

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

孙凌^{1,2}, 郭茂华³, 徐娜^{1,2}, 张立军^{1,2}, 刘京晶^{1,2},
胡秀清^{1,2}, 李元^{1,2}, 戎志国^{1,2}, 赵泽会⁴

1. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081
2. 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, 北京 100081
3. 国家海洋局国家卫星海洋应用中心, 北京 100081
4. 吉林省民航机场集团公司航务管理部, 吉林 长春 130039

摘要 鉴于中分辨率光谱成像仪不能实现反射太阳波段的星上绝对辐射定标, 提出了基于地表方向模型、矢量辐射传输模型 6SV 并联合 MODTRAN 吸收透过率校正的敦煌场替代定标新方法, 4 年的同步定标结果表明, 除了水汽吸收中心波段之外, 定标不确定度小于 5%, 而多数波段优于 3%。以 Aqua MODIS 为辐射基准的大气顶辐射计算试验表明, 正演与卫星观测间的平均偏差在波长 $<1 \mu\text{m}$ 的窗区波段小于 3%, 波长 $>1 \mu\text{m}$ 的小于 5% (除了 $2.1 \mu\text{m}$ 波段); 此外, 经场地定标的 MERSI 表观反射率与 MODIS 具有很好的一致性。基于多年的场地定标结果发现: 可采用二次多项式拟合定标系数的时间变化, 进而实现逐天的定标更新; 波长 $<0.6 \mu\text{m}$ 的波段衰变较大, 波段 8 ($0.41 \mu\text{m}$) 入轨第一年的衰变率约为 14%; 在轨初期衰变最大, 一年后趋缓, 两年后部分波长 $>0.6 \mu\text{m}$ 的波段出现响应增加现象。

关键词 风云 3 号; 中分辨率光谱成像仪; 反射太阳波段; 在轨响应变化; 场地替代定标

中图分类号: TP722.4; V472.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)07-1869-09

引言

风云三号(FY-3)是中国第二代极轨气象卫星, 目前该系列已有两颗(A和B)在轨运行。其中, FY-3A于2008年5月27日在太原卫星发射中心发射^[1], 已在轨运行近4年, FY-3B于2011年11月5日发射。卫星上搭载的主要载荷之一, 中分辨率光谱成像仪(medium resolution spectral imager, MERSI)具有20个波段, 覆盖了可见近红外、短波红外和热红外光谱, 星下点分辨率为250 m和1 km, 能够实现每天一次的全球覆盖, 可应用于陆地、海洋和大气领域的研究。

定量遥感对遥感器的辐射性能十分敏感, 成功进行卫星定量遥感应用的前提之一就是辐射定标。反射太阳波段, 特别是波长在500 nm以下的短波部分, 其在轨辐射响应的时间变化明显^[2], 必须予以有效的监测和订正, 以保证后端数据应用的正确性。(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)是国际公认的性能稳定且定标良好的对地观测仪器, 具有复杂的星上定标分析系统。尽管FY-3 MER-SI是我国研制的高质量民用遥感器, 但其仍不能实现反射太

阳波段的星上绝对辐射定标, 必须采用其他定标手段来保证数据的辐射质量。反射太阳波段的定标方法有很多, 包括基于均匀定标场采用辐射传输模型和同步现场测量参数^[3]或者其他来源参数^[4]的替代定标、利用高亮的均匀稳定目标(如, 沙漠^[5]、冰川^[6]和深对流云^[7])的辐射跟踪、利用月亮目标的辐射跟踪^[8]以及基于参考遥感器或者波段的交叉定标^[9]。总之, 基于地面、高空甚至宇宙目标的稳定性开展长时间跟踪分析, 可以获得卫星遥感器辐射衰变的相对信息, 但是在缺乏可靠的星上绝对定标的情况下, 基准时刻的绝对定标仍然需要依赖基于均匀定标场和同步现场测量参数的场地替代定标来实现。

用于反射太阳波段卫星遥感器定标的中国遥感卫星辐射校正场位于敦煌戈壁(中心位置 40.65°N , 94.35°E)。自1999年起, 开展了多次针对场地特性和卫星遥感器定标的观测试验, 而自2002年起, 基于敦煌场的替代定标成为了风云卫星的业务定标手段^[10]。每年一次的敦煌场地定标试验不仅用来订正发射前定标的偏差, 基于多年观测结果也可以实现遥感器辐射响应衰变的跟踪分析。

经过多年的研究试验, 针对敦煌场替代定标的同步测量

收稿日期: 2012-01-30, 修订日期: 2012-04-17

基金项目: 国家(973计划)项目(2010CB950802, 2010CB950803)和气象行业专项课题项目(GYHY200906036)资助

作者简介: 孙凌, 1977年生, 中国气象局国家卫星气象中心副研究员 e-mail: sunling@cma.gov.cn

方法和定标方法(反射率基法)已基本成熟。敦煌场地并非朗伯表面,在较大的太阳或观测天顶角时反射率具有显著的方向依赖性。这种方向特性导致直接采用现场垂直观测地表反射率和朗伯表面假设获得的多次定标结果具有较大的离散性^[3]。2008 年夏季,通过使用定制的大型地表反射率二向性测量架,获得了敦煌场地地表(bi-directional reflectance distribution function, BRDF)模型^[10]。基于该方向性模型,有学者利用现场垂直观测地表反射率与模型计算值的比值作为修正因子,校正卫星过境时刻模型计算的方向反射率,显著提高了多次定标结果的一致性^[11]。但是,只考虑特定方向上的地表反射率和朗伯假设仍然会引入误差,此外,通常采用标量版的 6S 模型进行辐射传输计算在短波长上存在偏振的影响,气体吸收透过率计算误差(透过率值偏低)也会影响最终的定标结果准确性。

本文对 FY-3 MERSI 的技术指标和运行状态进行了简介;提出了基于实测地表 BRDF 模型,矢量辐射传输模型 6SV 并联合 MODTRAN 吸收透过率校正的反射太阳波段场地替代定标新方法,并以 2011 年 8 月的敦煌场地定标试验为例给出了 MERSI 的定标结果;进而以 Aqua MODIS 为辐射基准,通过相同计算方案下敦煌场 MODIS 大气顶辐射正演结果与观测结果比对,以及同时过星下点的 MERSI 与 MODIS 数据比对,对所提出的定标方法精度进行了检验;最后基于多年的场地定标结果分析了 MERSI 反射太阳波段的在轨响应变化特征和发射前定标的可用性,并提出了一种逐天更新的再定标处理方法。

1 FY-3 MERSI 简介

风云三号卫星运行于 836 公里高的近极地太阳同步轨道,上午星 FY-3A 的赤交点时间为当地时 10:30,下午星为 13:30。MERSI 由中科院上海技术物理所研制,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。FY-3 MERSI 的扫描周期为 1.5 s,可对星下点±55°的视场进行对地观测,提供一个 2 900 km(跨轨)×10 km(沿轨,星下点)的扫描带。该传感器具有 19 个反射太阳波段 RSB(Reflective Solar Band, 0.41~2.13 μm)和 1 个红外发射波段(11.25 mm),其星下点空间分辨率为 250 m(5 个波段,每个波段 40 个探元)和 1 000 m(15 个波段,每个波段 10 个探元),具体指标参见表 1。图 1 和图 2 分别给出了 FY-3A MERSI 和 FY-3B MERSI 反射太阳波段的光谱响应函数。

Table 1 Main design specifications of MERSI spectral bands

波段	中心波长 /μm	波段宽度 /μm	星下点分辨率/m	NEΔρ/% / NEΔT(300 K)	动态范围 (最大 ρ or T)/%
1	0.470	0.05	250	0.45	100
2	0.550	0.05	250	0.4	100
3	0.650	0.05	250	0.4	100
4	0.865	0.05	250	0.45	100
5	11.25	2.5	250	0.54K	330K
6	1.640	0.05	1 000	0.08	90
7	2.130	0.05	1 000	0.07	90
8	0.412	0.02	1 000	0.1	80
9	0.443	0.02	1 000	0.1	80
10	0.490	0.02	1 000	0.05	80
11	0.520	0.02	1 000	0.05	80
12	0.565	0.02	1 000	0.05	80
13	0.650	0.02	1 000	0.05	80
14	0.685	0.02	1 000	0.05	80
15	0.765	0.02	1 000	0.05	80
16	0.865	0.02	1 000	0.05	80
17	0.905	0.02	1 000	0.10	90
18	0.940	0.02	1 000	0.10	90
19	0.980	0.02	1 000	0.10	90
20	1.030	0.02	1 000	0.10	90

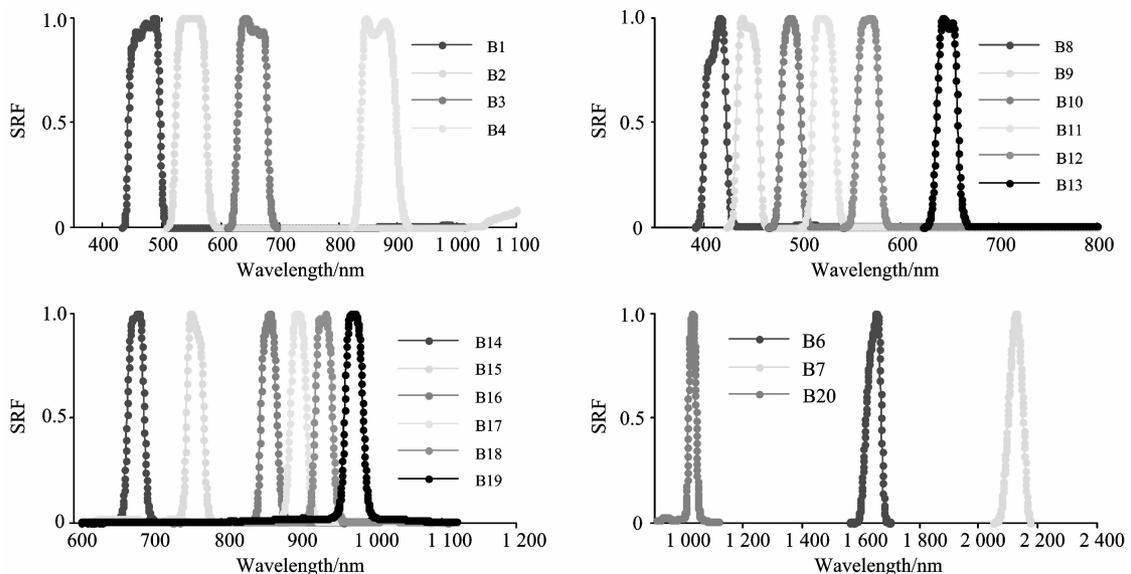


Fig. 1 Spectral response function of FY-3A MERSI RSBs

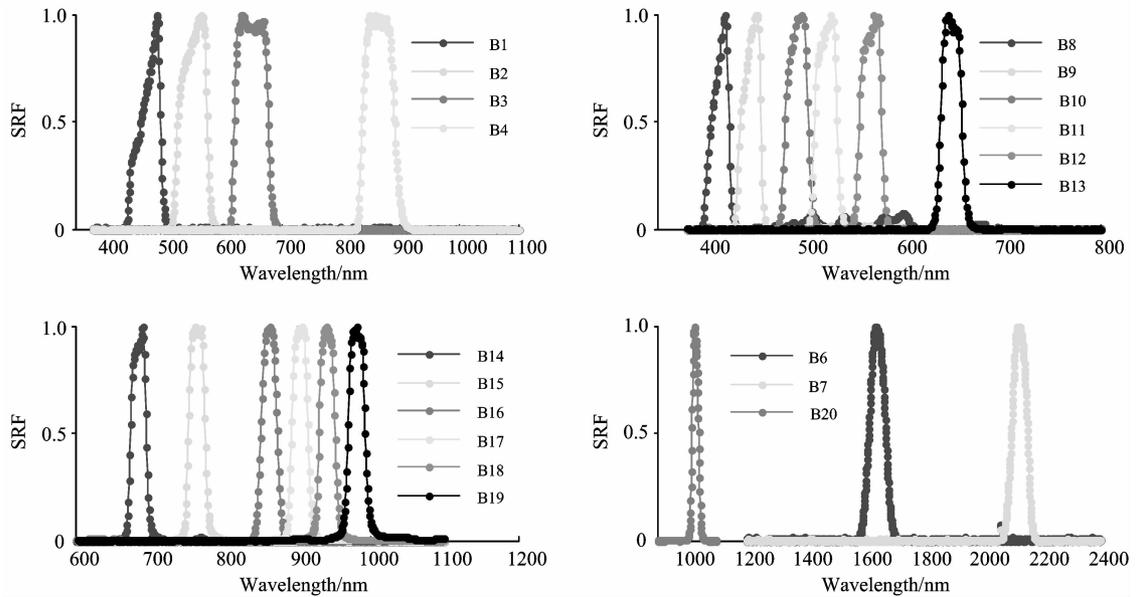


Fig. 2 Spectral response function of FY-3B MERSI RSBS

MERSI 设计有 2 个星上定标装置, 红外波段的黑体和可见近红外波段的星上定标器 (visible onboard calibrator, VOC)。作为星上定标的实验部件, 星上定标器包含一个嵌有内部定标灯的直径 6 cm 的积分球、太阳光入射口、准直出射系统和 5 个绝对辐亮度陷阱探测器 (采用 MERSI 波段 1~4 的滤光片设计, 一个全色波段)。每个扫描周期, MERSI 可实现对深冷空间 (space view, SV)、地球目标 (earth view, EV)、星上定标器和星上黑体的观测。尽管 VOC 不能够实现在轨的绝对定标, 但通过不定期的开灯, 在自身变化校正的基础上可用于监测 MERSI 的在轨变化。

由于采用多元元扫描的工作方式, 探元的非一致性致使原始数据图像存在条带。基于发射前确定的线性校正系数, MERSI 采用星上实时校正方式进行了探元归一化处理, 对于数据中仍存在的探元非一致性影响, 又采用基于全球观测目标直方图匹配方法确定的查找表进行了地面的探元归一化后处理, 进一步降低了探元非一致性的影响。

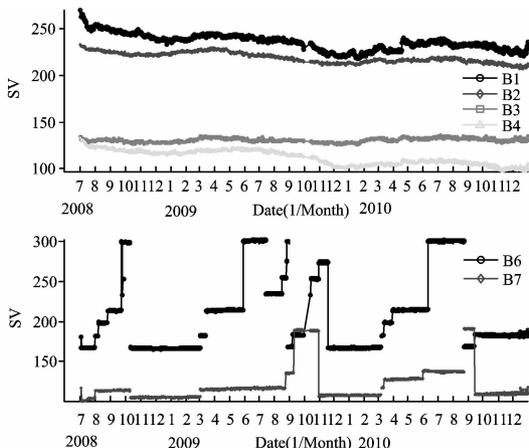


Fig. 3 Space view variation of FY-3A MERSI bands 1 to 4 (upper) and 6, 7 (lower) at Dunhuang

FY-3A MERSI 的短波红外波段 6 和 7 设计为可变增益, 但是受太空环境的影响, 存在增益异常跳变的现象 (见图 3), 这直接导致辐射定标和后端遥感应用的困难。由于 FY-3A MERSI 发射后不久即发生 K 镜驱动故障, 处于固定工位工作状态, 致使原始图像错位, 因此采用了地面消旋处理。FY-3B MERSI 大部分延续了 FY-3A 的设计, 但取消了短波红外波段 6 和 7 的可变增益设置。然而, 由于辐射冷抛罩失败, 在无辐射制冷的非正常工作条件下, 波段 6 和 7 的数据质量受到影响, 特别是波段 7; 红外波段 5 则处于非工作状态。

2 FY-3 MERSI 反射太阳波段场地替代定标

针对 FY-3 MERSI, 自 2008 年以来每年夏季开展一次敦煌场地同步定标观测实验, 期间进行与卫星同步 (卫星过境前后 1 h) 的气溶胶光学特性、地表反射率、大气温湿度廓线等的测量, 用于反射率基法的反射太阳波段辐射定标。

2.1 定标方法

利用辐射传输正演计算的大气顶表观反射率以及 MERSI 对地和冷空观测计数值, 确定各波段定标斜率。

$$\text{RefFactor}(i) = a(i)(\text{EV}(i) - \text{SV}(i)) \quad (1)$$

$$\text{RefFactor}(i) = \text{Ref}(i)(d_0/d)^2 \cos(\text{SolZ}) \quad (2)$$

其中, a 为定标斜率, i 为波段, Ref 为正演计算的大气顶反射率, RefFactor 为反射率因子 (0~100%), SolZ 为太阳天顶角, $(d_0/d)^2$ 为日地距离修正因子, EV 和 SV 分别为 MERSI 对地和冷空观测 (作为辐射零点) 计数值。

用于正演计算的辐射传输模型采用 6SV 和 MODTRAN4.0。其中, 矢量版的 6SV 模型主要用于散射计算, 由于 6S 计算的气体吸收透过率普遍偏低, 因此采用 MODTRAN 的气体吸收透过率结果进行大气顶反射率订正。

6SV 中提供的大陆型和背景沙漠型气溶胶模型的 Ångström 波长指数分别约为 1.2 和 0.3。鉴于敦煌同步实验

期间的实测 Ångström 波长指数通常介于 0.3~1.3, 正演计算时根据实测气溶胶波长指数分别采用大陆型(Ångström>0.75)或背景沙漠型(Ångström<0.75)。

地表 BRDF 模型采用 MODIS 的 (algorithm for model bidirectional reflectance anisotropies of the land surface, AMBRALS)

$$R(\text{SenZ}, \text{SolZ}, \text{RelA}, \lambda) = \text{Par1}(\lambda) + \text{Par2}(\lambda)k_{\text{vol}}(\text{SenZ}, \text{SolZ}, \text{RelA}) + \text{Par3}(\lambda)k_{\text{geo}}(\text{SenZ}, \text{SolZ}, \text{RelA}) \quad (3)$$

其中, λ 是波长; R 是方向反射率; SolZ 是太阳天顶角, SenZ 是观测天顶角, RelA 是相对方位角; k_{vol} 为体散射核, k_{geo} 为几何光学核; Par1 , Par2 和 Par3 为核系数, 分别表示各向均匀散射、体散射、几何光学散射这三部分所占的权重。模型参数 Par1 , Par2 和 Par3 与光谱有关, 采用 2008 年敦煌地区实测值, 见图 4。

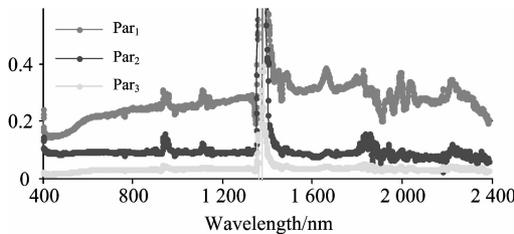


Fig. 4 In-situ BRDF model parameters of Dunhuang surface in 2008

由于敦煌实测 BRDF 模型是针对 2008 年的测量数据建立的, 实际计算时需利用同步实测的地表反射率光谱进行参数订正, 并做波段光谱卷积处理。

$$\text{CorFactor}(\lambda) = R_{\text{in-situ}}(\lambda) / R_{\text{model}}(\text{SenZ}, \text{SolZ}, \text{RelA}, \lambda) \quad (4)$$

Table 2 Synchronous parameters for FY-3B MERSI Dunhuang vicarious calibration(VC) in Aug. 2011

日期	$\tau_a(550)$	Ångström	水汽/(g·cm ⁻²)	SolZ(°)	SenZ(°)	RelA(°)
8-18	0.085	1.21	2.026	33.798	39.543	39.330
8-24	0.138	1.14	1.300	34.027	22.59	-43.253
8-25	0.134	1.079	0.799	32.362	7.261	-229.837
8-30	0.170	0.776	2.243	34.651	1.742	-41.664

Table 3 Calibration slopes of FY-3B MERSI Dunhuang VC in Aug. 2011

波段	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11
8-18	0.030 6	0.030 1	0.028 4	0.030 0	0.022 7	0.017 9	0.028 1	0.025 4	0.023 0	0.022 7
8-24	0.030 4	0.029 7	0.027 9	0.028 7	0.021 6	0.016 9	0.027 8	0.025 2	0.022 8	0.022 4
8-25	0.030 2	0.029 3	0.026 9	0.027 6	0.022 2	0.017 4	0.027 6	0.025 0	0.022 5	0.022 2
8-30	0.030 7	0.029 9	0.027 7	0.028 8	0.022 5	0.017 5	0.028 1	0.025 5	0.022 9	0.022 6
Mean	0.030 4	0.029 6	0.027 5	0.028 4	0.022 1	0.017 3	0.027 8	0.025 2	0.022 7	0.022 4
CV/%	0.725 4	1.067 3	1.843 0	2.370 6	2.136 6	1.737 1	0.878 9	0.913 4	0.966 8	1.047 3
波段	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
8-18	0.022 6	0.022 5	0.019 9	0.021 0	0.023 1	0.023 8	0.020 6	0.025 4	0.029 0	
8-24	0.022 5	0.021 9	0.019 4	0.020 5	0.022 1	0.022 7	0.020 3	0.023 9	0.027 3	
8-25	0.022 0	0.021 1	0.018 7	0.019 7	0.021 3	0.022 6	0.022 2	0.023 2	0.026 0	
18-30	0.022 4	0.021 8	0.019 3	0.020 5	0.022 3	0.022 5	0.018 6	0.023 8	0.027 4	
Mean	0.022 3	0.021 6	0.019 1	0.020 2	0.021 9	0.022 6	0.020 4	0.023 6	0.027 0	
CV/%	1.268 9	1.949 4	2.057 1	2.286 6	2.324 1	0.460 1	8.755 7	1.570 2	2.639 5	

$$\text{Par}'(\lambda) = \text{Par}(\lambda)\text{CorFactor}(\lambda) \quad (5)$$

$$\text{Par}(i) = \frac{\sum \text{SRF}(i, \lambda)\text{Par}'(\lambda)\text{Es}(\lambda)}{(\sum \text{SRF}(i, \lambda)\text{Es}(\lambda))} \quad (6)$$

其中, CorFactor 为参数校正因子; $R_{\text{in-situ}}$ 和 R_{model} 分别为实测的和模型计算的地表反射率; Par 和 Par' 分别是原始的和校正后的参数值; $\text{SRF}(i, \lambda)$ 为波段 i 的光谱响应函数; Es 为太阳常数; $\text{Par}(i)$ 为波段 i 的等效参数值。

其他的大气参数, 如 550 nm 气溶胶光学厚度 $\tau_a(550)$ 采用卫星过境前后半小时内的场地测量均值, 臭氧柱含量采用 OMI 产品, 大气温湿压廓线采用敦煌国家气候气象台同步加放探空气球的结果。

星地同步的卫星数据选取采用如下规则: 以距离场地中心最近的像元为中心, 取 3×3 窗口像元, 若最近像元与场地中心的距离偏差超过 0.01°, 则剔除; 计算 3×3 像元窗口的均值 Mean 与方差 Std, 若像元窗口波段 2(550 nm) 的方差系数 CV(Std/Mean) 超过 1%, 则剔除; 以 3×3 窗口均值进行计算。

2.2 2011 年定标结果

以 2011 年为例给出了 FY-3B MERSI 的定标结果。2011 年 8 月同步试验期间可用的 MERSI 数据共 4 日, 表 2 列出了同步日的大气和角度参数信息。表 3 列出了定标结果(斜率)信息, 其中均值和方差系数为卫星天顶角 < 30° 的结果。可以看出, 定标结果具有良好的一致性, 剔除观测角度偏大的 18 日, 3 次定标结果的方差系数小于 3%(除了波段 18)。由于波段 6 和 7 处在无辐射制冷的非正常工作状态, 波段 18 受水汽吸收影响严重, 而水汽测量具有很大的不确定性, 因此, 波段 6, 7 和 18 的定标计算结果只作为参考。

3 基于 MODIS 的评估分析

鉴于 Aqua MODIS 辐射性能优于 Terra MODIS^[2], 将以 Aqua MODIS 为辐射基准, 对 MERSI 场地定标精度和应用效果进行评估。采用了两种方法: 一是利用敦煌场同步数据计算 MODIS 各波段的大气顶辐射, 并与 MODIS 实际观测值进行比较, 用以评估定标正演计算的精度; 二是将再定标后的 MERSI 表观反射率与 MODIS 进行同时过星下点数据对比, 用以评估定标应用效果。

3.1 大气顶辐射计算精度评估

从 NASA 获取了 2008~2011 年敦煌同步实验期间的版本 5 的 MODIS 1 级(MYD1KM)和定位(MYD03)产品。采用与 MERSI 相同的方法提取卫星同步数据, 其中, 数据均匀

性判别准则为波段 4(555 nm)的方差系数 CV 不能超过 1.5%。

可用的 Aqua MODIS 数据共 9 日。表 4 列出了同步日的参数信息。由于 MODIS 波段 11~16 在敦煌场存在饱和现象, 波段 18, 19 和 26 受水汽吸收影响严重, 因此, 计算分析只针对前 10 和第 17 波段(中心波长分别为 645, 858, 469, 555, 1 240, 1 640, 2 130, 412, 443, 490 和 905 nm)进行。

表 5 为 MODIS 正演大气顶辐亮度与卫星观测值的相对偏差 $(100(\text{Rad}^{\text{Est}} - \text{Rad}^{\text{Mea}})/\text{Rad}^{\text{Mea}})$ 信息。可以看出, 对于 Aqua MODIS, 当卫星天顶角 $< 30^\circ$ 时正演结果在波段 1, 4, 7, 8 和 17 具有偏高趋势, 而在波段 2, 3, 5, 9 和 10 具有偏低趋势。除了短波红外波段 7(辐射值太低)之外, 平均相对偏差在 5% 以内, 而当波长 $< 1 \mu\text{m}$ 时, 除了水汽吸收翼区的波段 17, 平均相对偏差约在 3% 以内。

Table 4 Synchronous parameters for Aqua MODIS Dunhuang VC from 2008 to 2011

日期	$\tau_a(555)$	Angstrom	水汽/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	SolZ($^\circ$)	SenZ($^\circ$)	RelA($^\circ$)
2008-9-10	0.133	0.703	0.575	42.783	51.037	-43.513
2009-8-28	0.226	0.566	0.727	38.308	50.737	-40.318
2009-8-29	0.164	0.702	0.840	32.759	34.554	-233.586
2010-8-14	0.146	1.362	0.470	28.470	15.370	-229.334
2010-8-18	0.169	1.096	1.169	27.919	48.400	-237.443
2011-8-18	0.082	1.215	2.02	34.464	50.731	-39.230
2011-8-22	0.276	0.406	1.680	32.657	18.202	-44.070
2011-8-24	0.144	1.109	1.300	32.066	4.420	-229.75
2011-8-26	0.137	0.991	1.130	31.689	25.800	-233.128

Table 5 Relative difference between simulated Aqua MODIS top of the atmosphere (TOA) radiance and sensor measurements from 2008 to 2011

波段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	17
2008-9-10	-0.952 2	-3.978 5	-1.228 9	0.684 1	-4.2287	-1)	8.770 1	0.058 8	-2.785 5	-3.508 1	1.075 7
2009-8-28	-1.140 6	-2.585 2	-0.801 0	0.027 1	-5.714 4	-6.192 4	9.741 5	1.766 0	-1.555 7	-2)	5.203 4
2009-8-29	-1.040 6	-4.083 6	-0.896 3	1.572 5	-7.970 6	-1)	2.486 5	0.245 6	-1.760 3	-2.198 7	2.094 5
2010-8-14	0.739 5	-1.140 1	-3.4160	1.894 4	-3.650 7	-0.777 1	9.575 8	0.264 7	-3.9590	-4.132 4	5.114 6
2010-8-18	-2.186 7	-4.433 6	-1.596 0	0.126 6	-6.180 8	-1)	7.633 2	-2.868 4	-2.216 3	-2.649 6	-0.8485
2011-8-18	3.633 0	1.996 3	-0.043 5	3.445 2	-0.295 2	1.820 1	15.935 1	3.008 9	-1.152 8	-1.779 1	6.745 2
2011-8-22	3.017 0	-0.587 6	-0.725 1	3.869 6	-2.619 1	-1)	14.530 4	6.132 1	-0.449 8	-2.532 5	3.607 6
2011-8-24	2.206 8	-1.409 4	-1.997 6	2.983 1	-5.217 3	-1)	11.654 9	3.160 8	-2.298 0	-2.887 2	5.032 5
2011-8-26	-0.326 3	-4.417 5	-0.848 3	2.526 1	-7.161 7	-1)	12.552 5	2.943 2	-0.787 3	-1.668 6	2.748 7
Mean	0.438 9	-2.293 2	-1.283 6	1.903 2	-4.782 1	-1.716 5	10.320 0	1.634 6	-1.885 0	-2.669 5	3.419 3
Std	2.066 5	2.197 9	0.973 4	1.417 3	2.378 1	4.088 0	3.998 4	2.567 6	1.079 2	0.838 9	2.389 2
Mean(SenZ<30°)	1.409 3	-1.888 7	-1.746 8	2.818 3	-4.662 2	-0.777 1	12.078 4	3.125 2	-1.873 5	-2.805 2	4.125 9
Std(SenZ<30°)	1.492 4	1.720 3	1.251 7	0.830 9	1.979 3	0.000 0	2.055 8	2.398 5	1.605 8	1.022 2	1.149 6

1): 波段 6 存在饱和探元; 2): 波段 10 饱和

3.2 定标应用效果评估

获取与 MERSI 过相同星下点时间在 5 分钟之内的版本 5 Aqua MODIS 1 级和定位产品。以星下点为中心进行 MERSI 和 MODIS 的兰伯特投影(1 024×1 024), 采用如下准则进行数据的空间匹配:

- * 角度要求: $\text{SenZ} < 35^\circ$;
- * 卫星天顶角差异要求:

$$|\cos(\text{SenZ}_{\text{MODIS}})/\cos(\text{SenZ}_{\text{MERSI}}) - 1| < 0.01;$$

* 空间均匀性要求(4×4 窗口): $\text{CV} < 3\%$ 。

考虑到波段光谱差异的影响, 只针对 MERSI 的波段 1~4, 6~10, 17 和 18 与 MODIS 的波段 3, 4, 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 17 和 19 进行对比分析。

图 5 给出了 2011 年 8 月 21 日的 FY-3B MERSI 与 Aqua MODIS 的大气顶表观反射率(%) 比对散点图, 两者的线性

拟合参数信息示于图中。结果表明, MERSI 和 MODIS 大气顶表观反射率具有很好的一致性, 两者的相关系数 R^2 约为 1.0, 线性拟合分析的斜率均在 1 ± 0.05 以内(波段 10 略超)。

4 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化

遥感器各波段的定标系数(斜率 a)反映了其辐射响应($1/a$)的变化。采用相同的处理方法得到了 2008 年—2011 年 FY-3A MERSI 4 次敦煌场地同步定标的结果(表 6), 可以看出, 除了水汽吸收中心波段 18 之外, 每次定标的不确定度均在 5% 以内, 而除了波段 17~20 之外, 定标不确定度小于 3%。

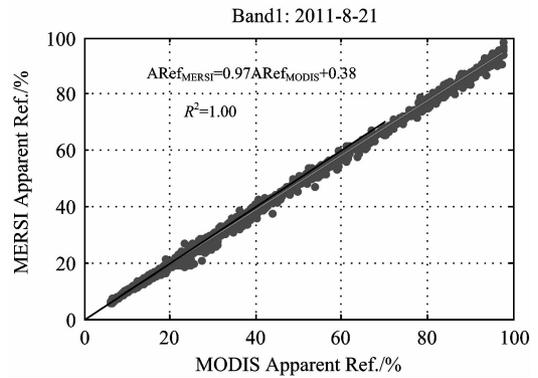


Fig. 5 Scatter plot of Aqua MODIS TOA apparent reflectance (%) versus FY-3B MERSI on Aug. 21, 2011

Table 6 Multi-year calibration results of FY-3A MERSI RSBs

波段	2008-9		2009-8		2010-8		2011-8	
	Mean	CV/%	Mean	CV/%	Mean	CV/%	Mean	CV/%
1	0.030 8	0.940	0.033 9	0.393	0.034 7	1.681	0.035 8	1.298
2	0.028 3	0.007	0.030 7	1.272	0.030 8	1.934	0.031 0	1.507
3	0.023 8	0.509	0.025	1.892	0.025	2.273	0.024 7	1.522
4	0.027 4	0.877	0.028 6	1.305	0.028 8	2.025	0.028 6	2.173
6	0.022 9 ⁽¹⁾	2.840	0.015 9 ⁽³⁾ /0.030 1 ⁽⁴⁾		0.017 8 ⁽⁶⁾	2.659	0.027 6 ⁽⁸⁾	1.083
7	0.022 9 ⁽²⁾	0.585	0.021 1 ⁽⁵⁾	0.540	0.023 9 ⁽⁷⁾	2.868	0.030 2 ⁽⁹⁾	1.645
8	0.023 4	0.099	0.027	0.740	0.029 4	1.874	0.032 7	1.509
9	0.024 6	1.158	0.027 1	0.545	0.028 1	1.445	0.029 4	1.624
10	0.024 1	1.063	0.025 8	1.162	0.026 3	1.623	0.026 9	1.274
11	0.019 2	0.652	0.020 8	1.460	0.021	1.811	0.021 4	1.111
12	0.023 1	0.074	0.024 4	1.504	0.024 4	2.229	0.024 5	1.399
13	0.021 9	0.356	0.022 9	2.106	0.022 8	2.279	0.022 6	1.404
14	0.020 7	0.444	0.021 7	1.883	0.021 7	2.448	0.021 5	1.575
15	0.027 5	0.163	0.029 2	1.352	0.029 6	2.381	0.029 3	2.018
16	0.020 2	0.833	0.021 1	1.242	0.021 4	1.938	0.021 2	2.265
17	0.024 0	1.266	0.025 6	2.501	0.026 1	3.287	0.026 1	4.700
18	0.033 6	4.839	0.036 1	4.899	0.036 6	7.882	0.037 3	10.866
19	0.022 9	4.140	0.024 1	1.648	0.024 8	3.267	0.025 4	3.034
20	0.024 8	4.984	0.026	2.173	0.028 1	2.629	0.029 1	2.444

(1): SV 为 214.6; (2): SV 为 96.5; (3): SV 为 300.7; (4): SV 为 169.8; (5): SV 为 135.8; (6): SV 为 301.4; (7): SV 为 137.2; (8): SV 为 183.9; (9): SV 为 109.8

4.1 在轨响应的时问变化

基于 2008~2011 年的敦煌场地同步定标结果, 采用二次多项式拟合定标系数的时问变化

$$a(i) = c1(i) \times DSL^2 + c2(i) \times DSL + c3(i) \quad (7)$$

其中, $a(i)$ 为波段 i 的定标系数, (day number since launch, DSL) 为自发射日起的日计数, $c1$, $c2$ 和 $c3$ 为拟合系数。图 6 给出了定标系数的时问变化(未包含存在增益跳变的波段 6 和 7, 下同), 图中, 虚线为拟合线。表 7 给出了定标系数时问变化趋势的拟合信息, 其中 $MARE = \text{Mean}(|a - a_{\text{est}}|/a_{\text{est}} \times 100)$ 。结果表明, 拟合分析的相关系数 R^2 均在 0.9 以上, 除了波段 2, 12, 13 和 14, R^2 超过 0.95。采用该拟合结果可以实现逐天的定标系数更新, 及时订正两次同步定标实验间的遥感器响应衰变。

以 2008 年第一次定标为基准, 定义归一化辐射响应 m

$$m(i, y) = a(i, 2008)/a(i, y) \quad (8)$$

其中, i 为波段, y 为年。辐射响应的年际衰变率可根据式(9)计算

$$\text{Rate}(i, y) = (m(i, y-1) - m(i, y))/(DSL(y) - DSL(y-1)) \times 365 \times 100 \quad (9)$$

其中, $DSL(y)$ 为第 y 年同步定标期间的平均日计数。表 8 列出了 2008 年 9 月~2009 年 8 月, 2009 年 8 月~2010 年 8 月和 2010 年 8 月~2011 年 8 月的辐射响应年际衰变率。可以看出, 波长 $< 0.6 \mu\text{m}$ 的波段衰变相对较大, 最短波长的波段 8 ($0.41 \mu\text{m}$) 在 2008 年 9 月~2009 年 8 月的衰变率约为 14%; 在轨初期(2008 年 9 月~2009 年 8 月)衰变最大, 在轨运行一年之后衰变速度趋缓, 在轨运行两年之后(2010 年 8

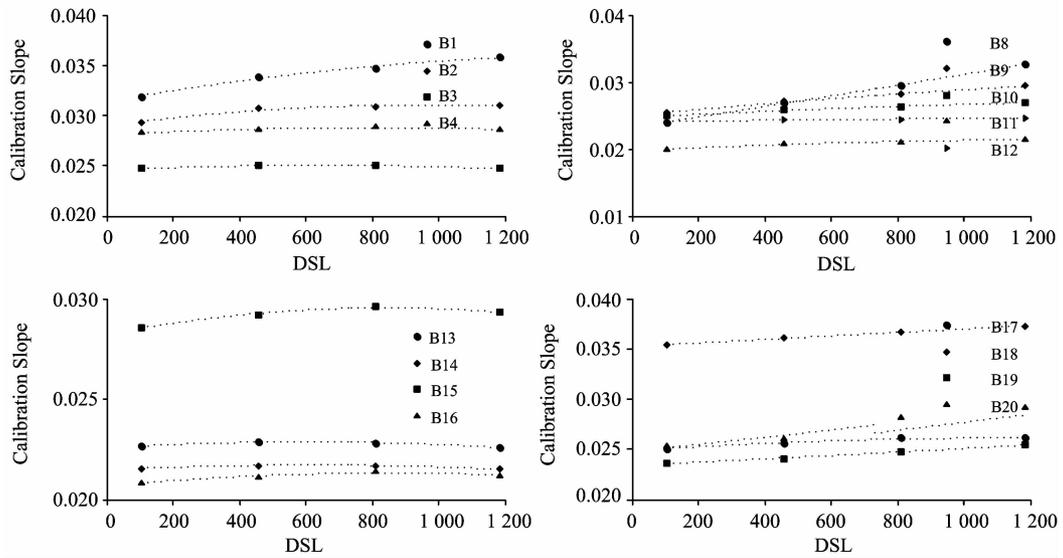


Fig. 6 Calibration coefficients variation trend of FY-3A MERSI RSBs (fitting line is denoted by dashed line)

月~2011年8月)部分波长 $>0.6\ \mu\text{m}$ 的波段出现响应增加现象。

Table 7 Calibration coefficients variation fitting parameters of FY-3A MERSI RSBs

波段	c1	c2	c2	R ²	MARE
1	-3.96e-009	9.49e-006	3.00e-002	0.976	0.763
2	-4.27e-009	7.77e-006	2.77e-002	0.939	0.801
3	-2.89e-009	4.47e-006	2.34e-002	0.954	0.380
4	-2.71e-009	4.55e-006	2.70e-002	0.984	0.222
8	-8.53e-010	9.52e-006	2.25e-002	0.996	0.701
9	-2.43e-009	7.41e-006	2.39e-002	0.987	0.645
10	-2.18e-009	5.28e-006	2.36e-002	0.981	0.500
11	-2.35e-009	4.91e-006	1.88e-002	0.954	0.776
12	-2.32e-009	4.16e-006	2.28e-002	0.924	0.586
13	-2.31e-009	3.53e-006	2.16e-002	0.912	0.455
14	-2.31e-009	3.65e-006	2.04e-002	0.949	0.386
15	-3.88e-009	6.61e-006	2.69e-002	0.992	0.222
16	-2.14e-009	3.67e-006	1.98e-002	1.000	0.059
17	-3.13e-009	5.92e-006	2.35e-002	0.993	0.244
18	-3.54e-009	7.78e-006	3.29e-002	0.969	0.611
19	-1.23e-009	3.86e-006	2.25e-002	0.998	0.156
20	-5.66e-010	4.90e-006	2.42e-002	0.981	0.766

4.2 发射前定标结果的可用性

表 9 为 FY-3 MERSI 发射后第一次场地同步定标结果与发射前定标的比较, 其中 $\text{PDif}\% = (a_{\text{Dunhuang-vc}} - a_{\text{pre-launch}}) / a_{\text{pre-launch}} \times 100$ 。对于 FY-3A, 不考虑存在增益跳变的波段 6 和 7, 与发射前定标系数相比, 波段 3, 11 和 20 的场地定标结果偏低; 除了波段 11, 14, 16, 17 和 20 之外, 场地定标结果与发射前有超过 5% 的差异, 特别是, 波段 1, 2, 4, 8, 9, 10, 12, 13, 15 和 18 有超过 10% 的差异。对于 FY-3B, 由于 MERSI 制冷抛罩失败, 无辐射制冷, 短波红外波段的替代定标系数明显高于发射前结果, 特别是波段 7。不考虑非正常

Table 8 Response annual variation of FY-3A MERSI RSBs

波段	2008-9~2009-8	2009-8~2010-8	2010-8~2011-8
1	9.43	2.16	2.67
2	8.06	0.31	0.58
3	4.95	0.00	-1.13
4	4.33	0.69	-0.65
8	13.75	7.29	7.86
9	9.51	3.33	3.79
10	6.79	1.83	2.00
11	7.93	0.91	1.67
12	5.49	0.00	0.38
13	4.50	-0.43	-0.83
14	4.75	0.00	-0.87
15	6.00	1.31	-0.93
16	4.40	1.38	-0.87
17	6.44	1.85	0.00
18	7.14	1.31	1.69
19	5.13	2.77	2.13
20	4.76	7.35	2.97

工作的波段 6 和 7, 与发射前定标系数相比, 波段 14, 15, 17 和 18 的场地定标结果偏低; 除了波段 15 和 17 之外, 场地定标结果与发射前有超过 5% 的差异, 特别是, 波段 1, 2, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 18 和 20 有超过 10% 的差异。可以认为: 在卫星入轨后, MERSI 发射前定标系数基本不可用, 特别是波长 $<0.6\ \mu\text{m}$ 的波段。

5 结论

提出了基于敦煌实测地表 BRDF 模型, 矢量辐射传输模型 6SV 并联合 MODTRAN 吸收透过率校正的反射太阳波段替代定标新方法, 针对 FY-3 MERSI 的同步定标实验结果表明, 除了水汽吸收中心波段 18 之外, 定标的不确定度小于 5%, 而除了波段 17~20 之外, 不确定度小于 3%。

Table 9 Comparison of pre-launch calibration coefficients and that of first Dunhuang VC for FY-3 MERSI

波段	FY-3A			FY-3B		
	发射前	2008-9	PDif%	发射前	2008-9	PDif%
1	0.026 6	0.030 8	15.833	0.025 9	0.030 4	17.375
2	0.025 2	0.028 3	12.480	0.025 6	0.029 6	15.53
3	0.025 4	0.023 8	-6.447	0.025 8	0.027 5	6.67
4	0.024 7	0.027 4	10.752	0.025 6	0.028 4	10.85
6	0.018 3	0.022 9	25.342	0.016 6	0.022 1	33.05
7	0.019 5	0.022 9	17.496	0.004 4	0.017 3	292.29
8	0.019 0	0.023 4	23.223	0.020 0	0.027 8	38.86
9	0.019 8	0.024 6	24.054	0.020 1	0.025 2	25.50
10	0.020 1	0.024 1	19.841	0.020 2	0.022 7	12.38
11	0.020 1	0.019 2	-4.620	0.020 1	0.022 4	11.72
12	0.020 4	0.023 1	13.514	0.020 2	0.022 3	10.67
13	0.019 8	0.021 9	10.886	0.020 3	0.021 6	6.40
14	0.020 6	0.020 7	0.437	0.020 2	10.019 1	-5.49
15	0.020 2	0.027 5	35.937	0.020 2	0.020 2	-0.20
16	0.019 4	0.020 2	4.070	0.020 4	0.021 9	7.25
17	0.023 9	0.024 0	0.503	0.022 8	0.022 6	-1.05
18	0.025 2	0.033 6	33.492	0.022 8	0.020 4	-10.41
19	0.021 3	0.022 9	7.512	0.022 4	0.023 6	5.17
20	0.025 4	0.024 8	-2.516	0.022 6	0.027 0	19.36

以 Aqua MODIS 为辐射基准, 采用相同计算方案的大气顶辐射计算分析表明, 对于波长 $<1 \mu\text{m}$ 的窗区波段大气顶辐射计算平均偏差小于 3%, 水汽吸收翼区的偏差小于 4%, 波长 $>1 \mu\text{m}$ 的小于 5%(除了 $2.1 \mu\text{m}$ 波段)。

针对 2008~2011 年的敦煌场地同步定标结果分析表明, 可采用二次多项式拟合定标系数(斜率)的时间变化, 拟合分析的相关系数 R^2 均在 0.9 以上, 除了波段 2, 12, 13 和 14, R^2 超过 0.95。采用该结果可以实现逐天的定标系数更新, 及时订正两次同步定标实验期间的遥感器响应衰变。当然, 通过分段线性拟合同样可以实现逐天的定标系数更新, 具体采用哪一种更新方案还需在进一步的定标应用效果评估后确

定。

遥感器各波段的定标系数反映了其辐射响应的变化。分析表明, 波长 $<0.6 \mu\text{m}$ 的波段衰变相对较大, 最短波长的波段 8($0.41 \mu\text{m}$) 在入轨第一年的衰变率约为 14%; 在轨初期的衰变最大, 在轨运行一年之后衰变速度趋缓, 在轨运行两年之后部分波长 $>0.6 \mu\text{m}$ 的波段出现响应增加现象。

不考虑辐射传输计算模型本身的精度, 基于场地同步测量的辐射定标方法受到现场仪器测量误差、星地空间尺度效应等影响, 定标精度难以更进一步提高, 因此, 发展可靠的星上绝对定标技术才是从根本上提高我国卫星数据质量的关键。

References

- [1] Dong Chaohua, Yang Jun, Zhang Wenjian, et al. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(10): 1531.
- [2] Xiong X, Sun J, Xie X, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 535.
- [3] Zhang Yuxiang, Qiu Kangmu, Hu Xiuqing. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 18(4): 505.
- [4] Govaerts Y M, Clerici M, Clerbaux N. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9): 1900.
- [5] Wu X, Sullivan J T, Heidinger A K. Can. J. Remote Sensing, 2010, 36(5): 602.
- [6] Tahnk W R, Coakley J A. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(15): 3053.
- [7] Doelling D R, Hong G, Morstad D, et al. SPIE, 2010, 7862: 78620I.
- [8] Cao C, Vermote E, Xiong X. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: D20105.
- [9] Liu J, Li Z, Qiao Y L, et al. Int. J. Remote Sensing, 2004, 25(23): 5267.
- [10] Hu Xiuqing, Liu Jingjing, Sun Ling, et al. Can. J. Remote Sensing, 2010, 36(5): 566.
- [11] LI Yuan, RONG Zhi-guo, ZHENG Zhao-jun, et al(李元, 戎志国, 郑照军, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程). 2009, 17(2): 2966.

On-Orbit Response Variation Analysis of FY-3 MERSI Reflective Solar Bands Based on Dunhuang Site Calibration

SUN Ling^{1, 2}, GUO Mao-hua³, XU Na^{1, 2}, ZHANG Li-jun^{1, 2}, LIU Jing-jing^{1, 2}, HU Xiu-qing^{1, 2}, LI Yuan^{1, 2}, RONG Zhi-guo^{1, 2}, ZHAO Ze-hui⁴

1. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3. National Satellite Ocean Application Service, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China

4. Jilin Civil Airports Group Company Air Traffic Management Department, Changchun 130039, China

Abstract MERSI is the keystone payload of FengYun-3 and there have been two sensors operating on-orbit since 2008. The on-orbit response changes obviously at reflective solar bands (RSBs) and must be effectively monitored and corrected. However MERSI can not realize the RSBs onboard absolute radiometric calibration. This paper presents a new vicarious calibration (VC) method for RSBs based on in-situ BRDF model, and vector radiometric transfer model 6SV with gaseous absorption correction using MOTRAN. The results of synchronous VC experiments in 4 years show that the calibration uncertainties are within 5% except for band at the center of water vapor absorption, and 3% for most bands. Aqua MODIS was taken as the radiometric reference to evaluate the accuracy of this VC method. By comparison of the simulated radiation at top of atmosphere (TOA) with MODIS measurement, it was revealed that the average relative differences are within 3% for window bands with wavelengths less than 1 μm , and 5% for bands with wavelengths larger than 1 μm (except for band 7 at 2.1 μm). Besides, the synchronous nadir observation cross analysis shows the excellent agreement between re-calibrated MERSI TOA apparent reflectance and MODIS measurements. Based on the multi-year site calibration results, it was found that the calibration coefficients could be fitted with two-order polynomials, thus the daily calibration updates could be realized and the response variation between two calibration experiments could be corrected timely; there are large response changes at bands with wavelengths less than 0.6 μm , the degradation rate of the first year at band 8 (0.41 μm) is about 14%; the on-orbit response degradation is maximum at the beginning, the degradation rates slow down after one year in operation, and after two years the responses even increase at some band with wavelengths larger than 0.6 μm .

Keywords FengYun-3(FY-3); Medium resolution spectral imager(MERSI); Reflective solar band(RSB); On-orbit response variation; Site vicarious calibration(VC)

(Received Jan. 30, 2012; accepted Apr. 17, 2012)