

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.008

# FY-3B MERSI 短波红外波段温度响应与 在轨定标分析

孙 凌, 胡秀清, 徐 娜

( 国家卫星气象中心中国遥感卫星辐射测量与定标重点开放实验室, 北京 100081 )

**摘 要:** 风云三号 B 星 (FY-3B) 中分辨率光谱成像仪 (Medium resolution spectral imager, MERSI) 的两个短波红外波段 (1.64 和 2.13  $\mu\text{m}$ ) 采用光伏碲镉汞探测器, 由于辐冷问题导致短波红外波段探测器的实际工作温度远高于设计值, 影响了其在轨辐射特性。对处于高温工作状态的 FY-3B MERSI 短波红外波段的长时间序列在轨辐射特性进行了较为系统的研究分析。采用冷空观测和遥测温度时间序列数据开展了工作温度对遥感器响应的影响分析, 发现短波红外波段的冷空值与探测器温度之间存在正相关关系。采用线性模型描述仪器响应的温度依赖性, 获得了温度校正因子; 温度每变化 1 度, 1.64 和 2.13  $\mu\text{m}$  波段冷空观测值分别变化约 0.7% 和 5%。进行温度校正后, 冷空观测时间序列的波动显著降低。采用全球多目标定标方法获得了短波红外波段的在轨辐射响应变化, 在参考温度下, 2011 年 11 月至 2016 年 12 月, 1.64 和 2.13  $\mu\text{m}$  波段的总衰减分别约为 6% 和 11%。通过与 Aqua 中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 的多年交叉比对分析, 发现不管是否在定标过程中进行温度校正, 采用基于长时间序列趋势建模的日定标更新后 MERSI 与 MODIS 的辐射偏差较为稳定, 可以满足 7% 的定标指标要求。

**关键词:** 温度校正; 辐射响应; 冷空观测; 多目标定标; 交叉比对; 短波红外波段

中图分类号: TP732

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)05-0374-011

## Temperature Sensitivity and on-Orbit Calibration Analysis for FY-3B MERSI Shortwave Infrared Bands

SUN Ling, HU Xiuqing, XU Na

( Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The two shortwave infrared (SWIR) bands (1.64 and 2.13  $\mu\text{m}$ ) of Medium Resolution Spectral Imager (MERSI) onboard FY-3B are detected by photovoltaic HgCdTe detectors. Due to the issue of radiant cooler, the SWIR band detectors operated at higher temperatures than specification, which influenced its

**基金项目:** Supported by National Key Research and Development Program of China(国家重点研发计划, 2018YFB0504900、2018YFB0504905), National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 41471303)

**作者简介:** 孙 凌 (1977 -), 女, 山东青岛人, 博士, 研究员, 主要从事反射波段定标、海洋水色与气溶胶遥感研究。

**E-mail:** sunling@cma.gov.cn

**收稿日期:** 2018-07-25; **修改日期:** 2018-09-11

on-orbit radiometric response. The long-term on-orbit radiometric properties of FY-3B MERSI SWIR bands at high working temperature were systematically studied. The time series of space view observation and telemetry temperature measurement were used to analyze the on-orbit temperature dependency. It revealed that there were positive correlations between the SWIR band space view and the detector temperature. Linear models were used to describe the temperature dependency and the temperature correction factors were derived. When the detector temperature changed 1 °C, the space view digital number varied 0.7% and 5% for bands of 1.64 and 2.13  $\mu\text{m}$ , respectively. After the temperature correction, the long-term variation of space view observations decreased significantly. The multi-site calibration method was used to obtain the on-orbit sensor radiometric response change. At the reference temperature, the total attenuations of 1.64 and 2.13  $\mu\text{m}$  bands were about 6% and 11% respectively from Nov. 2011 to Dec. 2016. Through the cross comparison against Aqua moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS), it revealed that when the daily calibration update model based on long-term trending analysis was applied, the radiometric differences between MERSI and MODIS were relatively stable for many years, regardless of whether the temperature effect was accounted for or not in the calibration process, which can meet the calibration expectation of 7%.

**Key words:** temperature correction; radiometric response; space view observation; multi-site calibration; cross calibration; shortwave infrared band

## 1 引 言

风云三号 B 星 (FY-3B) 是中国第二代近极地太阳同步轨道气象卫星的第二颗, 于 2010 年 11 月 5 日发射, 其赤交点地方时为 13:30(自南向北, 升轨), 设计寿命为 3 年。作为该卫星搭载的关键光学成像类仪器, 中分辨率光谱成像仪 (Medium resolution spectral imager, MERSI) 由中国科学院上海技术物理研究所研制, 是一个采用 45° 扫描镜和消旋 K 镜的跨轨多探元并扫式辐射计, 可对星下点  $\pm 55^\circ$  的视场进行对地观测, 每次扫描刈幅为 2900 km(跨轨)  $\times$  10 km(沿轨, 星下点), 可实现每天一次的全球覆盖<sup>[1]</sup>。

FY-3B MERSI 设计有 20 个波段, 覆盖了可见光到热红外的光谱范围, 其中 19 个波段为太阳反射波段 (0.4~2.1  $\mu\text{m}$ ), 采用 12 比特量化。MERSI 设计有两个短波红外 (Short wave infrared, SWIR) 波段, 波段号为 6 和 7, 中心波长分别为 1.64  $\mu\text{m}$  和 2.13  $\mu\text{m}$ , 表 1 给出了这两个短波红外波段的设计指标。不同于其它反射太阳波段采用硅探测器, 这两个短波红外波段探测器采用光伏碲镉汞焦平面器件, 由两条  $1 \times 10$  元探测器线列组成<sup>[2-3]</sup>, 安装在辐射制冷器的一级冷块上, 由辐冷器一级冷却在低温工作。辐射制冷器二级冷块温控点设计为 100 K, 一级温度约为 140 K。发射前, 针对这两个短波红外波段进行了实验室积分球定标测试, 在设计工作温度获得的参考探元、K 镜 A 面的线性定标斜率分别为 0.01661 和 0.00441, 定标截距分别为 -4.105 和 -0.922, 可推得暗背景计数值分别约为 247 和 209。发射前噪声等效反射率分别为 0.064% 和 0.054%, 满量程观测动态分别约为 86% 和 70%。

2010 年 11 月 12 日 FY-3B MERSI 开机获取可见近红外波段数据。经一个月左右加热除气, 于 11 月 26 日实施辐射制冷器防污染保护罩解锁展开操作, 但辐冷防污罩未展开到设计位置。随后进行了一系列的在轨排故试验, 辐冷防污罩仍未能展开到位, 处于小角度展开状态, 导致冷块温度无法达到预定低温。2011 年 1 月 21 日两个短波红外波段开机工作, 其时, 一级冷块温度约为 226 K, 波段 6 的 1 探元失效。由于探测器未工作在预设低温, 同等入射辐射的探测器输出值要高很多, 导致存在高端饱和的现象。在轨测试期间利用冷空观测数据进行了噪声等效反射率的监测分析, 发现噪声等效反射率稳定, 波段 6 和 7 分别

约为 0.11% 和 0.12%; 有效可观测最大反射率分别约为 68% 和 50%。由于两个短波红外波段未工作于设计温度, 其灵敏度和观测动态范围均受到影响, 因此, 未与其它正常工作的太阳反射波段一样完成系统的在轨定标分析, 无法有效支撑后续定量遥感应用。

表 1 FY-3B MERSI 短波红外波段设计指标

Table 1 Specification for FY-3B MERSI SWIR bands

Band	CW( $\mu\text{m}$ )	BW( $\mu\text{m}$ )	IFOV(m)	NE $\Delta\rho$ (%)	Maximum $\rho$ (%)
6	1.64	0.05	1000	0.08	90
7	2.13	0.05	1000	0.07	90

CW: Central wavelength; BW: Bandwidth

IFOV: Instantaneous field of view (nadir)

FY-3B MERSI 没有可靠的太阳反射波段星上定标装置, 其在轨定标更新采用替代定标方法。早期主要基于每年夏季在中国遥感卫星辐射校正场 (China radiometric calibration site, CRCS) 开展的敦煌场地试验获得反射波段的定标系数<sup>[4]</sup>, 为了连续监测仪器辐射响应的在轨变化, 又提出了一种无需同步现场测量的多场地辐射定标方法<sup>[1,5]</sup>。这两种方法都将基于稳定地面目标的大气顶辐射传输模拟值作为辐射定标参考。由于辐射制冷器未正常工作, FY-3B MERSI 的热红外波段未开机, 导致基于深对流云目标的辐射响应跟踪方法无法应用。而由于对冷空窗口的扫描采样有限, 无法获得月球的全圆盘数据, 因此基于月球的辐射定标方法也无法应用。为了实现仪器在轨辐射响应的稳定与及时校正, 国家卫星气象中心于 2013 年 3 月在 FY-3B MERSI 业务定标处理中采用了基于多场地和 CRCS 替代定标的日定标更新方法<sup>[1,6]</sup>。定标方案只考虑了辐射响应的时变化, 并未考虑温度的影响。从国际上高精度成像仪, 如 MODIS 和海洋宽视场扫描仪 (Sea-viewing wide field-of-view sensor, SeaWiFS) 的在轨定标过程来看, 对观测数码值进行温度影响校正是反射波段的定标环节之一<sup>[7-8]</sup>, 通常基于实验室测量获得温度校正因子, 而该校正因子在轨也可能需要适当调整, 如利用月球观测<sup>[9]</sup>。

由于 FY-3B MERSI 辐射保护罩在卫星入轨后未打开至预定位置, 短波红外波段 (1.64 和 2.13  $\mu\text{m}$ ) 探测器的在轨实际工作温度远高于设计值, 导致仪器辐射响应特性发生变化。在缺乏有效地面测试数据的情况下, 需对短波红外波段辐射响应的温度敏感性进行在轨评估, 并基于辐射响应特性完成在轨定标, 以确保仪器一级辐射数据的精度和稳定度, 支持后续遥感应用。

## 2 短波红外波段温度校正因子

### 2.1 冷空与温度遥测数据在轨特征

在每个扫描周期 (1.5 s) 里, MERSI 采集针对冷空间 (Space view, SV)、地球目标 (Earth view, EV)、可见光星上定标器 (Visible onboard calibrator, VOC)、黑体 (Black body, BB) 的观测数据 (数码值), 以及仪器遥测温度数据。采用仪器开机至 2016 年的白天数据, 基于 5 min 段产品得到冷空均值和温度均值的时间序列。为了降低异常数据的影响, 采用冷空的值域范围、标准差、温度的值域范围等阈值进行奇异点剔除, 在均值序列的基础上进一步以 1 个标准差准则进行窗口平均<sup>[10]</sup>, 处理后的短波红外波段冷空计数值与探测器温度 (一级冷块温度) 时间序列如图 1 所示。短波红外波段探测器温度在一天内的变化范围约为 0.2  $^{\circ}\text{C}$ ; 探测器温度在轨存在季节变化, 峰值出现在 1 月和 6 月, 谷值出现在 4 月和 9 月, 年内变化约为 2  $^{\circ}\text{C}$ ; 2010 年至 2012 年, 温度显著上升, 之后相对稳定, 长期变化范围接近 4  $^{\circ}\text{C}$ 。由于探测器的工作温

度显著高于设计值, 短波红外波段在轨的冷空观测值明显高于发射前测量的暗背景值, 特别是波段 7。可以看出, 短波红外波段的冷空观测值与探测器温度之间存在正相关关系, 且波段 7 表现出更为显著的在轨波动。

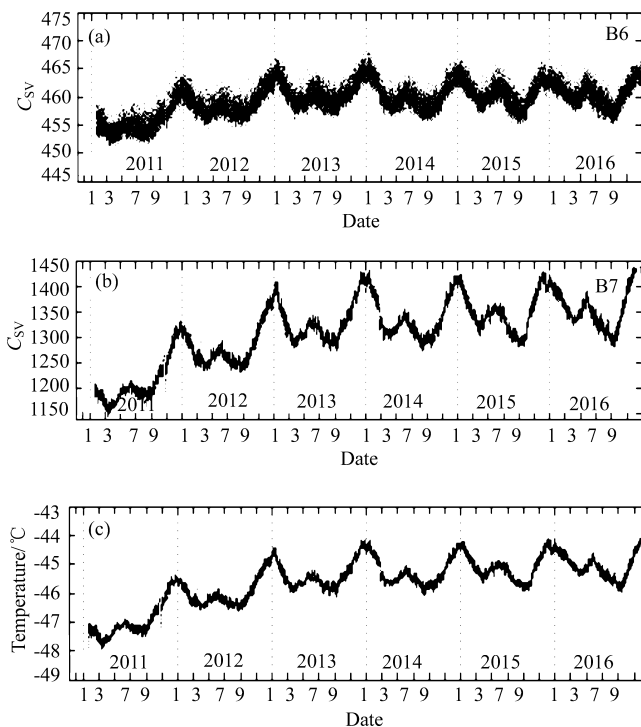


图 1 FY-3B MERSI 波段 6(a), 波段 7(b) 的冷空计数值和探测器温度 (c) 的时间序列

Fig.1 Time series of FY-3B MERSI SV on (a) band 6, (b) band 7, and (c) detector temperature

### 2.2 温度校正因子

借鉴 MODIS 和 SeaWiFS 的温度校正形式, 假定冷空观测随探测器温度的变化关系为

$$C_{SV}^* = C_{SV}(1 + k\Delta T), \tag{1}$$

其中,  $C_{SV}^*$  是参考温度下的冷空计数值,  $k$  是温度校正因子,  $\Delta T$  是实时温度与参考温度的差异,  $\Delta T = T - T_{Ref}$ 。取在轨初期的  $-47\text{ }^\circ\text{C}$  为参考温度, 进行拟合分析。为了使分布在不同温度的数据具有同等的拟合权重, 以  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  间隔进行了数据分段平均处理。图 2 给出了两个波段的拟合散点图。可以看出, 波段 7 的冷空与温度的相关性更高, 其温度敏感性 (斜率的绝对值) 更大; 对于波段 6, 温度每变化  $1\text{ }^\circ\text{C}$ , 冷空观测值变化约  $0.7\%$ ; 对于波段 7, 温度每变化  $1\text{ }^\circ\text{C}$ , 冷空观测值变化约  $5\%$ 。

数据分析过程中发现, 对于波段 7, 冷空观测随温度变化的特征可以进一步分成两个时段, 2011 年 11 月 1 日之前和之后。图 3 给出了两个时段的拟合结果。可以看出, 2011 年 11 月 1 日之前时段的温度校正系数绝对值较之后时段的偏大。在 2011 年 11 月前曾出现剧烈的温度跳变, 原因未知, 这可能导致波段 7 的温度响应特性发生了变化。

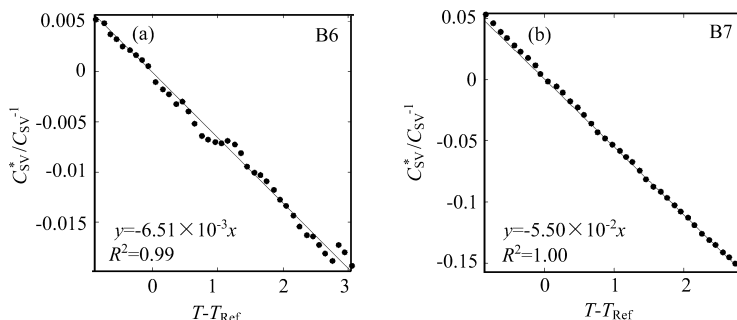


图 2 短波红外波段 6 和 7 的温度校正因子拟合结果

Fig.2 Temperature correction factor fitting for SWIR bands

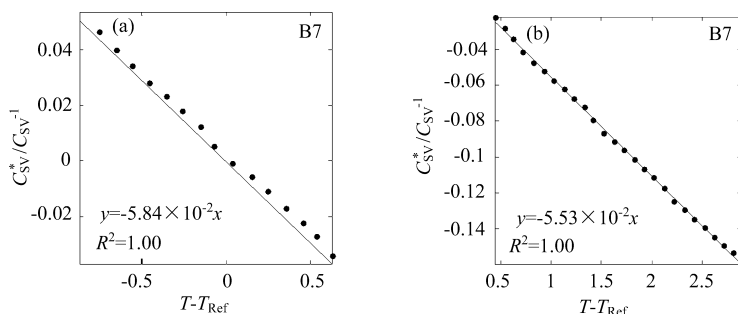


图 3 波段 7 在 2011 年 11 月之前 (a) 和之后 (b) 的温度校正因子拟合结果

Fig.3 Temperature correction factor fitting for band 7 before (a) and after (b) Nov. 2011

### 2.3 温度校正效果

短波红外波段探测器在轨温度变化范围约为  $-48 \sim -44 \text{ }^\circ\text{C}$ ，采用公式 (1)，得到了  $-47 \text{ }^\circ\text{C}$  参考温度下的冷空观测时间序列 (图 4)。经过温度校正，冷空观测的长期和季节变化得以显著降低，对于波段 6，从 12 降到 2，对于波段 7，从 290 降到 10。这表明，温度变化对高温工作的短波红外探测器的冷空观测影响可以得到有效地校正。

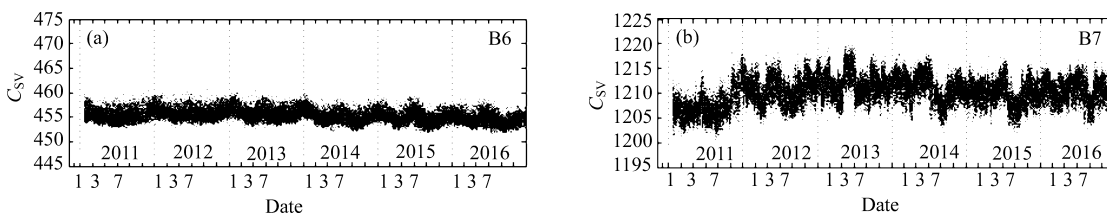


图 4 温度校正后短波红外波段冷空计数值时间序列

Fig.4 Time series of SWIR bands SV after temperature correction

## 3 短波红外波段定标性能分析

### 3.1 辐射定标算法

FY-3B MERSI 采用简单的线性辐射定标算法，地球目标观测 (EV) 的反射率因子， $\rho_{EV} \cos \theta_{EV} / d_{ES}^2$ ，由传感器的响应数码值采用下式得到

$$\rho_{EV} \cos \theta_{EV} / d_{ES}^2 = m d_{EV}^* , \tag{2}$$

其中,  $\rho_{EV}$  为地球目标反射率,  $\theta_{EV}$  为地球目标像元对应的太阳天顶角,  $m$  为定标系数 (斜率),  $d_{ES}$  是日地距离 (AU 单位),  $d_{EV}^*$  为对地观测时经过背景和仪器效应校正后的遥感器响应数码值。

对于短波红外波段, 仪器效应校正包含温度依赖性校正,

$$d_{EV}^* = d_{EV}(1 + k\Delta T) , \tag{3}$$

其中,  $k$  为温度校正因子,  $\Delta T$  为实时温度与参考温度的差异。

扣除暗背景后的响应数码值,

$$d_{EV} = C_{EV} - \langle C_{SV} \rangle , \tag{4}$$

其中,  $C_{EV}$  为地球目标观测的原始响应数码值,  $\langle C_{SV} \rangle$  是冷空观测响应数码值的均值。

对于 FY-3B MERSI 的太阳反射波段, 采用全球多目标定标方法可获得在轨定标系数时间序列<sup>[1,5]</sup>。这种基于辐射传输模拟的定标方法采用了全球不同亮度的稳定目标场以尽可能覆盖遥感器的动态范围并降低单次定标的不确定度。目标场包括戈壁和沙漠, 如敦煌 (40.14°N, 94.32°E)、利比亚 1 (24.42°N, 13.35°E), 利比亚 4 (28.55°N, 23.39°E)、阿拉伯 2 (20.13°N, 50.96°E)、索诺拉 (31.95°N, -114.10°E), 以及海洋目标, 拉奈 (20.49°N, -157.11°E)。尽管无同步的现场测量数据, 使用 Aqua MODIS 数据作为辐射参考, 该方法的大气顶模拟辐射的不确定度 (采用均值  $\pm$  标准差来衡量) 在 0.4~2.1  $\mu\text{m}$  的窗区波段约为 3~7%<sup>[5]</sup>。在进

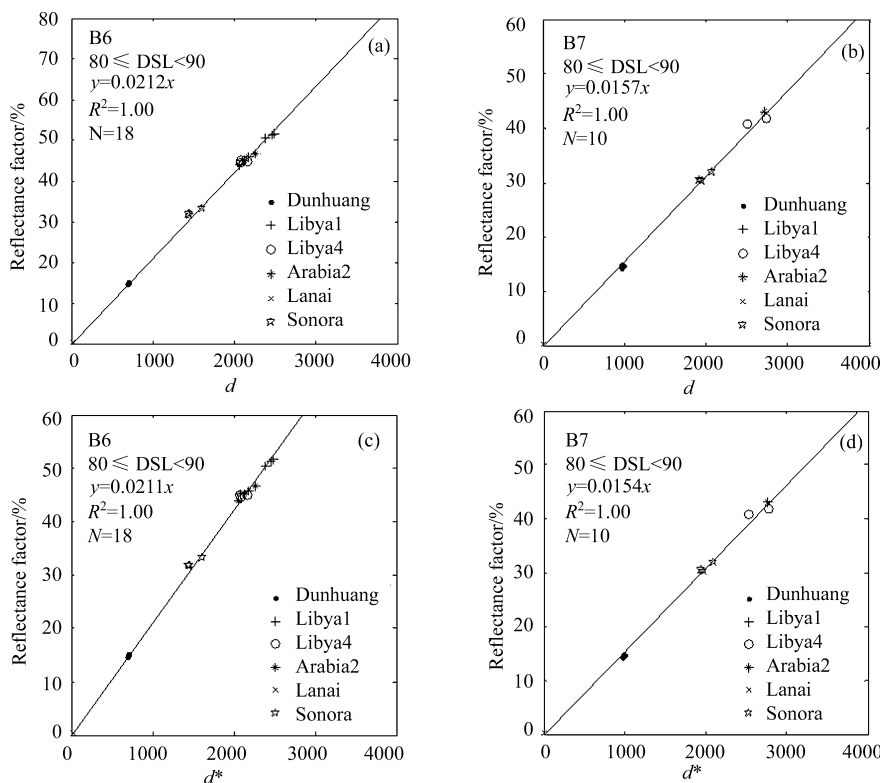


图 5 典型的遥感器响应数码值与模拟反射率间散点图。(a) 波段 6, 无温度校正; (b) 波段 7, 无温度校正; (c) 波段 6, 有温度校正; (d) 波段 7, 有温度校正

Fig.5 Typical scatter diagrams between sensor's digital response and simulated reflectance. (a)On band 6 without temperature correction; (b) on band 7 without temperature correction; (c) on band 6 with temperature correction; (d) on band 7 with temperature correction

行定标系数计算时采用了进行温度校正和不进行温度校正 2 种处理方式。图 5 给出了利用 10 天的观测数据进行单次定标时的散点图示例。通过与发射前定标斜率相比较, 波段 7 的定标斜率显著大于发射前, 表明最小可分辨辐射比发射前差。

为了避免由单次定标系数的不确定性所引起的在轨定标波动, FY-3B MERSI 采用了一种日定标更新模型<sup>[6]</sup>, 该模型采用二次多项式形式, 基于定标系数的长期趋势特征分析获得

$$m(t) = m(t_0)[A_0 + A_1(t - t_0) + A_2(t - t_0)^2], \quad (5)$$

其中,  $m(t_0)$  为初始日  $t_0$  的定标系数;  $A_0$ ,  $A_1$ , 和  $A_2$  是归一化定标系数趋势模型的参数。

### 3.2 遥感器在轨响应变化

基于多目标定标方法获得的定标系数时间序列, 在趋势分析的基础上进行归一化, 可获得仪器归一化响应

$$R(t) = m(t_0)A_0/m(t). \quad (6)$$

归一化响应同样可以采用多项式形式进行建模。图 6 给出了进行温度校正和不进行温度校正情况下的 FY-3B MERSI 短波红外波段的归一化响应时间序列。表 2 列出了仪器响应衰变信息 (2011 年 11 月至 2016 年 12 月)。由于短波红外波段的在轨工作温度远高于设计值, 探测器响应输出值增大, 导致观测动态降低, 在较高的入射辐射时探测器出现饱和现象, 特别是波段 7。高亮度饱和导致高亮的沙漠目标在夏季的时候出现数据缺失, 这增大了定标系数和归一化响应时间序列的噪声。尽管如此, 监测结果表明, 2011 年 11 月两个波段的响应均存在系统性的抬升, 这与图 1 中出现的温度跳变时间一致; 不进行温度校正的结果显示两个波段的衰减率接近, 自 2011 年 11 月至 2016 年 12 月, 波段 6 和 7 分别衰减约 6% 和 5%; 进行温度校正后的结果显示波段 7 的响应衰减明显快于波段 6(在同一参考温度下), 自 2011 年 11 月至 2016 年 12 月, 波段 7 的总衰减接近 11%, 而波段 6 约为 6%。图 6 所体现的波段系统响应趋势是由温度、器件老化等综合作用的结果。探测器温度在前三年存在明显上升的趋势, 由于波段 7 的温度依赖性更强, 因此, 当不考虑温度的影响时, 通道 7 的响应衰减在很大程度上由温度上升带来的响应增大所抵消了, 表现出与波段 6 相当的响应变化。进行在轨温度校正后所获得的参考温度下的系统响应则去除了温度变化带来的影响, 反映了器件老化等的影响结果, 因此, 温度校正后波段 6 和 7 的系统响应变化速率表现出了明显差异, 主要体现在前 3 年。

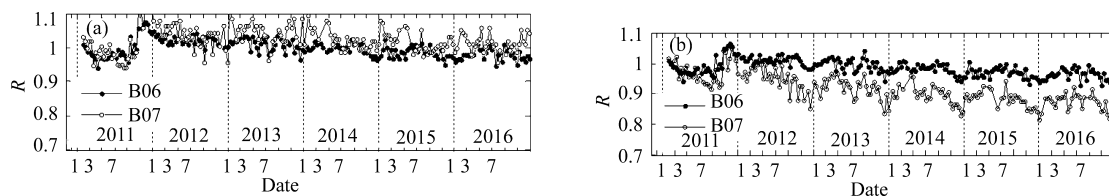


图 6 短波红外波段的归一化响应时间序列。(a) 无温度校正; (b) 有温度校正

Fig.6 Normalized response for SWIR bands without (a) and with (b) temperature correction

### 3.3 基于参考仪器的辐射质量分析

鉴于 Aqua MODIS 反射波段反射率的标称精度为 2%, 以 Aqua MODIS 作为辐射参考仪器, 采用同时星下点观测比对的方法<sup>[1]</sup> 评估定标后 MERSI 辐射数据的质量。样本选择时, MERSI 与 MODIS 星下点时间差小于 5 min, 观测天顶角  $<10^\circ$ , 太阳天顶角  $<85^\circ$ , MERSI 与 MODIS 的天顶角余弦比值  $>0.99$  且  $<1.01$ , 同时采用空间均匀性阈值进行稳定样本的筛选。所获得的样本点多分布于  $65\sim 80^\circ$  的高纬度地区。

表 2 FY-3B MERSI 短波红外波段响应衰变参数

Table 2 Response degradation trending results of FY-3B MERSI SWIR bands

Band	$\sigma/M(\%)$	Total Decay (%)	Annual Decay (%)
6(before correction)	1.65	5.72	1.11
7(before correction)	3.00	4.91	0.95
6(after correction)	1.78	6.39	1.24
7(after correction)	3.33	10.99	2.13

$\sigma$ : 数据与回归模型估计值间偏差的标准差

M: 趋势模型估计值的均值

Total Decay: 2011 年 11 月至 2016 年底的衰减率

Annual Decay: 2011 年 11 月至 2016 年底的年平均衰减率

为了分析 MERSI 和 MODIS 对应波段光谱响应函数差异的影响, 采用 MODTRAN 辐射传输模型针对 5 种典型目标 (海洋、雪、沙漠、海冰和云) 进行了大气顶辐射模拟和通道卷积处理, 其中, 550 nm 气溶胶光学厚度取 0.2, 太阳天顶角  $<80^\circ$ , 观测天顶角  $<35^\circ$ , 相对方位角  $90^\circ$ 。图 7 给出了模拟的 MERSI 与 MODIS 大气顶反射率的散点图, 表 3 列出了两者的相对偏差信息。模拟结果表明, FY-3B MERSI 波段 6 和 7 与 Aqua MODIS 对应波段的辐射差异, 对于不同的地物有所不同, 总的来说, 对于波段 6, MERSI 低于 MODIS 约 2.50%; 对于波段 7, MERSI 高于 MODIS 约 2.15%。由于实际星星比对时观测目标的多样性, 为避免引入更多地不确定性 (特别是小信号时), 因此, 以下比对分析中并未进行光谱响应差异的校正处理。

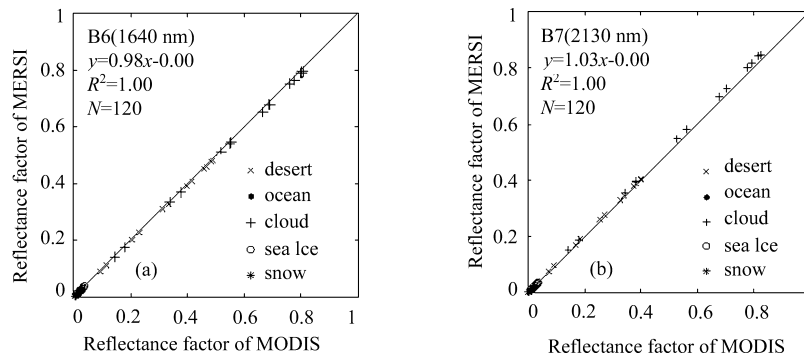


图 7 FY-3B MERSI 与 Aqua MODIS 对应波段的模拟辐射散点图

Fig.7 Scatter plot between FY-3B MERSI and Aqua MODIS simulated reflectance

表 3 MERSI 与 MODIS 大气顶反射率相对偏差信息

Table 3 TOA reflectance percentage difference(%) between MERSI and MODIS simulated radiation

Band	All	Snow	Ocean	Sea Ice	Desert	Cloud
6	$-2.50 \pm 1.03$	$-3.84 \pm 1.06$	$-3.23 \pm 0.45$	$-1.57 \pm 0.20$	$-1.89 \pm 0.09$	$-1.57 \pm 0.19$
7	$2.15 \pm 1.32$	$1.09 \pm 1.90$	$1.81 \pm 0.60$	$3.59 \pm 0.69$	$1.81 \pm 0.70$	$3.59 \pm 0.69$



作为示例, 图 8 给出了 2012 年 8 月 FY-3B MERSI 短波红外波段与 Aqua MODIS 对应波段的辐射比较结果。可以看出, 两者具有较好的一致性, 相对偏差呈正态分布特征。

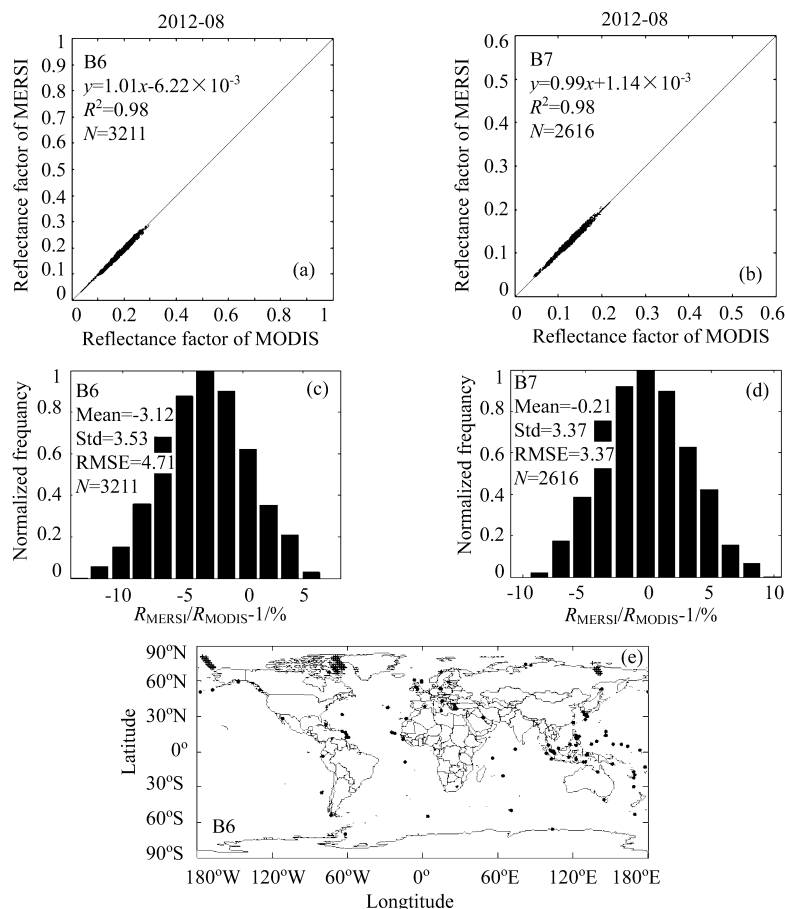


图 8 2012 年 8 月 FY-3B MERSI 短波红外波段与 Aqua MODIS 的散点图 (a),(b); 相对偏差直方图 (c),(d); 与样本空间分布图 (e)

Fig.8 Scatter plot (a),(b) against Aqua MODIS, percentage difference(%) histogram (c),(d) and sample positions (e) for FY-3B MERSI SWIR bands in Aug. 2012

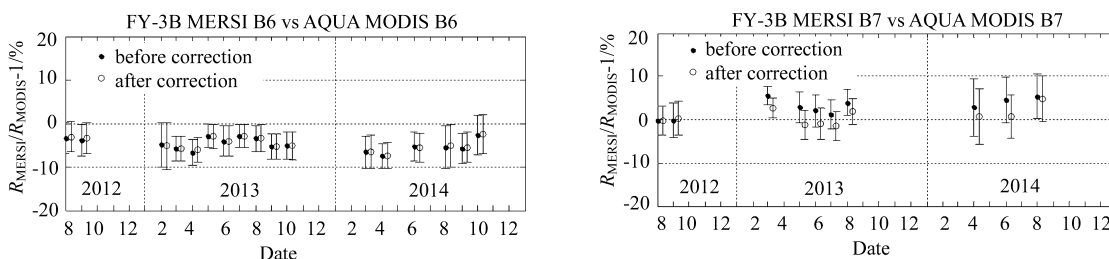


图 9 FY-3B MERSI 短波红外波段与 Aqua MODIS 月平均辐射相对偏差时间序列

Fig.9 Time series of monthly percentage difference(%) against Aqua MODIS for FY-3B MERSI SWIR bands

图 9 给出了自 2012 年 8 月至 2014 年 12 月期间 FY-3B MERSI 短波红外波段与 Aqua MODIS 的月平均辐射相对偏差时间序列。图 10 为对应时段 MODIS 平均反射率时间序列。可以看出, 由于处于高纬度地区, 样本参考反射率较低, 月均值多在 20% 以下。对于波段 6, 由于温度依赖性相对较弱, 温度校正前后的偏差结果接近; 对于波段 7, 温度校正前后的结果略有差异, 温度校正后的结果波动更小。不管是否进行

温度校正, MERSI 与 MODIS 间的相对偏差均较为稳定, 波段 6 的相对偏差均值变化范围为  $-7\% \sim -3\%$ , 标准差变化范围为  $3\% \sim 5\%$ ; 波段 7 的相对偏差均值变化范围为  $-1\% \sim 5\%$ , 标准差变化范围为  $2\% \sim 6\%$ 。

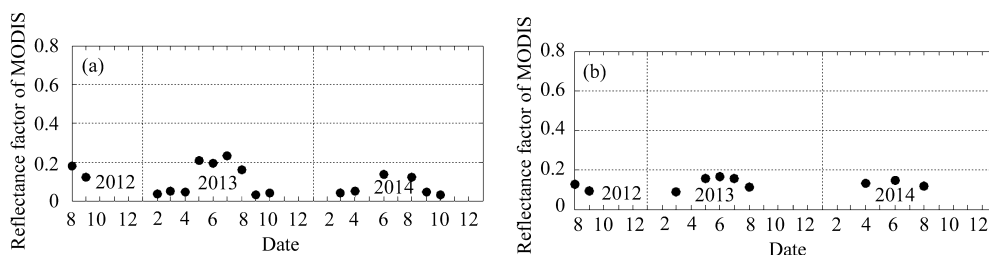


图 10 Aqua MODIS 月平均反射率时间序列

Fig.10 Time series of Aqua MODIS monthly mean reflectance

## 4 结 论

MERSI 是风云三号卫星的主载荷, 尽管设计寿命为 3 年, FY-3B MERSI 已经在轨运行了 7 年多。由于辐冷保护罩的展开问题, FY-3B MERSI 的短波红外波段 ( $1.64$  和  $2.13 \mu\text{m}$ ) 探测器的实际在轨工作温度远高于设计值, 入轨后的冷空间测量值远高于发射前暗背景测量值。由于这两个波段未工作于设计状态, 导致等效噪声反射率、观测动态范围等均受到影响, 因此, 未与其它正常工作的太阳反射波段一样完成系统的在轨定标分析, 影响了后续遥感应用。

基于长时间序列在轨数据分析, 发现了短波红外波段的冷空测量值与探测器温度之间存在正相关关系, 采用线性模型对温度依赖关系进行了描述。应用温度校正后, 参考温度下的冷空观测数据的长期变化显著降低。应用全球多目标方法对两个短波红外波段的在轨辐射响应进行了跟踪分析, 不进行温度校正的结果显示两个波段的衰减率接近, 自 2011 年 11 月至 2016 年 12 月,  $1.64 \mu\text{m}$  和  $2.13 \mu\text{m}$  波段分别衰减约  $6\%$  和  $5\%$ ; 应用温度校正的结果显示, 波段  $2.13 \mu\text{m}$  的在轨衰减高于  $1.64 \mu\text{m}$  波段, 在参考温度下, 自 2011 年 11 月至 2016 年 12 月,  $2.13 \mu\text{m}$  波段的总衰减接近  $11\%$ ,  $1.64 \mu\text{m}$  波段约为  $6\%$ 。以 Aqua MODIS 为参考仪器, 利用交叉比对方法对 MERSI 的辐射数据质量进行了跟踪分析, 发现温度校正前后  $1.64 \mu\text{m}$  波段的偏差结果接近,  $2.13 \mu\text{m}$  波段的结果略有差异, 温度校正后的结果波动更小; 不管是否进行温度校正, MERSI 与 MODIS 相对偏差均较为稳定,  $1.64 \mu\text{m}$  波段的相对偏差均值变化范围为  $-7\% \sim -3\%$ ,  $2.13 \mu\text{m}$  波段的相对偏差均值变化范围为  $-1\% \sim 5\%$ , 可以满足  $7\%$  的定标设计指标要求。

遥感器的系统响应和暗电流会受到仪器工作温度的影响, 但是 FY-3B MERSI 并未在发射前完成与实际在轨工作温度范围对应的实验室特性测试。研究发现了采用光伏碲镉汞的 FY-3B MERSI 短波红外波段的辐射响应存在温度依赖, 并尝试将基于冷空观测得到的温度校正关系应用到对地观测处理上, 以期提高定标的精度和稳定度。尽管这两个波段未工作于预定低温, 但是采用在轨替代定标方法可以满足  $7\%$  的在轨定标指标要求。实时的温度校正有助于提高在轨定标结果的稳定性。对于没有可靠星上定标能力, 依赖替代方法进行在轨定标的遥感器, 由于替代定标方法自身的不确定度等问题, 很难从遥感器系统辐射响应的在轨波动特征中分离出温度的影响, 因此, 为了提高后续遥感器在轨定标精度与稳定度, 需在发射前完成辐射响应的温度影响测试, 在轨提供探测器等部件温度, 以实施精确的含温度校正的在轨辐射定标。后续拟通过对具有更好月球观测能力的 FY-3D 数据分析, 进一步对温度影响因子的确定和应用效果进行研究。

## 参考文献：

- [1] Sun Ling, Hu Xiuqing, Xu Na, *et al.* Post-launch calibration tracking for FY-3B MERSI solar bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(3):1383-1392.
- [2] Hu Xiuqing, Sun Ling, Liu Jingjing, *et al.* Calibration for the solar reflective bands of Medium Resolution Spectral Imager on board FY-3A [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(12): 4915-4928.
- [3] Guan Min, Wu Ronghua. Geolocation approach for FY-3A MERSI remote sensing image [J]. *Journal Applied Meteorological Science*, 2012, **23**(5): 534-538(in Chinese).  
关 敏, 吴荣华. FY-3A 中分辨率光谱成像仪图像地理定位方法 [J]. *应用气象学报*, 2012, **23**(5): 534-538.
- [4] Sun Ling, Guo Maohua, Xu Na, *et al.* On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar ands based on Dunhuang site calibration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(7): 1869-1877 (in Chinese).  
孙 凌, 郭茂华, 徐 娜, 等. 基于敦煌场地定标的 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(7): 1869-1877.
- [5] Sun Ling, Hu Xiuqing, Guo Maohua, *et al.* Multi-site calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(12): 4929-4942.
- [6] Sun Ling, Li Xiaojing. The recalibration of FY-3 MERSI reflective solar bands [C]. *Proceedings of SPIE Vol. 9298*, 2014: 92980O-92980O-11.
- [7] MODIS Characterization Support Team. MODIS Level 1B algorithm theoretical basis document, Version 4[M]. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2013: 21-24.
- [8] Barnes R A, Holmes A W, Barnes W L, *et al.* SeaWiFS prelaunch radiometric calibration and spectral characterization, NASA Tech. Memo. 104566, Vol. 23[M]. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 1994: 8-14.
- [9] Eplee R E, Patt F S, Meister G, *et al.* The on-orbit calibration of SeaWiFS: revised temperature and gain corrections [C]. *Proceedings of SPIE Vol. 6677*, 2007: 66770E-66770E-15.
- [10] Sun Ling. On-orbit gain level identification and normalization of FY-3A MERSI shortwave infrared bands based on space view observation [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE*, 2016: 2955-2958.