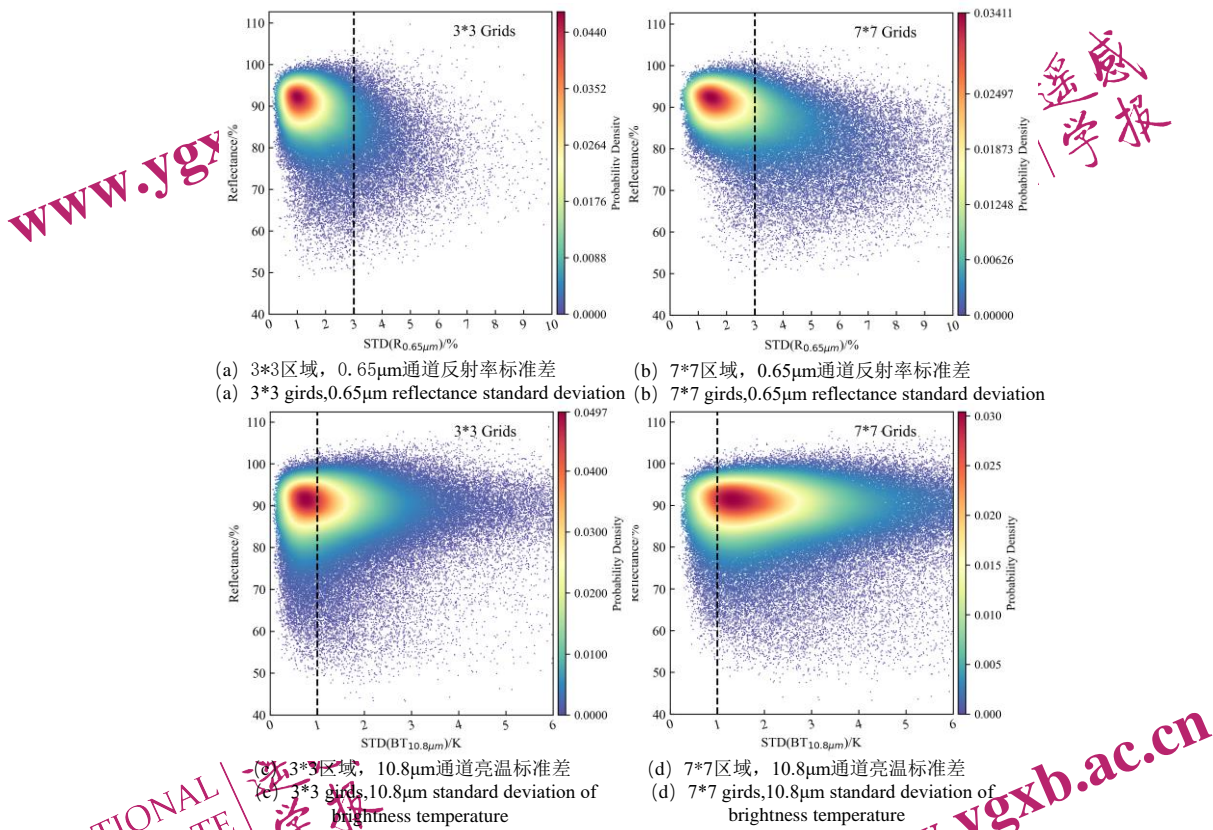


图5 不同像元邻域空间均一性条件下的0.65 μm 通道DCC反射率分布图
 Fig. 5 Scatter density plots of 0.65 μm channel DCC reflectance under different pixel homogeneity conditions brightness temperature

增加相邻空间像元数量能够提高识别核心区域DCC目标的准确性,但是过于严格的阈值条件会显著减少DCC像元样本数量,从而影响DCC反射率PDF特征值的稳定性。根据本节的结果,建议选择同时满足相邻7*7区域像元反射率标准差小于3%和3*3区域像元红外亮温标准差小于1K的DCC像元。

3.3 反射率角度分布模型

DCC并不是完美的朗伯体,目前普遍使用Hu或者CERES厚冰云角度分布模型(ADM)对DCC像元反射率进行各向异性校正。Hu等人使用热带降水测量任务卫星(TRMM)的观测数据建立了深对流云ADM(Hu等,2004)。CERES基于Aqua、Terra和TRMM等卫星的高定标精度观测数据,建立了云量大于99.9%且云光学厚度大于50的厚冰云ADM。这两种深对流云ADM使用不同仪器和不同时期的观测数据作为输入条件进行建模,因此对特定传感器的DCC反射率的各向异性校正效果也会有所不同。

为了直观地评估两种DCC ADM的校正效果,

以2022年10月的观测数据为例,将DCC像元以太阳天顶角(SZA)10度为一个区间进行分组,建立了不同太阳天顶角(SZA)角度区间下的DCC反射率概率密度函数(PDF)。首先假设DCC是完美的朗伯体或者ADM能够完全地校正各向异性,反射率不受观测几何角度的影响,可以推断出这些随太阳天顶角变化的反射率PDF都是完全相同的。图6展示了不同太阳天顶角度区间下的0.65 μm 通道DCC反射率PDF曲线。如图6(a)所示,即使不使用ADM校正,4个SZA角度区间的反射率均值(Mean)和峰值反射率(Mode)的标准差(STD)都小于3%,证明了DCC的近似朗伯体特性。同时,随着太阳天顶角的增大,DCC反射率PDF曲线逐渐向右偏移,表明在高观测几何角度的情况下需要使用ADM对DCC反射率进行各向异性校正。图6(b)和图6(c)分别展示了Hu ADM和CERES ADM校正后的DCC反射率PDF曲线,可以直观的看出CERES ADM模型的校正效果更为显著。经CERES ADM模型校正后,4个SZA角度区间的反射率PDF曲线几乎重合,反射率均

值和峰值反射率的标准差分别从2.577%和2.858%减小至0.4128%和0.4398%，明显优于Hu ADM模

型校正后的结果。

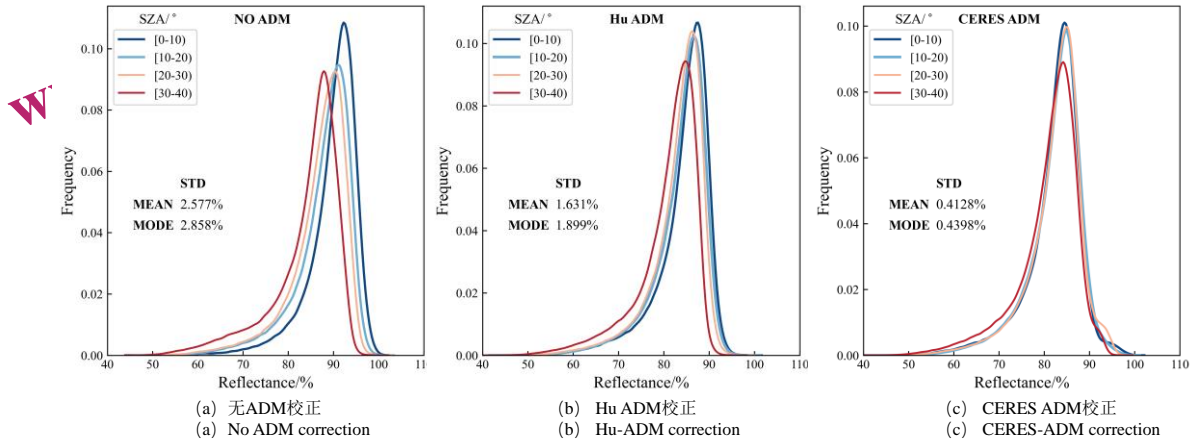


图6 不同SZA角度区间下的0.65um通道DCC反射率PDF曲线

Fig.6 DCC reflectance PDF curves for different VZA intervals in 0.65um

表2给出了FY-4A/AGRI 6个反射通道在两种ADM校正前后,不同SZA角度区间DCC反射率均值/PDF峰值反射率的标准差。结果表明,在可见光和近红外波段使用CERES-ADM校正后,不同SZA角度区间的DCC反射率均值和PDF峰值反射率的标准差最小,校正效果优于Hu ADM。但是这两种ADM在3个短波红外通道均无明显校正效果,甚至增大了反射率均值和PDF峰值反射率的标准差。因此,对于FY-4A/AGRI仪器,在可见光和近红外波段选择CERES-ADM作为DCC反射率各向异性校正的最优方案。

表2 不同SZA角度区间DCC反射率均值/PDF峰值反射率的标准差

Table 2 Standard deviation of PDF reflectance mean/mode) in different SZA range

Channel (μm)	No ADM (%)	Hu ADM (%)	CERES ADM (%)
0.470	2.49/2.23	1.52/1.34	0.413/0.406
0.650	2.66/2.58	1.90/1.63	0.440/0.413
0.825	2.33/1.99	1.44/1.13	0.366/0.338
1.375	1.58/1.68	1.74/1.63	1.82/1.93
1.61	1.48/1.49	1.58/1.60	1.40/1.43
2.25	1.46/1.59	1.43/1.54	1.42/1.51

4 结果和讨论

使用优化后的DCC定标跟踪方法对2017年3月至2023年4月FY-4A/AGRI反射波段辐射性能变

化进行定量评估。首先选择热带地区(纬度小于20度)的观测数据,使用红外通道亮温阈值初步识别DCC像元。接着筛选出同时满足相邻7*7区域像元反射率标准差小于3%和3*3区域像元红外亮温标准差小于1K的DCC核心区域像元。然后,对VIS/NIR通道使用CERES-ADM对DCC反射率进行各向异性校正。最后,通过跟踪每日DCC反射率均值(SWIR波段)和PDF峰值反射率(VIS/NIR波段)的变化来监测仪器辐射性能,并采用滑动平均的方法平滑趋势曲线。

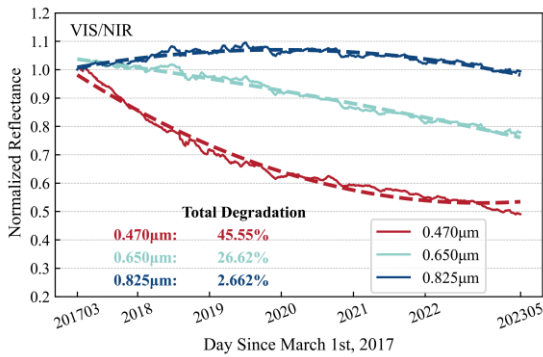
图7展示了2017年3月至2023年4月, FY-4A/AGRI反射波段DCC日反射率变化趋势。图中横坐标表示日期,纵坐标表示归一化到第一天的DCC日反射率,图7(a)和图7(b)中虚线分别表示VIS/NIR和SWIR波段DCC反射率变化的拟合曲线,其中采用二次函数拟合可见光-近红外波段,采用线性函数拟合短波红外波段。FY-4A/AGRI反射波段辐射性能总变化率如公式(2)所示,年平均变化率如公式(3)所示:

$$D_{\text{total},i} = \frac{\bar{R}_{\text{DCC},i}(d_n) - \bar{R}_{\text{DCC},i}(d_1)}{\bar{R}_{\text{DCC},i}(d_1)} * 100\% \quad (2)$$

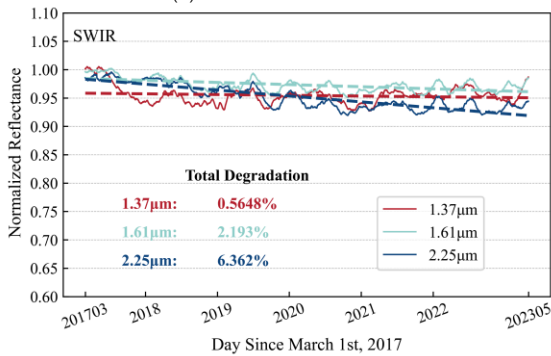
$$D_{\text{annual},i} = \frac{D_{\text{total},i}}{d_n - d_1} * 365 * 100\% \quad (3)$$

式中, i 表示FY-4A/AGRI第 i 通道, d_1 表示数据时间序列的第一天; d_n 表示最后一天; $\bar{R}_{\text{DCC},i}$ 表示DCC反射率二次项函数拟合值的30天滑动平均值; $D_{\text{total},i}$ 表示总变化率, $D_{\text{annual},i}$ 表示年平均

变化率, 正值表示该通道辐射响应衰减, 负值表示辐射响应增强。定义波动性指标 δ 来描述反射率观测值与拟合值之间的离散程度, δ 的计算如公式(4)所示:



(a) 可见光/近红外通道
(a) VIS and NIR channels



(b) 短波红外通道
(b) SWIR channels

图7 2017年3月至2023年4月, FY-4A/AGRI 反射波段 DCC 日反射率变化趋势

Fig. 7 Trend of DCC reflectance variation in FY-4A/AGRI reflective bands from March 2017 to April 2023

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{di=1}^n \left(\frac{R(di) - \tilde{R}(di)}{\tilde{R}(di) - (R(di) - \tilde{R}(di)) / \tilde{R}(d1)} \right)^2} \quad (4)$$

式中, d_i 表示第 i 天, $R(d_i)$ 表示第 i 天的 DCC 反射率观测值, $\tilde{R}(d_i)$ 表示第 i 天 DCC 反射率的拟合值, 波动性指标越小则仪器辐射性能就越稳定。表3列出了根据上述公式计算的 FY-4A/AGRI 反射波段辐射性能衰减评估结果, 包括总衰减 (Total Degradation)、年变化率 (Annual Degradation) 和波动性指标 (δ)。

图7和表3展示的结果表明: (1) 可见光 0.47 μm 和 0.65 μm 通道辐射性能衰减显著, 2017年3月至2023年4月间总衰减率分别达到45.55%和26.62%, 并且0.47 μm 通道 DCC 反射率波动性指标

最高, 为2.149%。(2) 从拟合曲线可以看出, 0.47 μm 蓝光通道的辐射性能衰减率随时间推移逐渐减小; 0.65 μm 通道辐射性能基本呈线性衰减趋势; 从2017年3月开始, 近红外 0.825 μm 通道的辐射性能逐步升高, 直至2020年6月后开始逐渐衰减。(3) VIS/NIR 在较短的时间尺度上表现出由 DCC 样本数量、仪器噪声等因素引起的随机性波动。为减小这种随机性噪声的影响, 在研究中使用了反射率的拟合值来定量计算仪器的辐射响应变化。(4) 短波红外波段 1.37 μm 卷云通道的辐射性能衰减最小, 总衰减率为0.5648%。在卫星发射初期2017年3月至2018年3月的一年时间内, 该通道约有5%的明显衰减。然后, 从2018年3月至2023年4月的五年时间内辐射性能保持稳定, 几乎没有衰减。(5) 1.61 μm 通道和2.25 μm 通道呈线性衰减趋势, 总衰减率分别为2.193%和6.362%; 1.61 μm 和2.25 μm 通道的 DCC 反射率具有近似相同的波动周期, 即波峰和波谷同时出现。孙凌等人基于长时间序列对 FY-3B 中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 在轨数据进行分析, 发现短波红外通道 (1.04 μm 和 2.13 μm) 的反射率观测值与探测器温度之间存在正相关关系 (孙凌等, 2019)。FY-4A/AGRI 与 FY-3B/MERSI 在短波红外波段具有相近的通道配置, 因此 FY-4A/AGRI 短波红外通道表现出的这种有规律的周期性波动也可能与仪器温度相关。

表3 2017年3月至2023年4月, FY-4A/AGRI 反射波段辐射性能衰减评估结果

Channel (μm)	Total Degradation (%)	Annual Degradation (%)	δ (%)
0.470	45.55	7.883	2.149
0.650	26.62	4.215	1.141
0.865	2.662	0.4314	0.9366
1.375	0.5648	0.0915	1.673
1.61	2.193	0.3556	1.127
2.25	6.362	1.031	1.289

5 结论

本文对基于深对流云 (DCC) 的卫星光学传感器辐射定标跟踪方法中影响精度和稳定性的关键因素进行了敏感性研究, 建立了最优方案。并

采用优化方法定量评估了FY-4A/AGRI反射波段的辐射响应性能变化。

对红外通道亮温阈值、像元邻域空间均一性条件和DCC角度分布模型三个主要影响因素的研究结果表明：(1)对于可见光通道，DCC反射率均值的敏感性低于PDF峰值反射率；而对于短波红外通道，PDF峰值反射率的敏感性略低于反射率均值；AGRI红外通道定标精度对DCC反射率的不确定性影响范围约为0.25%至0.63%。(2)过于严格的DCC像元邻域空间均一性阈值条件会显著减少DCC像元样本数量，降低DCC反射率的稳定性。(3)在可见光和近红外波段，CERES ADM的各向异性校正效果显著，优于Hu ADM；但两种DCC角度分布模型在短波红外波段都没有明显校正效果。

对2017年3月至2023年4月FY-4A/AGRI反射波段辐射性能变化的评估结果表明：(1)可见光波段辐射性能衰减显著，尤其是较短波长的0.47 μm 通道，总衰减率高达45.55%；0.65 μm 通道辐射性能近似呈线性趋势衰减，总衰减率为26.62%。(2)近红外0.825 μm 通道总衰减率为2.662%，反射率波动性最小。(3)短波红外波段，1.37 μm 通道在卫星发射初期的一年时间衰减了约5%，而此后约五年时间内辐射性能稳定无衰减；1.61 μm 通道和2.25 μm 通道呈线性衰减趋势，总衰减率分别为2.193%和6.362%。这三个通道的DCC反射率具有相近的周期性波动特征，可能与仪器温度变化密切相关。

参考文献 (References)

- Chen B Y, Wu Q, Feng X, Guo Q and Wei C Y. On-orbit test to FY-4A AGRI and generating RGB image [J]. Infrared Millim. Waves, 2018, 37(04):411-415
- 陈博洋, 吴琼, 冯绚, 魏彩英. 2018. FY-4A 多通道扫描辐射成像仪评价与图像合成. 红外与毫米波学报, 2018, 37(4):5[DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2018.04.006]
- Chen L, Hu X, Xu N and Zhang P. 2013. The Application of Deep Convective Clouds in the Calibration and Response Monitoring of the Reflective Solar Bands of FY-3A/MERSI (Medium Resolution Spectral Imager). Remote Sensing. 2013; 5(12):6958-6975[DOI:10.3390/rs5126958]
- Chen L, Xu N, Hu X Q, Lu F and Zhang P. 2016. Visible light channel radiometric calibration of Fengyun 2 based on deep convective cloud targets [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36

- (08): 2639-2645.
- 陈林, 徐娜, 胡秀清, 陆风, 张鹏. 2016. 基于深对流云目标的风云二号可见光通道辐射定标. 光谱学与光谱分析, 36(8), 7. [DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2016)08-2639-07]
- Doelling D R, Barnes W L, Butler J, et al. 2004. On the use of deep convective clouds to calibrate AVHRR data. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004, 5542. [DOI:10.1117/12.566047]
- Hu Y B, Wiatnicki B A, Yang P, et al. 2004. Application of deep convective cloud albedo observation to satellite-based study of the terrestrial atmosphere: Monitoring the stability of spaceborne measurements and assessing absorption anomaly. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 42, no. 11, pp. 2594 - 2599, Nov. 2004[DOI:10.1109/TGRS.2004.834765]
- Li X J, Wang B Y, Wu Y P, Han C P, Cao Q and Zhou S T. 2022. Research on Improving the Accuracy of AGRI Calibration for FY-4A Satellite by Scanning Mirror Thermal Radiation Correction. Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2022(003):041.
- 李秀举, 王保勇, 吴亚鹏, 韩昌佩, 曹琦, 周树添. 2022. 扫描镜热辐射校正对fy-4a星agri定标精度的提升研究. 红外与毫米波学报 (003), 041[DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2022.03.042]
- Sun L, Hu X Q and N. 2019. Temperature Sensitivity and on-Orbit Calibration Analysis for FY-3B MERSI Shortwave Infrared Bands. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2019, 14(5): 374-384.
- 孙凌, 胡秀清, 徐娜. 2019. FY-3B MERSI 短波红外波段温度响应与在轨定标分析. 大气与环境光学学报, 2019, 14(5): 374-384 [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.008]
- Wang W H, Cao C, Shao X, et al. 2022. Evaluation of 10-Year NOAA/NASA Suomi NPP and NOAA-20 VIIRS Reflective Solar Band (RSB) Sensor Data Records (SDR) over Deep Convective Clouds. Remote Sens. 14 (2022): 3566[DOI: 10.3390/rs14153566]
- Yang J, Zhang Z Z, Wei C, Lu F and Guo Q. 2017. Introducing the new generation of chinese geostationary weather satellites, fengyun-4. Bulletin of the American Meteorological Society, 98 [DOI:10.1175/BAMS-D-16-0065.1.]
- Yang M, Liu Z Y, Zhao Y G, et al. 2021. On-Orbit Radiometric Calibration Method for Satellites Based on TOA Reflectance at Baotou Site. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1828007.
- 杨敏, 刘照言, 赵永光等. 2021. 基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1828001[DOI: 10.3788/AOS202141.1828001]
- Zhang P, Zhu L, Tang S, et al. 2019. General Comparison of FY-4A/AGRI With Other GEO/LEO Instruments and Its Potential and Challenges in Non-meteorological Applications[J]. Frontiers in Earth Science, 2019, 6[DOI: 10.3389/feart.2018.00224]
- Zhou W W, Hu X Q, Yang L K. 2023. Modeling of deep convective cloud BRDF characteristics based on the Himawari-8 satellite imager. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12):1228007.
- 周为伟, 胡秀清, 杨磊库. 2023. 基于 Himawari-8 卫星成像仪的深对流云 BRDF 特性建模. 光学学报, 2023, 43(12):1228007[DOI:10.

3788/AOS221771]

Research on the radiometric calibration method for deep convective clouds in the reflective bands of FY-4A/AGRI

Zhang Bei^{1,2}, Hu XiuQing^{1,2*}, Zhou WeiWei^{1,3}, Sha Jin⁴, Chen Lin^{1,2}

1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;

3. Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China;

4. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: Objective The advanced geostationary orbit radiometer (AGRI) of FY-4A satellite has been on orbit for 6 years, and the radiation performance of some reflective channels have significantly degraded, affecting the accuracy of quantitative remote sensing product applications. On-orbit vicarious calibration methods based on deep convective cloud (DCC) targets can track and correct the radiometric response of spaceborne optical sensors for attenuation. This method relies on large-sample statistical analysis, and it is significantly to conduct sensitivity studies on factors influencing the calibration accuracy and stability in this method and establish optimal solutions. Method The procedural of the fundamental DCC calibration and tracking method are as follows: initially, extract DCC target pixels from FY-4A/AGRI L1 level data, calculate the reflectance of the target pixels, and apply anisotropic correction using the DCC Angle Distribution Model (ADM). Subsequently, construct daily or monthly Probability Density Functions (PDF) of DCC reflectance and track the trend in peak reflectance (also known as mode) or reflectance mean to monitor and evaluate the radiometric performance of the FY-4A/AGRI instrument. In order to improve the calibration accuracy and stability, the sensitivity research scheme for infrared brightness temperature threshold, pixel uniformity conditions and DCC angle distribution model (ADM) was proposed. Lastly, correct the DCC model and establish an optimal solution according to the results of the sensitivity analysis. Result The results indicate that for the infrared brightness temperature threshold, the sensitivity of DCC mean reflectance is lower than that of probability density function (PDF) peak reflectance in the visible light channel, and in the short-wave infrared channel, the sensitivity of DCC PDF peak reflectance is slightly lower than that of reflectance mean. In the visible-near-infrared band, the CERES ADM model can better correct the effect of DCC reflectance anisotropy, and is significantly better than the Hu model. However, neither of the two ADM models has obvious correction effect in the short-wave infrared band. Based on the above sensitivity studies, the threshold selection and ADM correction strategy in the DCC method are determined. The radiation response of FY-4A/AGRI reflected bands from March 2017 to April 2023 is tracked and evaluated. The results show that the radiation response of 0.47 μ m, 0.65 μ m and 2.25 μ m channels degrades significantly, with the total attenuation rates of 45.55%, 26.22% and 6.362%, respectively. This result provides a reference for updating the AGRI operation calibration coefficient. Conclusion The paper conducted a sensitivity analysis on the key factors in the radiometric calibration tracking method based on Deep Convective Clouds (DCC) for satellite optical sensors, enhancing calibration accuracy and stability through the establishment of an optimal solution. By utilizing optimization methods, it quantitatively evaluated the variations in radiometric response performance in the reflectance band of FY-4A/AGRI, providing valuable reference for updating the operational calibration coefficients of this instrument.

Key words: remote sensing and sensors, radiometric calibration, deep convective cloud, advanced geostationary radiation imager, angular distribution model, top of atmosphere reflectance, reflective solar bands

Supported by Supported by National Key Research and Development Program of China: Research on the Index System for Error Transmission of Space Radiation Measurement Benchmark Traceability in the Whole Link (Grant No. 2022YFB3902901)