

光学学报

FY-3B 卫星中分辨率光谱成像仪可见光星上定标系统辐射性能稳定性分析

支丹丹*, 赵其昌, 汪自军, 马晶晶, 张立国, 朱思峰, 周爱明

上海卫星工程研究所, 上海 201109

摘要 风云三号 B 星 (FY-3B) 中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 可见光星上定标 (VOC) 系统辐射性能随时间衰减变化, 使其难以用于 MERSI 的在轨绝对辐射定标。本文提出一种确定 VOC 辐射性能衰减变化的新方法, 该方法在探究太阳辐射定标时机与太阳天顶角和方位角依赖关系的基础上, 分析 MERSI 相对辐射响应衰减变化的趋势; 利用高质量的 MODIS 数据构建大气层顶双向反射分布函数模型, 对 MERSI 约 10 年的在轨有效数据进行交叉定标处理, 获取 MERSI 绝对辐射响应衰减变化趋势; 将二者归一化后的差值作为 VOC 系统辐射性能的衰减变化值。结果表明: VOC 系统辐射性能在发射初期衰减率较大, 后期衰减趋势趋于平稳, 且衰减率与波长相关; 在发射初期, 短波波长 ($<500\text{ nm}$) 处的最大年衰减率达到了 49.51%, 长波波长 (800~1000 nm) 处的衰减率相对较小, 最大年衰减率均小于 26%; 在发射后期, 除 412 nm 外 (衰减率为 1.91%), 其余波长处年衰减率均小于 0.64%。自仪器发射以来, 基于本方法获得的 VOC 衰减数据与 VOC 监视数据之间的百分误差均小于 15%。本文提出的 VOC 系统稳定性分析方法可为实现 MERSI 星上绝对辐射定标提供重要的参考。

关键词 辐射定标; 星上定标系统; 中分辨率光谱成像仪; 反射太阳通道

中图分类号 TP722.4 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231448

1 引言

搭载在风云三号 B 星 (FY-3B) 上的主要光学成像载荷中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 提供了用于地球系统变化研究^[1-2]的约 10 年 (2010 年 11 月 5 日成功发射, 2020 年 6 月 1 日停止对外服务) 连续有效的全球陆表特性遥感监测数据产品, 包括植被、地表覆盖分类和积雪覆盖等。MERSI 具有 19 个反射太阳通道, 光谱覆盖范围为 0.4~2.1 μm , 星下点空间分辨率为 250 m 和 1000 m。

精度一致的遥感数据集是获得可靠研究结果的前提与基础, 但其依赖于遥感器长时间序列统一化辐射定标^[3]。星上定标器通过提供高精度高频次的时空采样, 实现遥感器辐射响应稳定性的长期监测。MERSI 搭载的可见光定标器, 通过内置定标灯 (内置定标灯自身的辐射输出衰减与可见光星上定标 (VOC) 系统的衰减变化难以区分^[4-5]) 和以太阳光为定标光源的太阳光锥实现星上定标, 其定标精度依赖于 VOC 系统自身的辐射性能稳定性。然而, 由于积分球老化、定标系统本身效率下降, 以及光学元件效率下降等因素均会导致 VOC 系统自身的辐射性能衰减。因此, 为了实现

MERSI 的星上绝对辐射定标, 亟需量化 VOC 定标系统辐射性能的衰减变化。

由于目前 MERSI 星上定标装置不能溯源至发射前或是国际标准 (SI) 的局限性, 因此探索其他定标方法实现 MERSI 长时间序列绝对辐射响应输出的高精度计算是揭示 VOC 系统衰减变化规律的关键。基于高精度遥感器的大气层顶 (TOA) 反射率构建的大气层顶双向反射分布函数 (BRDF) 模型, 目前已实现多个遥感器之间的比对和定标^[6-7]。该方法可避免辐射传输计算带来的误差和大气订正误差, 其定标精度主要依赖于参考遥感器的定标精度以及光谱和时空匹配精度。本文利用高质量的 MODIS 数据构建大气层顶双向反射分布函数模型, 对约 10 年的 MERSI 有效在轨数据进行交叉定标处理, 获取 MERSI 长时间序列绝对辐射响应变化值。根据 MERSI 高精度绝对辐射响应变化值进一步确定 VOC 系统 (不含星上定标灯) 的辐射输出衰减变化。

本文首先介绍了 MERSI 星上定标器, 其次通过筛选太阳光定标数据产品分析 MERSI 长时间序列相对辐射响应变化, 进一步以高精度的 MODIS 为参考计算 MERSI 长时间序列绝对辐射响应变化, 最后实现对

收稿日期: 2023-08-21; 修回日期: 2023-10-17; 录用日期: 2023-11-03; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3901800, 2022YFB3902905)

通信作者: *1416652331@qq.com

VOC 系统辐射响应变化的量化评估并对分析结果进行了验证。

2 星上定标器介绍

MERSI 包含两个主要模块(MERSI 的基本信息如表 1 所示), 一个为光机模块, 另一个为 VOC 系统。VOC 系统用于 MERSI 的星上辐射定标, 即光机模块的辐射定标, 其辐射性能稳定性分析处理流程如图 1 所示。星上定标器的光路示意图如图 2(a) 所示^[8]。内

置于积分球内的两个卤钨灯光源以及太阳光, 由积分球收集并匀光, 经匀光后该光束进入一个由平面镜和抛物镜组成的扩束系统进行扩束(出射光束为高斯光束)并为 MERSI 所扫描^[8]。在每个扫描周期内, 可实现对地球目标(EV)、冷空间(SV)、星上黑体和星上定标器的观测。4 个监视探测器前均装有滤波片, 其透过波长与 MERSI 前 4 个通道的中心波长相同, 分别为 470、550、650、865 nm, 监视探测器用于监视星上定标器辐射性能的稳定性。

表 1 MERSI 系统基本信息

Table 1 Basic information for MERSI system

Band	Central wavelength / μm	Bandwidth / μm	Instantaneous field of view / m	Noise equivalent reflectance ρ / % or temperature difference(300 K)(reported for Band 5)	Dynamic range
1	0.470	0.05	250	0.45	100%
2	0.550	0.05	250	0.40	100%
3	0.650	0.05	250	0.40	100%
4	0.865	0.05	250	0.45	100%
5	11.25	2.5	250	0.4 K	330 K
6	1.640	0.05	1000	0.08	90%
7	2.130	0.05	1000	0.07	90%
8	0.412	0.02	1000	0.10	80%
9	0.443	0.02	1000	0.10	80%
10	0.490	0.02	1000	0.05	80%
11	0.520	0.02	1000	0.05	80%
12	0.565	0.02	1000	0.05	80%
13	0.650	0.02	1000	0.05	80%
14	0.685	0.02	1000	0.05	80%
15	0.765	0.02	1000	0.05	80%
16	0.865	0.02	1000	0.05	90%
17	0.905	0.02	1000	0.10	90%
18	0.940	0.02	1000	0.10	90%
19	0.980	0.02	1000	0.10	90%
20	1.030	0.02	1000	0.10	90%

3 方 法

3.1 数据筛选

太阳是一个均匀且高度稳定的朗伯光源, 引入稳定的太阳辐射作为星上定标光源, 可有效避免定标光源自身的不稳定性对仪器辐射定标精度的影响。本文基于 FY-3B 卫星的轨道运行特点和 MERSI 星上定标装置的结构设计, 探究太阳光定标时机与太阳天顶角和方位角之间的依赖关系, 以便从大量的多光源(内置灯、太阳光和冷空杂散光)星上定标数据中, 筛选出有效的基于太阳光的星上定标数据。另外, 筛选清晰、无云的 FY-3B MERSI 和 AQUA MODIS 过境 Libya4 沙漠场地上空的 L1 级影像数据用于交叉定标处理和长时间序列绝对辐射定标计算。

由于太阳光锥未配有挡板, 在天顶角和方位角角度合适的条件下, 均会有光源入射至太阳光锥, 并被 MERSI 扫描。针对 MERSI 星上定标装置, 太阳光引入 VOC 透镜组的光轴指向为: 以卫星本体坐标系为参考, 在 XY 平面内从 +X 轴方向向 -Y 轴转 25°(即 25°@XZ 平面); 绕 Y 轴向 +Z 方向转 25°(即 25°@XY 平面), 透镜光轴指向模装图如图 2(b) 所示。

FY-3B 数据预处理系统每 5 min 生成一个星上定标(OBC)数据文件。OBC 文件中并未给出 VOC 太阳天顶角和 VOC 太阳方位角的相关数据。经分析, MERSI 扫描镜的转速为 40 r/min, 对同一扫描周期而言, 星下点时刻和星上定标时刻的太阳光入射角度差异较小, 因此本文采用星下点时刻的太阳天顶角和方位角角度数据代替星上定标时刻的角度数据。

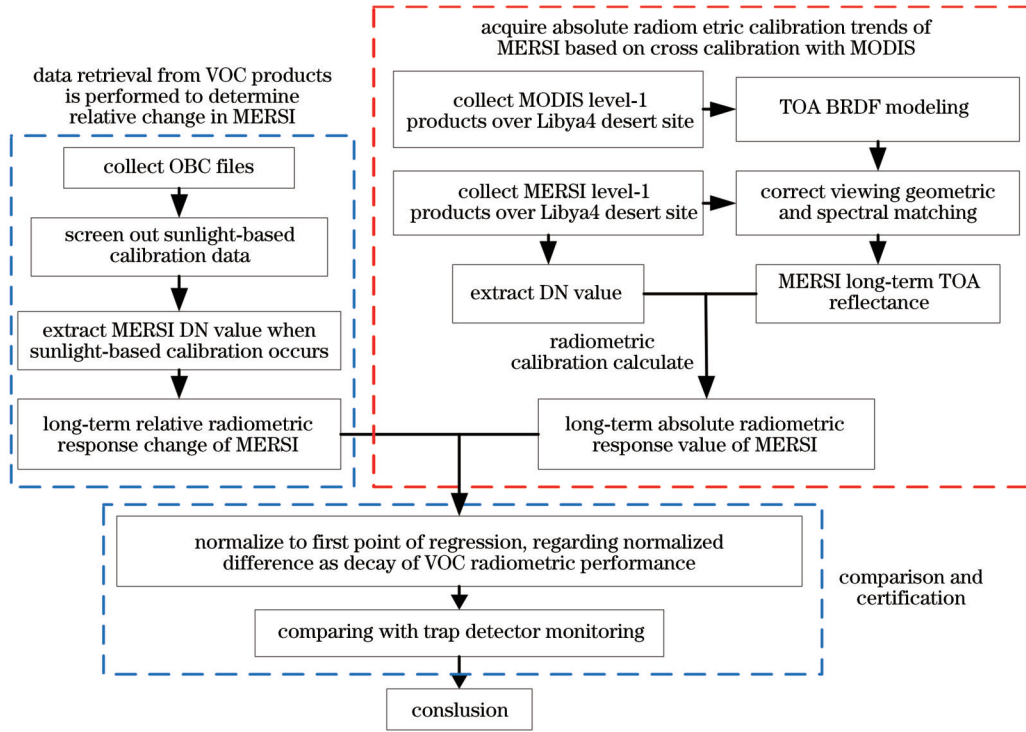


图 1 VOC 系统辐射性能稳定性分析处理流程

Fig. 1 Illustration of visible on-board calibration (VOC) system radiometric properties stability analysis

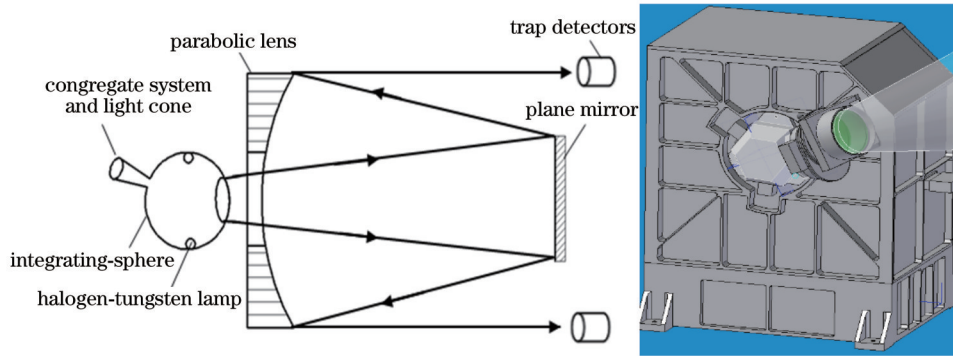


图 2 MERSI VOC。(a)VOC 系统原理示意图;(b)VOC 透镜光轴指向模装图

Fig. 2 MERSI VOC. (a) Schematic of VOC system; (b) three-dimensional structure of lens optical axis point of VOC

3.2 交叉定标

基于均匀稳定场地的定标方法可实现遥感器之间的比对和定标,该方法主要是基于遥感器对稳定场地上空的长期辐射观测,获得遥感器辐射定标稳定性指标^[9]。以高精度 MODIS 遥感器长期观测的 TOA 反射率为参考,构建 BRDF 模型,经几何校正和光谱匹配后计算待定标遥感器 MERSI 的 TOA 反射率,结合数值计数(DN)值实现 MERSI 的在轨绝对辐射定标。

3.2.1 MODIS TOA 反射率建模

Ross-Li BRDF 模型用下式^[10]表示:

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)k_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda) + f_{\text{geo}}(\lambda)k_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda), \quad (1)$$

式中: k_{vol} 和 k_{geo} 分别为体散射核和几何光学散射核;常数 f_{iso} 、 f_{vol} 和 f_{geo} 分别为各向同性散射、体散射和几何

光学散射这三部分所占的比例因子; θ_i 、 θ_v 和 ϕ 分别为太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角。采用最小二乘拟合方法对 Libya4 沙漠场地上空 MODIS 前 7 个通道观测的 TOA 反射率进行 Ross-Li BRDF 模型拟合,求取最优的三个系数使得拟合误差 $\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$ 达到最小^[11]:

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [\rho_i^{\text{TOA}} - \rho(\theta_s, \theta_v, \phi)]^2, \quad (2)$$

式中: ρ_i^{TOA} 为 MODIS TOA 反射率观测值; $\rho(\theta_s, \theta_v, \phi)$ 为根据拟合系数计算的模拟值。

3.2.2 几何校正和光谱匹配

将 FY-3B MERSI 过境 Libya4 沙漠场地时所对应的观测天顶角和方位角、太阳天顶角和方位角分别代入构建的 TOA BRDF 模型,求出 MODIS 遥感器前 7

个通道对应 MERSI 观测方向的 TOA 反射率。由于不同的遥感器光谱响应与目标光谱的耦合作用,使得即使在相同的时间观测相同位置的场景,它们记录的计数值也并不相同。因此在计算 TOA 反射率时,必须有效订正遥感器之间的光谱响应差异。光谱响应差异订正采用光谱卷积实现,光谱卷积公式如下式所示:

$$\rho_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) R_{SR_i}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{SR_i}(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

式中: R_{SR_i} 为 MERSI 通道 i 的相对光谱响应函数; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为 R_{SR_i} 的光谱范围。经过光谱匹配,得到 FY-3B MERSI 对应通道的 TOA 反射率。

3.2.3 MERSI 交叉定标系数计算

定标公式为

$$\rho_i^* = a_i \times (E_{V_i} - S_{V_i}) \frac{d^2}{100 \times \cos \theta}, \quad (4)$$

式中: E_{V_i} 与 S_{V_i} 分别为 MERSI 通道 i 的地球目标观测计数值与冷空目标观测计数值; a_i 为 MERSI 的定标系

数; ρ_i^* 为根据 MODIS TOA 反射率建模计算并经过观测几何校正和光谱匹配修正后得到的 MERSI 入瞳处的通道 i 的表观反射率。

3.3 VOC 衰减变化计算

最小二乘拟合 MERSI 的相对和绝对辐射响应变化趋势,并除以拟合数据的初始值,将二者的差值作为 VOC 系统的辐射输出变化值。采用年衰减变化率 (ADR, 公式中用 A_{DR} 表示) 对 VOC 系统辐射性能衰减变化进行评估。ADR 定义为每年的年初与年末测量值之间的百分误差^[4]:

$$A_{DR_i} = (I_{L,RO_{ins,t}} - I_{L,RO_{ins,t-1}}) / I_{L,RO_{ins,t-1}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中, i 表示年数, $i = 2010, \dots, 2018$ 。

4 数据处理与分析

4.1 MERSI 相对辐射响应追踪

综合考虑 FY-3B 卫星轨道运行的特点和太阳光锥的结构设计,在剔除饱和、填充数据和开灯期间的数据后,最终筛选出天顶角范围在 $95^\circ \sim 135^\circ$ 且方位角范围在 $295^\circ \sim 360^\circ$ 的星上定标数据作为有效的太阳光定标数据。MERSI 星上定标输出 DN 值与太阳天顶角之间的依赖关系如图 3(a) 所示。

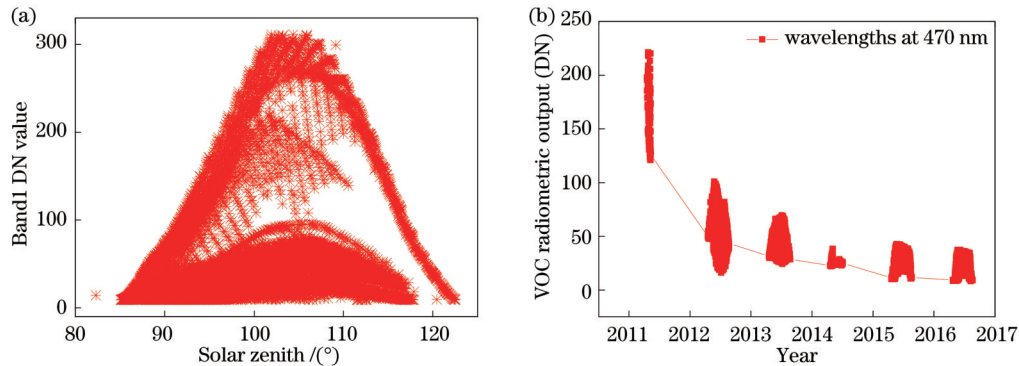


图 3 太阳光定标。(a) MERSI 通道 1 输出 DN 值与太阳天顶角之间的关系图; (b) 基于太阳光定标的 MERSI 通道 1 长时间序列 DN 值

Fig. 3 Sunlight-based calibration. (a) MERSI band 1 DN value as a function of solar zenith; (b) multiyear sunlight-based calibration DN value for MERSI band 1

去除冷空计数值并修正太阳天顶角后, MERSI 通道 1 的长时间序列 DN 值如图 3(b) 所示。可以看出,太阳光定标有效数据分别集中在 2011 年和 2014 年的 4—5 月以及 2012、2013、2015 年和 2016 年的 4—8 月。挑选出上述月份的最大值并使用指数函数进行最小二乘拟合。图 4 中分别给出 17 个反射太阳通道的 DN 值拟合模型、拟合参数 (y_0, A_1, x_0, t_1) 和拟合相关性系数 R 。其中, x 指的是十进制小数年, x_0 表示时间起点,即遥感器的发射日期。该 DN 值变化趋势可反映 MERSI 辐射响应的相对变化趋势。由于在卫星发射初期反射太阳通道 6 和 7 未开始测量,有辐射响应为 0 的情况出现,故本文不对通道 6 和 7 进行分析(通道 5 不在反射太阳波段内,本文也不予考虑)。从图 4 可以

看出,各通道的辐射响应均呈现下降趋势,该变化趋势是由 MERSI 辐射性能的衰减变化和 VOC 系统自身的辐射性能衰减变化共同作用的结果。因此,为了对 VOC 系统的辐射性能衰减进行评估,需要获取 MERSI 辐射性能的长时间序列绝对变化值。

4.2 MERSI 绝对辐射性能评估

本文采用最小二乘拟合方法对 Libya4 沙漠场地上空 MODIS 观测的 TOA 反射率进行 Ross-Li 模型拟合,根据拟合系数构建 TOA BRDF 模型。拟合系数和方均根误差 (RMS) 如表 2 所示。

将拟合系数和 MODIS 的观测几何角度代入式 (1), 得到拟合的 TOA 反射率。MODIS 拟合的和测量的 TOA 反射率分别如图 5 所示。为进一步评估拟

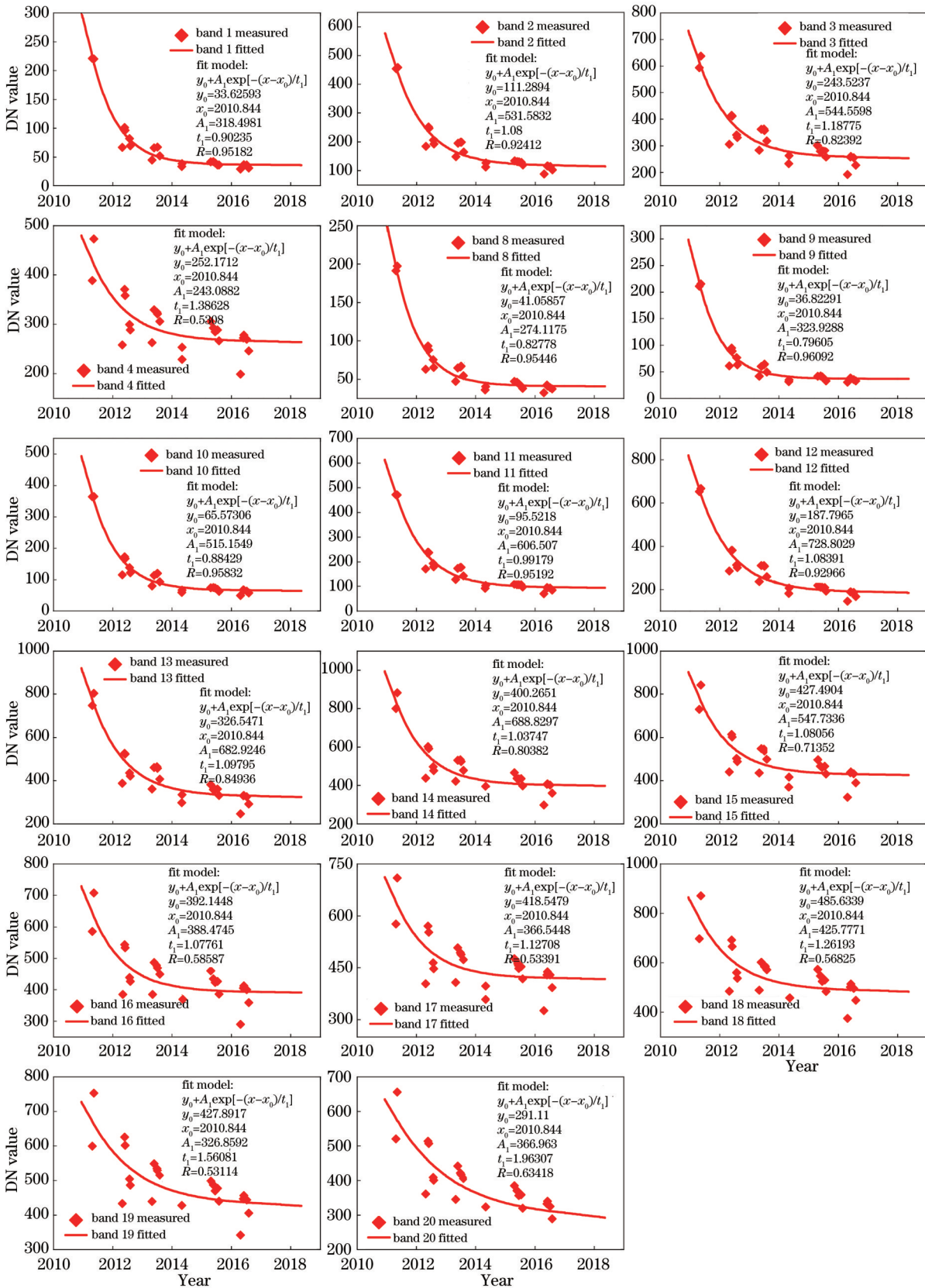


图 4 基于太阳光定标的 MERSI 17 个反射太阳通道 (未考虑通道 6 和通道 7) DN 值的变化

Fig. 4 Variation of DN values for sunlight-based calibration MERSI 17 reflective solar bands (band 6 and band 7 are not under consideration)

合模型的精度, 本文计算测量值与构建模型模拟值之 $Residual(i, j) = [Meas(i, j) -$

间的残差, 计算公式如下式所示:

$$Model(i, j)] / Meas(i, j) \times 100, \quad (6)$$

表 2 TOA BRDF 模型拟合系数
Table 2 TOA BRDF model fitting coefficients

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7
f1	0.46750	0.59360	0.24576	0.34024	0.68450	0.73530	0.67400
f2	-0.04372	-0.06804	0.10440	0.03596	-0.18533	-0.19240	-0.17271
f3	0.02368	0.02920	-0.00302	0.00910	0.04741	0.05273	0.05296
RMS	0.007762	0.009020	0.006093	0.006434	0.011420	0.012120	0.012970

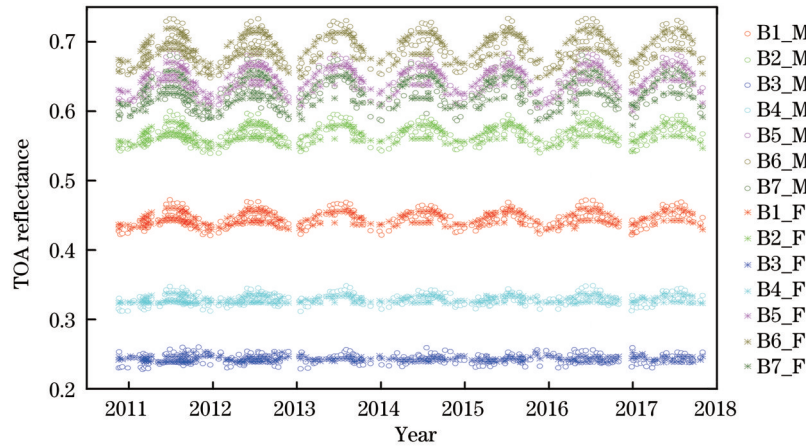


图 5 MODIS测量的和BRDF模型拟合的长时间序列 TOA 反射率。M代表测量数据,F代表模型拟合数据

Fig. 5 Time series of TOA reflectance measured by MODIS versus BRDF model fitting. Measured data are represented as M, and model fitted data are represented as F

式中: $Meas(i, j)$ 为测量值; $Model(i, j)$ 为模拟值; i 和 j 分别代表 MODIS 的通道数和测量的数据点数。计算的残差如图 6 所示。对于 MODIS 通道 1、2、4、5 和通道 6, 二者之间残差均小于 5%; 对通道 3 和通道 7, 残

差最大值分别为 5.49% 和 5.36%。因此, 基于高质量的 MODIS 数据构建的 BRDF 模型可准确地模拟 Libya-4 沙漠场地上空的 TOA 反射率。

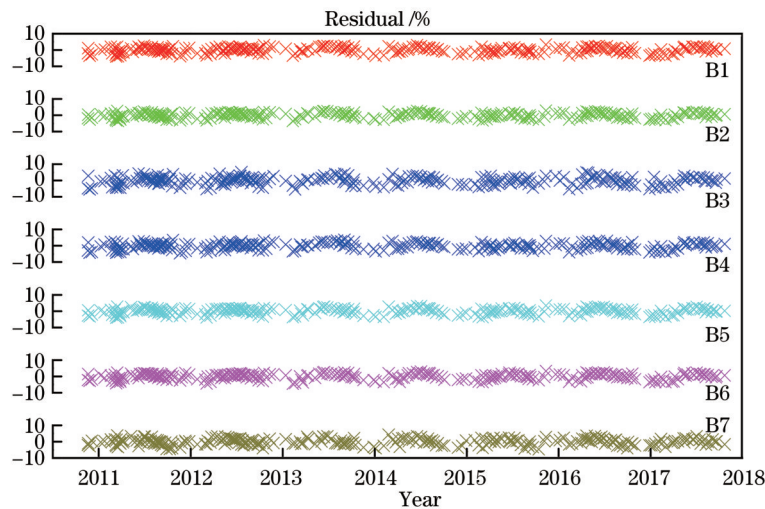


图 6 长时间序列 BRDF 建模残差

Fig. 6 Time series of BRDF modeling residuals

提取 FY-3B MERSI 过境 Libya4 沙漠场地时的观测天顶角和方位角、太阳天顶角和方位角并分别代入构建的 TOA BRDF 模型, 求出 MODIS 遥感器前 7 个通道对应 MERSI 观测方向的 TOA 反射率, 经光谱插值后得 TOA 连续反射率光谱。MODIS TOA 反射率

与 MERSI 光谱响应函数卷积即可得到 MERSI 观测的 TOA 反射率。结合 MERSI 的 DN 值, 得到的 MERSI 长时间序列反射太阳通道的绝对辐射定标增益(定标系数的倒数), 如图 7 所示。可以看出, 通道 1、2、8、9、10、11、12、19 和 20 的辐射响应均出现不同程度的衰

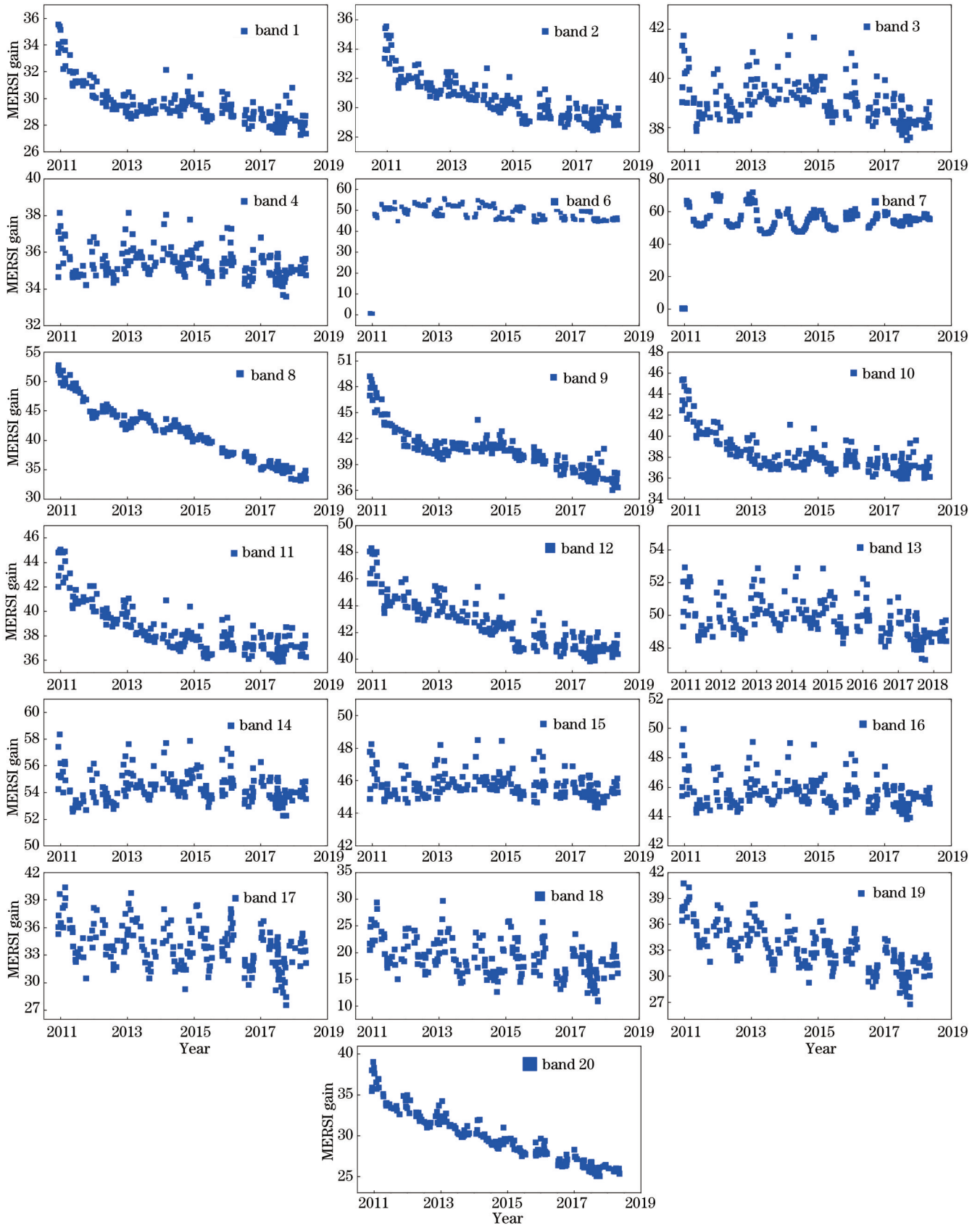


图 7 基于 MODIS 交叉定标的 MERSI 绝对辐射定标增益变化趋势

Fig. 7 MERSI absolute radiometric response degradation trends based on cross calibration with MODIS

减。通道 3、4、13、14、15、16、17 和 18 的辐射性能相对保持稳定。对比所获得的 MERSI 绝对辐射定标增益

趋势与相对辐射响应变化趋势(图 4), 二者的差异在发射初期较大, 说明 VOC 系统辐射性能在发射初期衰

减较大;在发射后期差异相对较小,说明 VOC 系统辐射性能在发射后期趋于稳定。

4.3 VOC 衰减变化分析及验证

为进一步量化分析 VOC 系统辐射性能的衰减变化,本文分别对图 4 和图 7 中 MERSI 各通道辐射响应变化进行归一化。VOC 系统辐射性能在不同波长处(分别对应 MERSI 各反射太阳通道的中心波长)的年衰变率如表 3 所示。VOC 系统衰减率与波长相关。在短波波长(<500 nm)处的衰减率较大,在 470、412、

443、490 nm 处,最大年衰减率分别达到了 47.05%、46.76%、49.51%、47.12%,在较长波长(800~1000 nm)处衰减率相对较小,最大年衰减率均小于 26%。相比于发射初期辐射性能的较大衰减,在轨运行后期衰减趋势逐渐趋于平稳。在 470、650、1030 nm 等波长处,后期衰减率几乎为常量(小于 0.2%),尤其在波长 865 nm 和 905 nm 处,年衰减率均小于 0.1%。截止到 2018 年底,在波长 412 nm 处的年衰减率小于 2%,其他通道均小于 0.64%。

表 3 VOC 系统在各中心波长(nm)处的辐射性能年衰减变化率(%)

Table 3 VOC system radiometric performance annual degradation rates (%) at different central wavelengths (nm)

Year	470	550	650	865	412	443	490	520	565	650	685	765	865	905	940	980	1030
	B1	B2	B3	B4	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20
2010	2.70	1.93	2.65	1.73	2.92	2.67	2.78	2.79	2.01	2.61	2.57	2.17	1.91	1.50	1.10	1.11	0.28
2011	47.05	40.28	37.04	24.38	46.76	49.51	47.12	44.05	39.16	36.51	35.10	30.07	26.32	20.93	15.68	15.45	10.43
2012	45.87	35.15	25.41	14.49	39.01	45.82	43.12	38.83	32.69	24.94	22.34	18.37	15.21	11.49	8.63	9.73	11.98
2013	27.78	20.55	13.33	6.92	18.63	24.58	25.74	24.25	19.05	13.07	10.79	8.73	6.91	4.76	3.13	4.86	7.56
2014	12.16	9.60	6.07	3.04	4.60	8.60	11.55	11.95	9.03	5.94	4.63	3.77	2.88	1.58	0.44	1.85	3.91
2015	3.92	3.52	2.39	1.18	1.64	1.63	4.19	4.81	3.33	2.33	1.81	1.47	1.07	0.21	0.70	0.09	1.20
2016	0.32	0.79	0.76	0.36	4.24	1.10	1.04	1.56	0.70	0.72	0.62	0.49	0.32	0.29	0.96	0.73	0.43
2017	0.79	1.02	0.74	0.33	4.13	0.67	1.56	1.89	0.83	0.70	0.63	0.48	0.31	0.17	0.57	0.69	0.54
2018	0.15	0.22	0.18	0.08	1.91	0.64	0.19	0.45	0.18	0.17	0.16	0.12	0.07	0.07	0.17	0.21	0.13

Notes: Above wavelengths are analogous to MERSI band 1-band 4 and band 8-band 20 (B1-B4 and B8-B20), respectively.

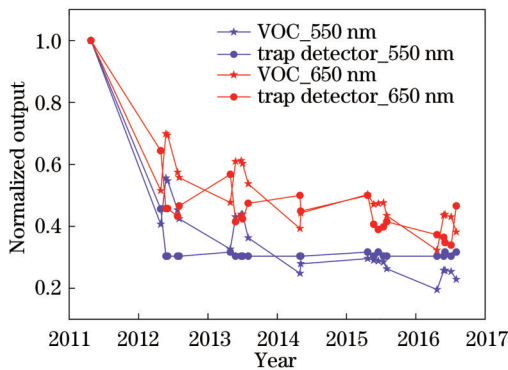


图 8 在波长 550 nm 和 650 nm 处,监视探测器测量的和提出方法计算的 VOC 系统归一化辐射衰减趋势

Fig. 8 Lifetime plots of comparison of VOC system normalized radiometric output for wavelengths centered at 550 nm and 650 nm between results given by proposed method and those obtained from trap detectors

为进一步验证分析结果的准确性和上述分析方法的可行性,本文将计算的 VOC 系统衰减变化结果与监视探测器的测量结果进行对比分析。图 8 分别给出了在 550 nm 和 650 nm 波长处采用两种方法获得的 VOC 系统辐射性能归一化衰减趋势。经分析,在 550 nm 处(数据点 3 和 4 除外),采用本文方法计算的与陷阱探测器测量的 VOC 归一化衰减趋势之间的百分误差(两者的差值除以本文方法计算的 VOC 辐射衰减初始值)最大不超过 15%,在 650 nm 处最大不超过 14%。对比

结果验证了本文提出的分析方法的可行性。另外,VOC 系统在 550 nm 波长处的衰减率大于在 650 nm 波长处的衰减率,进一步验证了本文提出的 VOC 系统辐射输出在短波波长处衰减较大的结论。

5 结 论

本文通过对 MERSI 基于太阳光的星上定标数据的分析处理,实现了 VOC 辐射性能衰减的量化评估。结果表明,MERSI VOC 系统辐射性能衰减率在发射初期较大,在后期逐渐减小,且衰减率与波长相关。与 VOC 监视探测器的测量结果相比,二者之间的差异均小于 15%(仅个别点除外),比对结果验证了本文提出的 VOC 系统辐射性能衰减分析方法的可行性。本文提出的方法可用于其他相关星上定标系统辐射性能的衰减评估,可为实现星上绝对辐射定标和后续星上定标系统的设计和制造提供参考。

参 考 文 献

- [1] Wang M, Cheng Y F, Tian Y, et al. A new on-orbit geometric self-calibration approach for the high-resolution geostationary optical satellite GaoFen4[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(5): 1670-1683.
- [2] Sun L, Hu X Q, Guo M H, et al. Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12): 4929-4942.
- [3] Angal A, Xiong X X, Wu A S, et al. Improvements in the on-

- orbit response versus scan angle characterization of the aqua MODIS reflective solar bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(3): 1728-1738.
- [4] Zhi D D, Wei W, Zhang Y N, et al. FengYun-3 B satellite medium resolution spectral imager visible on-board calibrator radiometric output degradation analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(6): 3240-3251.
- [5] Chander G, Haque M O, Micijevic E, et al. A procedure for radiometric recalibration of Landsat 5 TM reflective-band data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 556-574.
- [6] Wu A, Xiong X, Angal A. Derive a MODIS-based calibration for the AVHRR reflective solar channels of the NOAA KLM operational satellites[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 51(3): 1405-1413.
- [7] 何兴伟, 韩琦, 冯小虎, 等. FY-3B 卫星 MERSI 可见光近红外波段定标精度评估[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1828001.
He X W, Han Q, Feng X H, et al. Calibration accuracy evaluation of visible and near-infrared bands of FY-3B MERIS [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1828001.
- [8] Sun L, Hu X Q, Chen L. Long-term calibration monitoring of medium resolution spectral imager (MERSI) solar bands onboard FY-3[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8528: 852808.
- [9] Lacherade S, Fougne 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] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 977-998.
- [11] Li C, Xue Y, Liu Q H, et al. Using SeaWiFS measurements to evaluate radiometric stability of pseudo-invariant calibration sites at top of atmosphere[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 125-129.

Stability Analysis of Radiometric Properties in Visible On-Board Calibration System of FY-3B Satellite Medium-Resolution Spectral Imager

Zhi Dandan*, Zhao Qichang, Wang Zijun, Ma Jingjing, Zhang Liguu, Zhu Sifeng, Zhou Aiming

Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China

Abstract

Objective The output of the FY-3B satellite's medium resolution spectral imager (MERSI) visible on-board calibration (VOC) degrades with time, which causes concerns regarding its reliability in absolute radiometric calibration. The users must distinguish between the uncertainties determined by the VOC system's radiometric output and the MERSI detectors since this will lead to a detailed temporal evolution comprehension of the MERSI system and VOC radiometric characteristics. Additionally, this can ensure the remote sensing data are fully calibrated and utilized in the observed target study. We aim to investigate the output variation of the MERSI VOC system and have made special efforts to extract the information variations of VOC radiometric performance. The annual degradation rates which are defined as the percentage difference between the results of the first and last measurements of each year are employed to evaluate the VOC radiometric performance. The results are evaluated against the trap detector monitoring to further validate the proposed proceeding approach.

Methods Based on the characteristics of the satellite orbit and the structures of the MERSI VOC, we introduce a novel methodology to assess changes in the VOC system's radiometric output, with a particular focus on analyzing the relationship between the sunlight calibration opportunities and the angles of solar zenith and solar azimuth. Then we screen out the sunlight-based calibration data from multiple light sources (interior lamps, sunlight, space view background) calibration data. The analysis is to provide perspectives on the comparative radiometric performance of MERSI. Meanwhile, the majority band response seems to follow a somewhat downward trend. Subsequently, the performed relative response characterization step employs an exponential function created via least-squares fitting of the VOC data. High-quality MODIS data are leveraged to develop a top-of-atmosphere (TOA) bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model and thus enhance the study precision. The time series of TOA reflectance acquired by BRDF model fitting is compared with that measured by MODIS, with the time series of BRDF modeling residuals analyzed. This model is consequently utilized in cross-calibration processing with nearly 10 years' worth of on-orbit data from MERSI. Cross-calibration processes include spectral matching between the two distinct sensors, viewing geometry correcting, and spectral interpolation. Additionally, the TOA reflectance is further converted to calibration coefficients using a calibration equation with zenith angle, azimuth angle, digital counts, and earth-sun distance. This is to comprehensively evaluate MERSI's absolute radiometric performance, and the relative and absolute radiometric characteristics of MERSI are

standardized based on the initial regression point. This standardization treats the normalized difference as an indicator of the decay in VOC radiometric performance.

Results and Discussions Recent studies using analysis of the MERSI sensor response to the Libya4 pseudo-invariant site and cross-calibration with MODIS show that the FY-3B MERSI has not deteriorated as much as the sunlight-based calibration trend has suggested. The comparison of the above lifetime trends and the relative and absolute radiometric characteristics of MERSI produce a distinction estimate in the calibrations of consecutive FY-3B MERSI pairs. We conclude that the degradation effects of the VOC radiometric performance can explain the observed differences. The results illustrate that the degradation rates of VOC radiometric performance are wavelength-dependent, with an initially higher rate gradually decreasing over the years and eventually stabilizing. Notably, in the early mission stages, the shortwave outputs (below 500 nm) exhibit a substantial degradation, reaching up to 49.51%. Conversely, the decay rates at longer wavelengths (800–1000 nm) are relatively modest, remaining within 26%. In the later stages of the satellite's mission life, the decay rates for most wavelengths are approximately 0.64%, except for 412 nm, which experiences a higher rate at approximately 1.91%. For further validating the employed proceeding approach, we make a comparison of the decay in VOC radiometric performance calculated by us with that monitored by the trap detector. Since we cannot determine how the data amount that passes through the filter changes while in orbit, the radiometric performance of VOC is all normalized by the first measurement value. The results indicate that the maximum percent differences observed throughout the instrument's lifetime remain below 15% at 470 nm and 14% at 65 nm.

Conclusions A general procedure is developed and implemented to provide users with the ability to characterize the decay rate in the VOC system's radiometric output. The results demonstrate that the maximum annual decay rates (ADRs) of the short-wave output (<500 nm) range from 46%–50%, while the longer wavelengths (800–10000 nm) reveal relatively smaller changes of approximately 26%. The current procedure implementation leads to further comprehension of changes in the VOC system output. The adopted novel methodology serves as a valuable reference for extending analogous endeavors that aim at conducting on-orbit absolute radiometric calibration for other sensors.

Key words radiometric calibration; on-board calibration system; medium resolution spectral imager (MERSI); reflective solar band