

文章编号 1004-924X(2015)07-1911-10

基于多种亮度稳定目标的 FY-3C/中分辨率光谱 成像仪的反射太阳波段辐射定标

王 玲^{1,2}, 胡秀清^{1,2*}, 陈 林^{1,2}

(1. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 中国气象局, 北京 100081)

摘要:分析研究了风云-3C 中分辨率光谱成像仪(FY-3C/MERSI)发射一年以来反射太阳波段的辐射定标精度,利用位于全球范围内的沙漠、盐湖等 12 种亮度稳定目标,结合中分辨率成像光谱仪(MODIS)的地表和大气参数产品和大气辐射传输模型,计算出了卫星过境时刻入瞳处的波段反射率,并将其作为在轨绝对辐射定标精度检验的参考真值,对 2014 年 1 月~10 月期间,FY-3C/MERSI 反射太阳波段的辐射定标精度进行了验证分析。结果表明,FY-3C/MERSI 大部分波段在高低端的定标精度大小不一致。有些波段明显呈现高端定标偏差大,低端定标偏差小的特点;有些波段呈现高、低端定标偏差大,中间低的特点。在仪器发射一年以来,波段 1~4, 9~11, 15~16 和波段 19 仍能保持 5%的定标精度。各波段定标精度的时间变化表明:在整个研究时期内,除蓝光波段和水汽吸收波段,其他波段的定标精度变化幅度基本在 5%以内。实验结果显示:使用沙漠及盐湖等多种亮度稳定目标,有效地掌握了更宽动态范围内 FY-3C/MERSI 的辐射定标精度情况。

关键词:辐射定标;风云 3C/中分辨率光谱成像仪;稳定目标;太阳波段

中图分类号:TP732; P414.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1911

FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets

WANG Ling^{1,2}, HU Xiu-qing^{1,2*}, CHEN Lin^{1,2}

(1. *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081;*

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

** Corresponding author, E-mail: huxq@cma.gov.cn*

Abstract: The calibration accuracy of solar bands for Fengyun-3C/Moderate Resolution spectral Imager(FY-3C/ MERSI) from January 2014 to October 2014 is assessed based on multi-reflectance stable targets, such as deserts and salt lakes with different reflectances in a globe. In combination of ground surface and atmospheric parameters of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products and the atmospheric radiation transfer model, the band reflectances of the satellite when it transits into the pupil are calculated and then they are taken as the reference true values for validation

收稿日期:2015-02-20;修订日期:2015-04-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41401417)

of the absolute radiation calibration accuracy. The validation experiments on radiation calibration accuracy of the FY-3C/MERSI for reflective solar bands are performed for the dates mentioned above. The results show that the calibration accuracy of most solar bands of FY-3C/MERSI is different for the targets with different reflectances. For some bands, the calibration accuracy is lower for larger reflectance targets, and higher for lower reflectance targets. For other bands, the calibration accuracy is lower for larger and lower reflectance targets, and higher for targets with moderate reflectances. Bands 1~4, 9~11, 15~16 and band 19 of FY-3C/MERSI can maintain a calibration accuracy of 5% during one year after its launching. The time series of the calibration accuracy of each band show that the variation of the calibration accuracy for the whole study period is within 5% except for the blue band and the water vapor absorption bands. It concludes that it is effectively to acquire a good knowledge of the radiometric calibration accuracy over a wider dynamic range for FY-3C/MERSI by using the deserts and salt Lakes simultaneously.

Key words: radiometric calibration; FY-3C/Moderate Resolution Spectral Imager (MERSI); stable target; solar band

1 序 言

卫星遥感以其快速、大面积、长期重复观测等独特优势,成为研究全球资源、环境和气候变化的重要手段。在这些领域中,人们更关注卫星观测资料所反映的地-气系统反射和辐射的绝对物理量,这对遥感信息由定性走向定量提出了迫切需求。实现遥感信息量化的基本前提是辐射定标^[1-2],其精度直接影响后续的定量化应用效果。

目前,传感器辐射定标精度检验主要有基于参考卫星的验证方法和基于均匀稳定场地的验证方法。基于参考卫星的验证方法对参考传感器和待目标传感器之间的通道设置、通道光谱响应函数、过境时间、几何配准精度等有严格要求。如果不能修正两个传感器之间观测空间、时间、角度和光谱上的差异,将会给定标验证结果带来极大的不确定性^[3-5]。基于均匀稳定场地的验证方法主要通过传感器在场地上空的长期辐射观测进行跟踪监测,获得传感器辐射定标稳定性指标^[6-8],或根据场地在卫星过境时刻的地表和大气参数,经过辐射传输,计算出传感器各通道的表观辐亮度或反射率,将其作为参考真值,对辐亮度或反射率进行检验和验证^[9-10]。但目前的研究基本只选取了一个稳定场地,难以准确地表征仪器整个动态范围的定标精度。最近,孙凌等人^[11]提出了使用多个稳定场地对 FY-3A/中分辨率光谱成像仪

(MERSI)反射太阳波段进行定标跟踪的方法,该方法主要基于沙漠目标和海洋目标,其中海洋目标在整个反射太阳波段属于暗目标,沙漠目标在较长波段处(>600 nm)属于中高亮度目标,但在较短波段处(<600 nm)却是暗目标。因此,对于波长 <600 nm的波段,表观反射率的最大值只能达到 $0.2\sim 0.25$ 。由此可见,只选取以上两类目标对于较短的光谱波段仍然不能实现宽动态范围的定标精度评价。为此,本文除了沙漠目标,还选取了在较短波段处具有较高反射率($>30\%$)的白沙(White Sands; 32.92°N , 106.35°W)和玻利维亚盐湖(Uyuni salt Flats; 20.22°S , 67.45°W)为目标,用于弥补波长小于 600 nm的光谱波段缺少高端响应目标的不足。这两个目标同属于地球观测卫星委员会(CEOS)的定标与真实性检验工作组(WGCV)选定的卫星传感器替代定标/定标检验参考站点,也被一些研究用于仪器辐射定标性能的评价工作中^[12]。

2 仪器介绍

FY-3C是我国继FY-3A和FY-3B两个试验卫星之后的第三颗极轨气象卫星,于2013年9月23日在太原卫星发射中心发射。MERSI是FY-3C搭载的一个关键光学成像仪器,它应用了 45° 扫描镜和消旋K镜的跨轨多探元并扫式辐射计,扫描周期为 1.5 s,可对星下点 $\pm 55^{\circ}$ 的视场进行对地观测,提供一个 2900 km(跨轨) $\times 10$ km(沿

轨,星下点)的扫描带。该传感器具有 20 个通道,可覆盖的波段从可见到红外^[13,14]。其中,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 μm),其星下点空间分辨率为 250 m 和 1 000 m,具体指标如表 1 所示。

表 1 FY-3C/MERSI 光谱波段指标

Tab.1 FY-3C/MERSI spectral band specifications

波段	中心波长 /μm	波段宽度 /μm	空间分辨率 /m	噪声	动态范围	波段	中心波长 /μm	波段宽度 /μm	空间分辨率 /m	噪声	动态范围/(%)
1	0.470	0.05	250	0.43	100%	11	0.520	0.02	1 000	0.05	80
2	0.550	0.05	250	0.43	100%	12	0.565	0.02	1 000	0.05	80
3	0.650	0.05	250	0.43	100%	13	0.650	0.02	1 000	0.05	80
4	0.865	0.05	250	0.43	100%	14	0.685	0.02	1 000	0.05	80
5	11.25	2.5	250	0.4	330K	15	0.765	0.02	1 000	0.05	80
6	1.640	0.05	1000	0.08	90%	16	0.865	0.02	1 000	0.05	80
7	2.130	0.05	1000	0.07	90%	17	0.905	0.02	1 000	0.1	90
8	0.412	0.02	1000	0.1	80%	18	0.940	0.02	1 000	0.1	90
9	0.443	0.02	1000	0.1	80%	19	0.980	0.02	1 000	0.1	90
10	0.490	0.02	1000	0.05	80%	20	1.030	0.02	1 000	0.1	90

3 方 法

3.1 稳定目标地表与大气参数获取

为了开展 FY-3C/MERSI 的太阳反射波段宽动态范围的定标检验,充分利用 MERSI 全球观测的数据优势,选用 CEOS 推荐的具有不同反射

率的 11 个沙漠稳定目标和一个盐湖稳定目标,包括位于非洲的 Algeria5、Arabia2、Libya1、Libya4、Mali、Mauritania2、Niger2、Sudan1,北美洲的 Sonora、White Sands,南美洲的 Uyuni salt Flats(以下简称 Uyuni Salt),以及我国境内的敦煌戈壁(Dunhuang),具体经纬度如表 2 所示。

表 2 文章使用的地球稳定目标及其位置分布

Tab.2 Selected earth stable targets and their locations

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
站名	Algeria5	Arabia2	Dunhuang	Libya1	Libya4	Mali	Mauritania2	Niger2	Sudan1	Sonora	UyuniSalt	White Sands
经度	2.23	50.96	94.27	13.35	23.39	-4.85	-8.78	10.59	28.22	-114.1	-67.45	-106.35
纬度	31.02	20.13	40.18	24.42	28.55	19.12	20.85	21.37	21.74	31.95	-20.22	32.92

目标的地表反射率是大气辐射传输模式最为重要的输入参数,是决定卫星入瞳表观反射率计算精确的关键参量。以上稳定目标的地表双向反射率采用国际公认的具有较高精度的 MODIS 的 BRDF 产品(MCD43C1)计算获得。MCD43C1 提供 MODIS 前 7 个波段(460, 555, 659, 865, 1 240, 1 640, 2 130 nm)处,全球 0.05°×0.05°空间分辨率的双向反射分布函数(BRDF)核驱动模

型参数,包括表示各向同性散射的系数 f_{iso} ,表示几何光学分量的系数 f_{geo} 和表示体散射分量的系数 f_{vol} 。根据以上 3 个参数可以计算任意观测角度($\theta, \vartheta, \varphi$)上的光谱反射率:

$$R(\theta, \vartheta, \varphi, \lambda) = f_{iso}(\lambda) + f_{vol}(\lambda) K_{vol}(\theta, \vartheta, \varphi) + f_{geo}(\lambda) K_{geo}(\theta, \vartheta, \varphi), \quad (1)$$

式中: θ, ϑ 和 φ 分别是太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角;Kgeo 和 Kvol 分别为几何光学和体

散射分量,这两个参数只与观测角度(θ , ϑ , φ)有关,具体计算分别参见 Waner 等人^[15]和 Roujean 等人^[16]的文献。图 1 所示为基于 2013 年的 MCD43C1 产品统计的目标(白空)反照率均值(假设没有漫反射光比例的前提下,可以用白空反照率近似代表反照率^[17])。可以看出,波长在 600 nm 以下时,白沙与玻利维亚盐湖的反射率明显高于其他沙漠目标;在 870 nm 以后,白沙与玻利维亚盐湖的反射率呈下降趋势,而其他沙漠目标的反射率呈上升趋势,在近红外波段以后,玻利维亚盐湖的反射率明显低于其他目标。

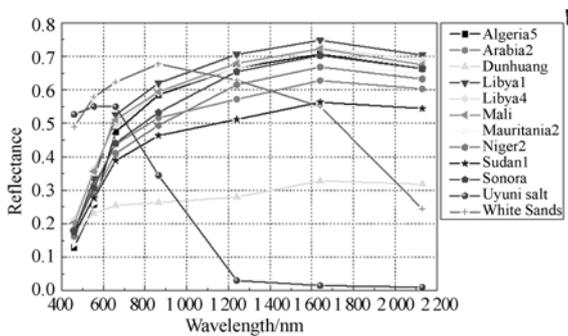


图 1 基于 MODIS BRDF 产品获取的各个稳定目标的反射率光谱曲线

Fig. 1 Spectral reflectance curves of stable targets acquired from MODIS BRDF products

由于 MODIS 的 BRDF 产品只能计算得到 MODIS 前 7 个波段处的地表双向反射率,为了获取 FY-3C/MERSI 波段处的值,还需将由式(1)获得的 7 个 MODIS 离散波段处的地表反射率插值成 MERSI 波段内连续反射率光谱,结合 MERSI 的光谱响应函数,计算 MERSI 不同波段处的地表反射率。

大气辐射传输模式所需的大气参数如 550 nm 气溶胶光学厚度、臭氧总量和水汽总量等,根据 MODIS 大气日产品 MYD08 获得。MYD08 为全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点产品^[18],使用时根据目标经纬度,统计离稳定目标最近像元的气溶胶光学厚度、臭氧总量和水汽总量值,其中气溶胶光学厚度采用深蓝算法的结果。

3.2 FY-3C/MERSI 反射太阳波段参考表观反射率计算

选取稳定目标中心 3×3 窗口像元区域为研

究区,统计出观测时刻的太阳和卫星角度,结合 MERSI 光谱响应函数和对应的地表反射率和大 气特性参数,使用 6 s 大气辐射传输模型计算晴空目标区的大气顶反射率(即表观反射率)。晴空目标区的判断标准采用空间均一性准则,即目标区的 DN 方差系数 > 0.1 认为被云污染^[12],再结合 MERSI 观测大气顶反射率与辐射传输模拟值之间的相对偏差是否高于 30%,以进一步剔除残留的云污染^[11]。

3.3 FY-3C/MERSI 反射太阳波段辐射定标精度评价

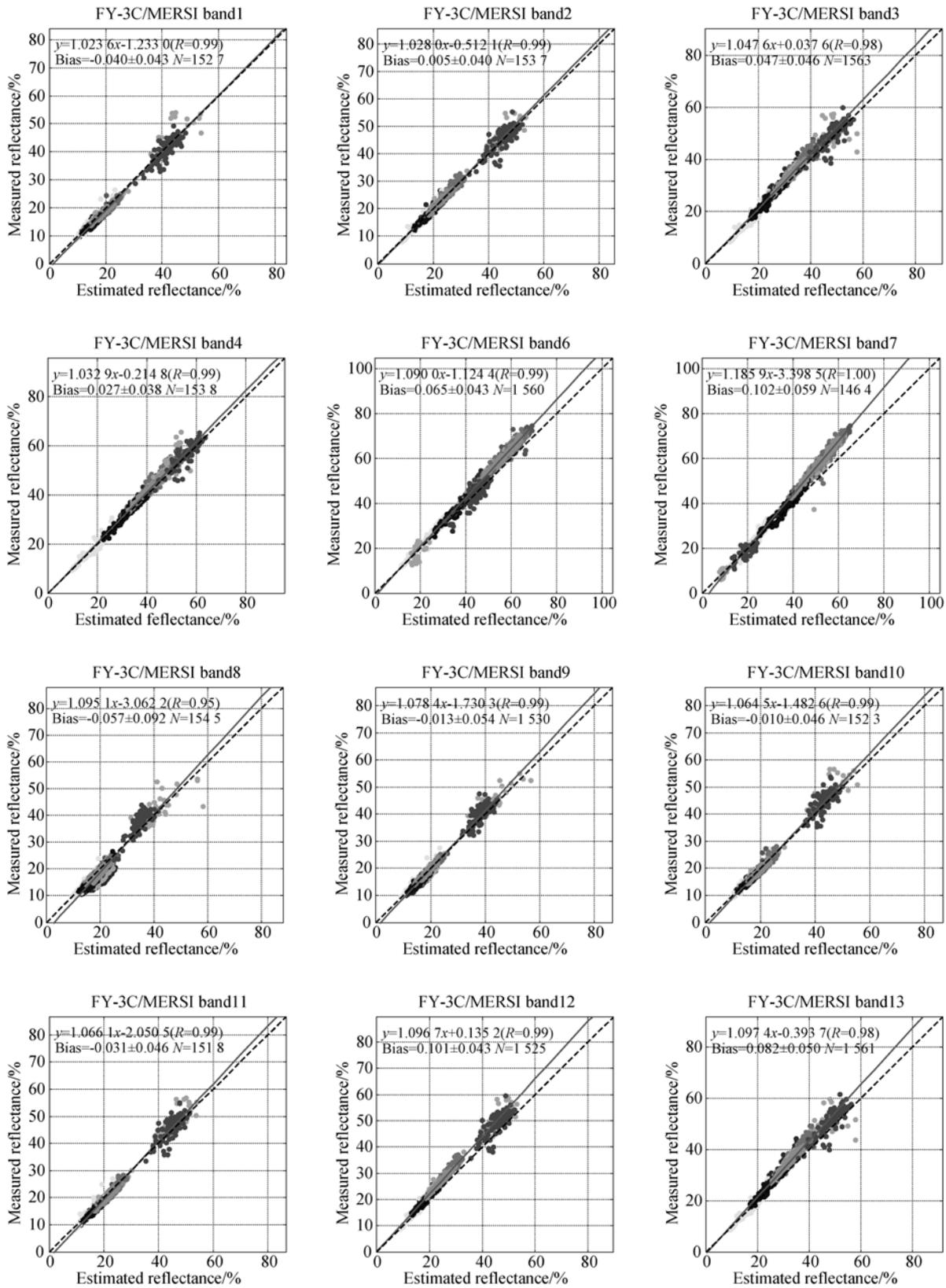
以辐射传输模拟计算的大气顶表观反射率为参考值,对辐射定标后的 MERSI 数据质量进行验证。定标精度采用 MERSI 观测值和辐射模拟值之间的相对偏差(Bias)表示:

$$\text{Bias} = (\text{Ref}^{\text{mea}} - \text{Ref}^{\text{est}}) / \text{Ref}^{\text{est}}, \quad (2)$$

其中: Ref^{mea} 为 MERSI 观测的表观反射率, Ref^{est} 为辐射传输模拟的表观反射率。

4 结 果

图 2 所示为 2014 年 1 月至 2014 年 10 月期间稳定目标上空 MERSI 观测的大气顶表观反射率与模拟值之间的散点图。模拟值与观测值之间具有较好的相关性,所有波段的相关系数 R 都超过了 0.95,且绝大多数可达到 0.99。所有波段反射率的取值范围跨度也较大,最小值基本在 0.05~0.1 之间,最大值不同波段略有差异,波长小于 600 nm 的蓝(band1, band8, band9 和 band10)、绿(band2, band11 和 band12)波段的最大值可达 0.6 左右,波长大于 600 nm 的红、近红外和短波红外波段的最大值分别在 0.6、0.7 和 0.8 左右。孙凌等人^[11]的研究中,蓝、绿波段的最大值只有 0.2 左右,红-波段红外波段的最大值约为 0.4~0.5。本文的高端(即高反射率)目标样本点明显增多,尤其是波长小于 600 nm 的光谱波段,表观反射率的最大值提高了 2 倍,这与除了沙漠目标,还增加了白沙和盐湖目标有关。因为白沙和盐湖在波长小于 600 nm 的光谱波段处属于亮目标,弥补了只使用沙漠目标时缺少高端目标数据的不足。



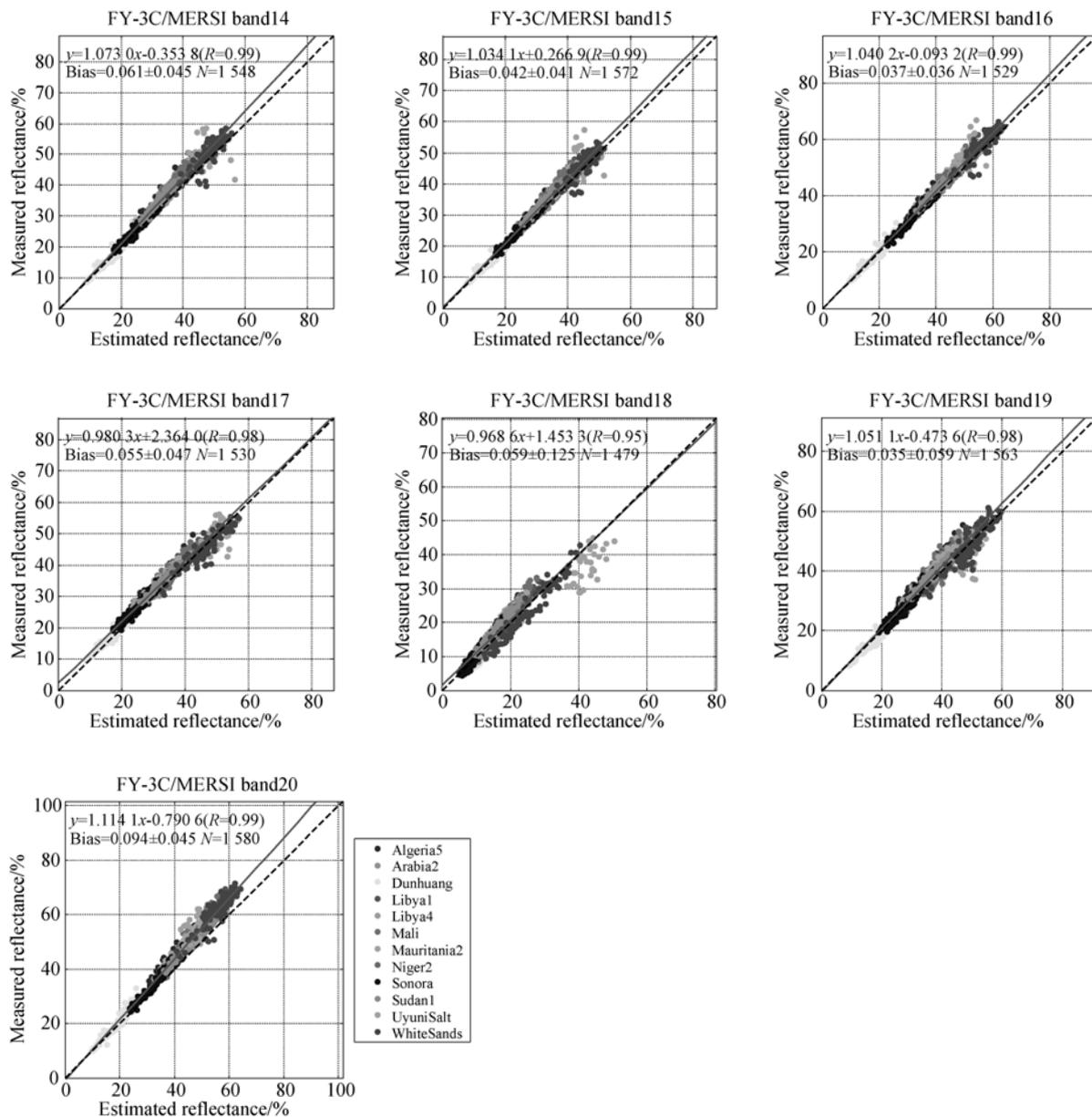


图 2 2014 年 1 月~10 月期间 FY-3C/MERSI 观测的大气顶表观反射率与辐射模拟值的散点图。图中不同颜色点代表不同目标的数据,黑色虚线为 1:1 的线,红色实线为观测值和模拟值之间的线性拟合线

Fig. 2 Scatter plots between the observed TOA apparent reflectance by FY-3C/MERSI and that calculated from the atmospheric radiative transfer model. Different color points denote different targets. Black dotted line is 1:1 line and red solid line is a linear fit line between observations and simulated values.

图 2 中表观反射率观测值与模拟值的散点分布和拟合线的斜率(表 3)显示,大多数波段的高低端定标精度不一致,如 Band6、Band7、band12、Band13 和 Band20 拟合线斜率超过了 1.09,对于低端目标,辐射定标结果与模拟值间的相对偏差较低,随着目标反射率的增大,辐射定标结果的偏

差增大。此外,一些波段如 Band8-11 的辐射定标结果与模拟值间的相对偏差呈现高端和低端大,中间小的特点,且相对偏差的正负情况也不同,低端目标的辐射定标结果小于模拟结果,偏差为负值。与此相反,高端目标的定标结果大于模拟结果,偏差为正值。这种高低端信号偏差不一致的

情况表明 FY-3C/MERSI 太阳反射波段具有比较明显的非线性特点,而且非线性系数是从发射前定标得来,可能存在系统性偏差^[14]。

表 3 基于多级亮度稳定目标获得的 FY-3C/MERSI 反射太阳波段辐射定标精度结果

Tab. 3 Calibration accuracy results of FY-3C/MERSI solar bands acquired by using multi-reflectance stable targets with different reflectance

波段	斜率 ⁽¹⁾	偏差均值/%	偏差标准差/%	波段	斜率*	偏差均值/%	偏差标准差/%
1	1.02	-3.95	4.31	12	1.10	10.08	4.33
2	1.03	0.52	3.95	13	1.10	8.22	5.01
3	1.05	4.68	4.55	14	1.07	6.05	4.46
4	1.03	2.66	3.77	15	1.03	4.19	4.06
6	1.09	6.50	4.25	16	1.04	3.73	3.61
7	1.19	0.22	5.86	17	0.98	5.53	4.72
8	1.10	-5.75	9.17	18	0.97	5.90	12.52
9	1.08	-1.31	5.43	19	1.05	3.48	5.90
10	1.06	-0.98	4.59	20	1.11	9.42	4.53
11	1.07	-3.10	4.55				

斜率是 FY-3C/MERSI 在多个稳定目标上空观测的大气顶表观反射率与辐射模拟值之间线性拟合线的斜率

2014 年 1 月~2014 年 10 月, FY-3C/MERSI 反射太阳波段的辐射定标结果与模拟结果的相对偏差均值和标准差如图 3 所示, 具体数值见表 3。可以看出,除了波段 6~8, 12~14, 17~18 和波段 20 这 9 个波段的定标精度略低外(相对偏差约 5%~10%),其他波段的定标精度仍能保持在 5%以内。

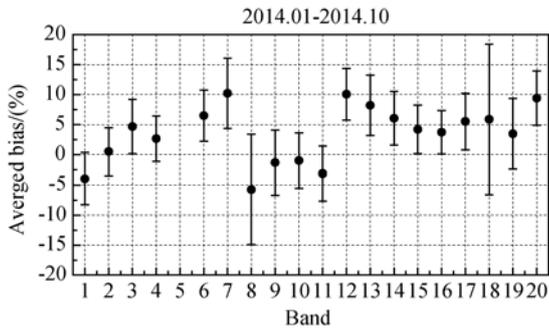


图 3 2014 年 1 月~10 月期间 FY-3C/MERSI 观测的大气顶表观反射率与辐射模拟值间的相对偏差均值。图中误差线表示相对偏差的标准差

Fig. 3 Averaged relative deviations between the observed TOA reflectance from FY-3C/MERSI and the simulations from Jan. 2014 to Oct. 2014. Error bars represent the standard deviation of the relative deviation

图 4(a)~(f) 分别给出了蓝、绿、红、近红外、中红外波段以及水汽吸收波段表观反射率观测值与模拟值的月均相对偏差随时间的变化。可以看出,蓝波段(图 4(a))和水汽吸收波段(图 4(f))的月均值变化幅度较大,变化幅度超过了 5%,其他波段的月均值变化幅度在 5%以内。其中,导致蓝波段定标结果偏差变化幅度大的原因可能与仪器在该波段衰减较快有关。以往针对 FY-3A/MERSI 的研究^[19]表明,仪器在小于 600 nm 的较短波段处衰减率较大,尤其低于 500 nm 的波段,在发射后的 4 年间,总衰减率超过了 10%;对于大于 600 nm 的较长波段,仪器的辐射响应比较稳定,总衰减率在 5%以内。图 4(a)也显示 FY-3C/MERSI 蓝波段的辐射定标结果与模拟值间的负偏差随时间逐步增大,说明这些波段观测的 DN 值在逐步减小,即仪器的辐射响应在逐步降低。导致水汽吸收波段定标结果偏差变化幅度大的原因可能与水汽的季节性变化有关。图 4(f)也显示出水汽吸收波段的辐射定标结果与模拟值间的相对偏差呈现 1~5 月高,6~9 月底,10 月又开始增大的季节性变化特点。

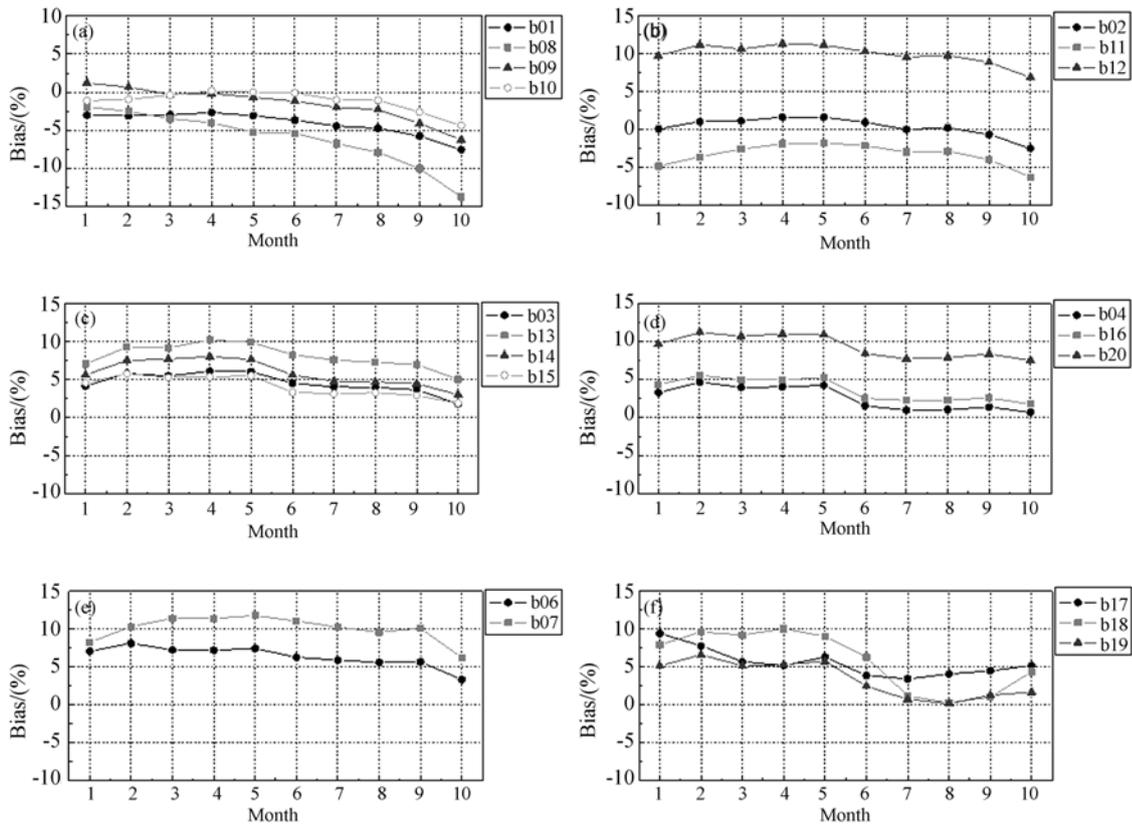


图 4 FY-3C/MERSI 蓝光波段(a)、绿光波段(b)、红光波段(c)、近红外波段(d)、短波红外波段(e)以及水汽吸收波段(f)表现反射率观测值与模拟值的月均相对偏差随时间的变化(2014年1月~10月)

Fig. 4 Monthly averaged bias between the observed TOA reflectance from FY-3C/MERSI and the simulated ones for blue bands (a), green bands (b), red bands (c), near infrared bands (d), shortwave infrared bands (e), and water vapor absorption bands (f) (Jan. 2014–Oct. 2014)

5 结 论

本文利用位于全球范围内的沙漠、盐湖等 12 个多种亮度稳定目标,结合 MODIS 的地表、大气参数产品和大气辐射传输模型的模拟计算,对 FY-3C/MERSI 在发射一年内的反射太阳波段业务辐射定标精度进行了分析研究。得到以下结论:

(1)通过使用沙漠及盐湖等多种亮度稳定目标可以有效掌握更宽动态范围内传感器的辐射定标精度情况。这些目标具有良好的高低信号的代表性,对 FY-3C/MERSI,波长小于 600 nm 光谱波段的表观反射率约为 0.05~0.6,波长大于 600 nm 光谱波段约为 0.05~0.8。

(2)大部分波段在高低端的定标精度存在大小不一致问题,这证明了 FY-3C/MERSI 太阳发射波段响应的非线性特征,也给兼顾高低端定标精度带来一定困难。

(3)各个波段定标精度的时间变化表明,除了蓝光波段和水汽吸收波段,其他波段在 2014 年 1 月~2014 年 10 月期间,定标精度的变化幅度较小,基本在 5% 以内。蓝光波段的辐射定标精度随时间的推移呈减小趋势。

FY-3C/MERSI 大多数波段的高低端定标精度不一致,但是对于文中选用的目标,在大气顶反射率小于 0.1 的低端目标数据点相对比较少,因此在以后的研究中可以加入海洋瑞利散射区或月球等暗目标,以增加大气顶反射率小于 0.1 的低端目标数据样本。

参考文献:

- [1] 田庆久,郑兰芬,童庆禧. SPOT 地面场定标与星上定标结的比较分析[J]. 遥感学报,1998,2(1): 13-18.
TIAN Q J, ZHENG L F, TONG Q X. Comparison and Analysis for In-Flight Calibration of SPOT Based on Methods of Test Site and On Boarding Calibration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(1): 13-18.
- [2] SMITH D L, MUTLOW C T, RAOR CN. Calibration monitoring of the visible and near-infrared channels of the Along-Track Scanning Radiometer-2 by use of stable terrestrial sites[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(3):515-523.
- [3] TEILLET P M, FEDOSEJEVS G, THOME K J, et al.. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110: 393-409.
- [4] 吴荣华. 光谱响应差异在高精度交叉定标中的影响分析——以 FY-3A/MERSI 与 EOS/MODIS 为研究实例[M]. 北京:中国气象科学研究院,2010.
WU R H. *Impacts of Spectral Response Differences on SNO Calibration-study Examples of FY-3A/MERSI and EOS/MODIS* [M]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2010.
- [5] 高彩霞,姜小光,马灵玲,等. 传感器交叉辐射定标综述[J]. 干旱区地理,2013, 36(1):139-146.
GAO C X, JIANG X G, MA L L, et al.. Review of Radiometric Cross-calibration [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(1): 139-146.
- [6] XIONG X, SUN J, BARNES W, et al.. Multi-year on-orbit calibration and performance of Terra MODIS reflective solar bands[C]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(4): 879-889.
- [7] CHANDER G, XIONG X, CHOI T, et al.. Monitoring on-orbit calibration stability of the Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114:925-939.
- [8] CAO C, XIONG J, BLONSKI S, et al.. Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, 118:11664-11678.
- [9] 巩慧,田国良,余涛,等. CBERS02B 卫星 CCD 相机在轨辐射定标与真实性检验[J]. 遥感学报,2010,14(1): 1-12.
GONG H, TIAN G L, YU T, et al.. Vicarious Radiometric Calibration and Validation of CBERS02B CCD data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(1): 1-12.
- [10] 高海亮,顾行发,余涛,等. 基于内蒙试验场地的定标系数真实性检验方法与不确定性分析[J]. 中国科学:地球科学,2013, 43(2): 287-294.
GAO H L, GU X F, YU T, et al.. Method study and uncertainty analysis of calibration coefficients validation based on the Inner Mongolia test site [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(2): 287-294.
- [11] SUN L, HU X, GUO M, et al.. Multi-site calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2012, 50(12):4929-4942.
- [12] KIM W, CAO C Y, LIANG S L. Assessment of Radiometric Degradation of FY-3A MERSI Reflective Solar Bands using TOA Reflectance of Pseudo-Invariant Calibration Sites [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(4): 793-797.
- [13] HU X, XU N, WU R, et al.. Early on-Orbit Performance Assessment of FY-3C/MERSI [C]. *SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Beijing, China*, 2014, 9264-35.
- [14] WANNER W, LI X, STRAHLER A H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 21077-21090.
- [15] ROUJEAN J L, LEROY M, DESCHAMPS P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97:20455-20468.
- [16] STRAHLER A H, LUCHT W, SCHAFF C, et al.. *MODIS BRDF/Albedo Product: Algorithm Theoretical Basis Document Version 5.0* [D]. 1999.
- [17] SUN L, HU X, CHEN L. Long-term calibration monitoring of medium resolution spectral imager (MERSI) onboard FY-3 [C]. *Proc. SPIE 8528, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II, November 9, 2012, Japan*, doi: 10.1117/12.978220.

作者简介:



王 玲(1986—),女,江苏泰州人,助理研究员,2004 年于中国石油大学(华东)获得学士学位,2013 年于南京大学获得博士学位,主要从事卫星传感器可见-近红外波段辐射定标研究,Email: lingw@cma.gov.cn



胡秀清(1974—),男,湖北人,正研级高工,1996 年于南京大学获得学士学位,2004 年于北京师范大学获得硕士学位,2012 年于中国科学院遥感应用研究所(现为中国科学院遥感与数字地球研究所)获得博士学位,主要从事卫星光学遥感器的辐射定标,气溶胶、沙尘暴和大气可降水等大气参数的卫星反演算法研究,研发中分辨率光谱成像仪 L1 辐射定标业务算法。Email: huxq@cma.gov.cn



陈 林(1981—),男,江苏南京人,副研究员,2003 于南京气象学院获得学士学位,2006 年于南京信息工程大学获得硕士学位,2009 年于中国科学院大气物理研究所获得博士学位,主要从事辐射定标的研究,特别是辐射定标新方法,定标误差评估,长时间序列定标方法的探索性研究。Email: chenlin@cma.gov.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)