

FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法

徐 娜^{1,2} 吴荣华^{1,2} 胡秀清^{1,2*} 陈 林^{1,2} 王 玲^{1,2} 孙 凌^{1,2}

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

摘要 为解决 FY-3C/MERSI 反射波段非线性响应导致传统两点定标不适用问题, 提出了在轨宽动态综合辐射定标方法。融合多种不依赖于地面同步测量的替代方案, 利用各方案定标样本的多等级反射率特性, 实现遥感器宽动态范围的辐射定标。每种方案的定标样本采用分段平均方法进行等权重融合, 最终定标系数基于融合后样本通过加权拟合回归获得。非线性特征采用发射前室外定标实验分析的二次项系数进行修正, 在轨计算定标斜率和截距。分析和验证结果表明: 各替代方案样本分布具有很好一致性, 融合样本相关性可达 0.99; 综合定标结果在反射率大于 10% 的中高端目标回归残差小于 1%, 高端定标结果与基于深对流云目标的交叉定标(DCC)检验样本的相对差异小于 1.5%, 敦煌同步观测实验检验结果表明中端精度优于 3%; 由于 MERSI 对低亮度辐射响应能力显著降低, 发射前室外定标实验获得的非线性系数不能适用, 定标结果在低目标反射率出现高估现象。该成果可应用于所有 FY-3C/MERSI 反射通道, 明显降低两点法定标的不确定性以及非线性的影响。

关键词 遥感; 辐射定标; 综合替代定标; 反射波段; 非线性

中图分类号 TP722.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1228001

Integrated Method for On-Orbit Wide Dynamic Vicarious Calibration of FY-3C MERSI Reflective Solar Bands

Xu Na^{1,2} Wu Ronghua^{1,2} Hu Xiuqing^{1,2} Chen Lin^{1,2} Wang Ling^{1,2} Sun Ling^{1,2}

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

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

Abstract Because of the nonlinear response of FY-3C MERSI reflective bands, traditional calibration based on two-points is inapplicable. An integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration is developed to resolve this problem. By combining various vicarious calibration methods which are independent on the ground synchronous measurement, and using the multi-scale reflectance characteristics of every program's calibration sample, the integrated method can achieve wide dynamic radiometric calibration. Calibration samples from each program are integrated equally and weighted by subsection-average method, and calibration coefficients are calculated based on integrated samples using weighted fitting regression. The prelaunch quadratic term of calibration experiment analysis is used to perform nonlinear correction, calibration slope and intercept are evaluated on-orbit. Analysis and verification results show that sample distribution of each vicarious program shows well consistency and the correlation of integrated samples can reach 0.99. Regression residual of comprehensive calibration results is less than 1% for the medium to high dynamic with reflectance greater than 10%. The relative difference between the high-end calibration results with cross calibration based on deep convective clouds (DCC) test sample is less than 1.5% and Dunhuang simultaneous observation test results show that the medium accuracy is better than 3%.

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(41471304、41475031)

作者简介: 徐 娜(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事星载光学遥感器辐射定标及定量遥感方面的研究。

E-mail: xuna@cma.gov.cn

*通信联系人。E-mail: huxq@cma.gov.cn

Because of the responsiveness to low-light radiance of MERSI shows large degradation, nonlinear coefficients acquired from prelaunch outside calibration experiment are inapplicable, and calibration results show over estimated at the low target reflectance. The results can be applied to all reflection channels of FY-3C MERSI, which can reduce the uncertainty of the two-points calibration and the influence of nonlinearity.

Key words remote sensing; radiometric calibration; combining vicarious calibration; reflective solar bands; nonlinear

OCIS codes 280.4788; 040.1520; 120.0280

1 引 言

风云三号 C 星(FY-3C)是我国新一代极轨气象卫星的首颗业务星,于2013年9月23日成功发射。它携带了11台仪器,可实现紫外、可见光、近红外、红外和微波波段地气系统丰富信息的同时获取,具备包括大气垂直探测、对地成像、大气成分监测、地球辐射收支探测和空间天气监测等多方面综合环境气象监测和定量遥感能力。中分辨率光谱成像仪(MERSI)是FY-3C上搭载的主要光学成像载荷,具备多光谱成像和较高地面分辨率等特点。光谱探测范围涵盖可见光~热红外波段共20个通道,其中19个太阳反射通道(0.4~2.1 μm)和1个长波红外通道(10~12.5 μm)。它有5个通道星下分辨率为250 m,其余15个通道空间分辨率为1000 m。利用独特的250 m分辨率通道,可提供全球百米级空间分辨率的真彩色合成图像产品,同时利用对反射太阳辐射以及热发射辐射的探测,可实现对大气、陆地、海洋的多光谱连续观测,在数值天气预报、气候变化研究、生态和环境监测等领域都有重要应用^[1-2]。

卫星资料的辐射定标精度直接影响其定量应用的能力。国外遥感器多采用星上绝对定标装置,结合月球定标、地面辐射校正等手段实现反射波段的在轨定标,精度最高可达到2%^[3-5]。MERSI是风云系列卫星中首个搭载可见光星上定标装置(VOC)的成像仪器。VOC由6cm直径的小型积分球、光线扩束系统、陷阱探测器三个主要光学部件构成^[6]。然而,由于方案设计考虑不够严密,且在轨VOC积分球输出急剧衰减,目前尚未完成VOC数据分析处理。因此,MERSI反射波段的在轨辐射定标主要采用多种替代定标方法(VC)。包括基于中国辐射校正场地同步测量的场地替代定标^[7]、基于国际基准仪器的星星交叉定标^[8]、基于地球和空间稳定目标的替代定标(例如沙漠^[9]、水体、冰雪、深对流云^[10]和月球等)等,可实现对MERSI反射波段的高频次定标更新。

太阳反射波段的辐射定标通常采用线性方程,也就是认为仪器信号对入瞳辐射的响应是线性变化的。通过在轨测试期间对FY-3C/MERSI系统性的评估;1)发现该仪器相比前两颗卫星FY-3A和FY-3B,仪器噪声性能有较大提升,红外通道定标精度显著提高;2)采用多种VC方法对其太阳波段进行辐射定标计算时,发现多种方法结果间存在显著的差异^[11]。分析结果表明:这种不一致是由MERSI反射波段的辐射非线性响应导致的。Chen等^[12]基于对FY-3C发射前MERSI室外太阳反射定标测量资料的再分析,发现MERSI的大部分反射通道都存在显著非线性特征,并计算了非线性修正系数。Xu等^[8]在利用AQUA/MODIS对FY-3C MERSI进行在轨交叉定标计算时,发现定标系数存在显著的目标依赖性,定标系数会随着匹配样本目标辐射的动态发生变化,经过非线性订正后的定标结果变得更为稳定。

本文针对FY-3C MERSI显著的非线性响应特征,考虑到目前传统的线性定标方案仅能覆盖有限动态范围,无法适用整个动态范围,因此必须融合多种VC手段发展宽动态的综合定标(WD-IVC)方法。通过对比分析几种常用VC方案的优缺点,提出了FY-3C MERSI反射波段在轨辐射定标WD-IVC方法以及在轨非线性订正方案。以可见光通道为例进行WD-IVC计算,并对定标结果的可靠性和精度进行了验证分析。

2 方 法

2.1 常用替代定标方法

替代定标即不依赖于星上定标装置,选用其他辐射特征稳定的目标作为替代辐射源,利用基准传递的手段建立目标辐射与仪器响应之间的关系。根据选用辐射基准和目标特性不同,反射波段替代定标又可分为多种方法:

1) 基于地面同步测量的场地替代定标:这是最传统的方法,由亚利桑那大学遥感组^[13]在 20 世纪 80 年代率先提出。在面积足够且相对均匀的场地,基于卫星过境时的地面同步观测,利用辐射传输模拟卫星传感器入瞳辐射,根据定标公式建立入瞳辐射与仪器响应间的关系,从而实现辐射定标过程。风云气象卫星光学载荷早期将此方法作为基线定标方法,并沿用至今,通常选用敦煌辐射校正场进行反射波段的场地定标^[7,14]。

2) 基于全球稳定多目标场的替代定标:在全球范围选择辐射特性稳定的沙漠和水体等目标场地,基于卫星反演产品、数值预报场或气候态背景资料获取各场地的大气和地表参数,利用辐射传输模拟大气顶(TOA)辐射实现定标过程^[15-16]。该方案不依赖于场地同步观测,可以选择全球范围内多个稳定目标场,降低单目标定标的不确定性。

3) 基于深对流云目标的交叉定标(DCC):利用 DCC 低温且反射率高,光谱类似参考漫射白板的稳定特性,经过光谱修订、日地距离校正、方向性(BRDF)模型校正等处理,统计全球低纬地区基准遥感器观测 DCC 目标的反射率,统计待定标遥感器对 DCC 目标的信号响应,基于这两个统计结果实现辐射定标过程^[10]。该方案可以获取适用于高亮度目标的定标结果。

4) 基于基准载荷的星星交叉定标(SNO):以定标精度较高的载荷为基准,根据极轨卫星的轨道运行特点,选择两颗卫星星下点同时或近似同时经过相同区域的观测资料,建立基准载荷入瞳辐射与目标传感器响应计数值之间的关系,实现对目标传感器的定标过程。常用的基准载荷为 AQUA/MODIS、METOP/GOME-2 等。

5) 基于月球观测的辐射定标:基于月球反射率变化率 10^{-8} 每年的稳定特性,利用公认的月球反照率计算模型如自动月球天文台模型(ROLO)^[17],实现对月相、天平动、日地月距离等校正,计算与仪器响应匹配的月球反射率,实现定标过程^[18]。卫星载荷通常通过冷空视场观测月球,为获得真实的月球观测响应,仪器观测值还需要经过过采样及照度积分等处理。

上述方案由于选用的目标样本、辐射基准不同,适用的波段、动态也不同。表 1 对这几种方案的优缺点进行了对比分析。

表 1 常用替代定标方案优缺点对比

Table 1 Merit and demerit comparison between commonly used vicarious calibrations

Reflectance dynamic	Method	Comparison	Applicable channels of MERSI (except CH5)
High (>80%)	DCC	merit: high stability, providing high brightness information, better performance in the absorption channel	1~7, 16~20
		demerit: saturation in ocean channels	
Medium (<80%)	in-situ	merit: synchronous observation, calibration source traceability demerit: large uncertainty due to single point calibration, low frequency, unsuitable for absorption channels	1~16, 20
	multi-site	merit: multi-targets demerit: seasonal variation affected by atmosphere and surface, unsuitable for absorption channels	1~16, 20
	SNO_GOME	merit: not rely on the atmosphere and surface observation, spectral differences can be ignored, providing medium reflectance targets for ocean channels; demerit: only suit for VIS channels	1~3, 8~15
	SNO_MODIS	merit: do not rely on the atmosphere and surface observation demerit: need spectral correction	1~18
Low (<10%)	moon	merit: high stability demerit: accuracy depending on the moon model, low calibration frequency	1~20

2.2 宽动态综合定标方法

宽动态综合定标方法(WD-IVC)即融合上述不依赖于地面同步测量的多种替代方案,利用各方案选用目标样本亮度不同的特性,实现遥感器宽动态范围的辐射定标。充分发挥各方案的独特优势,根据光谱通道的不同选用不同的组合方案。

WD-IVC定标过程主要分为如下步骤:

1) 定标样本获取:各 VC 方案独立进行,分别获取相同时间段(通常以月为单位)MERSI观测指定目标(如地球稳定目标场、月球、DCC 或轨道交叉点)的响应计数值,以及各自计算方法获得这些目标对应的参考辐射(反射率)样本数据。

2) 数据转换和筛选:将各方案得到的样本转换为可直接比较的形式,包括物理量单位转换、光谱一致性修正以及样本的质量过滤等,并获得格式统一的匹配数据。其中光谱一致性修正是其中最为复杂也最为重要的过程。

3) 样本等权融合:由于不同方案获取的样本数量和覆盖亮度范围差异显著,例如基于统计方法获得的 DCC 样本每月仅有 1 组,而 SNO 交叉匹配方法获得样本却有上万组。为了保证每种方案在综合定标中发挥同等作用,通过分段平均对样本进行等权重融合。在 0~100% 的反射率范围内,以 2% 为步长划分若干子区间,分别对每个子区间内各方案的匹配样本求平均,然后再次平均获得该子区间内多方案的融合样本,同时计算每个间隔内样本的标准差。

4) 定标计算:基于等权融合后匹配样本,根据定标公式建立参考反射率 ρ 与仪器响应计数值 C 的拟合关系,采用加权回归计算定标系数。考虑到 FY-3C MERSI 的非线性响应特征,采用二次定标方程,即

$$\rho(C) = A \cdot C^2 + m \cdot C + n, \quad (1)$$

式中 C 为仪器响应计数值, m 和 n 为定标系数,根据仪器在轨状态定期更新, A 为非线性调整项,这里采用发射前室外太阳定标实验获得的非线性项^[11]进行修正。 ρ 为不考虑太阳天顶角和日地距离修正的 TOA 表观反射率,即

$$\rho = \pi \cdot I / E, \quad (2)$$

式中 I 为遥感器接收到的通道辐亮度, E 为 1AU 处的 TOA 太阳辐射。

基于最小二乘法,定标系数为使(3)式达到最小的解,其中权重 σ 为样本标准差,

$$\begin{aligned} \chi^2(m, n) &= \sum_{i=1}^N \left[\frac{\rho_i - \rho(C_i)}{\sigma_i} \right]^2 \\ &= \sum_{i=1}^N \left[\frac{\rho_i - (n + m \cdot C_i + A \cdot C_i^2)}{\sigma_i} \right]^2. \end{aligned} \quad (3)$$

则

$$\begin{aligned} m &= \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{C_i(\rho_i - A \cdot C_i^2)}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i - A \cdot C_i^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{C_i^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{\sigma_i^2} \right)^2}, \\ n &= \frac{\sum_{i=1}^N \frac{C_i^2}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i - A \cdot C_i^2}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{C_i(\rho_i - A \cdot C_i^2)}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{C_i^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{\sigma_i^2} \right)^2}. \end{aligned}$$

3 结果与验证

3.1 综合定标结果计算

WD-IVC 可以适用于所有反射通道,这里以 MERSI 可见通道为例进行综合定标结果计算和分析。图 1 显示了 FY-3C MERSI 可见光通道的光谱响应函数(右侧坐标轴),以及晴空 TOA 模拟辐射的光谱分布(左侧坐标轴)。

MERSI可见光通道大部分位于窗区通道,大气吸收较弱,其中通道1~3为高空间分辨率的宽光谱通道。

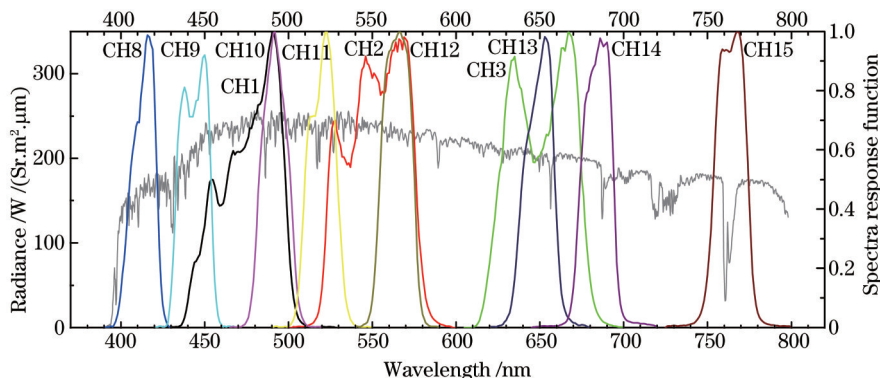


图1 FY-3C MERSI可见光通道的光谱响应函数以及晴空 TOA 模拟辐射的光谱分布

Fig.1 Spectral response functions of FY-3C/MERSI visible channels and spectral distribution of TOA simulated irradiation over clear sky

基于2014年10~12月3个月的样本,图2和图3显示了FY-3C MERSI可见光通道综合定标及其分析结果。其中图2(a)和图3(a)用不同颜色展示了定标所选用各种方案的原始样本分布,图2(b)和图3(b)为融合样本分布及综合定标结果,图2(c)和图3(c)为定标残差分布,自上而下分别代表不同通道。根据可见光通道的特点选用了SNO和多种稳定目标方案进行综合定标。SNO方案采用了两种独立参考基准,即AQUA/MODIS和METOP/GOME,在图中分别用蓝色和紫色标记表示。MODIS为美国EOS卫星上的重要仪器,与MERSI具有相近的光谱通道。GOME为搭载在欧洲METOP卫星上的紫外-可见光谱仪,光谱分辨率从0.28~0.53 nm不等^[19]。两载荷均具有较高的定标精度(约为2%),是国际公认的反射波段交叉定标基准。稳定目标包含了全球多个稳定目标场、DCC和月球方案,统一用绿色表示。为了覆盖更宽的动态范围,这里选用的稳定目标场种类包括11个具有不同反射率的沙漠目标和1个盐湖目标^[20]。作为低端参考,图中同时给出了MERSI冷空(SV)观测计数值,用黄色标记。图2自上而下分别为通道1~3、8和9。图3自上而下分别为通道10~15。

1) 一致性分析

VC方案结果的一致性为方案融合的前提。图1第一列结果显示,各VC方案分别覆盖不同动态范围。在10~12月,FY-3C与AQUA的轨道交点位于极区接近晨昏交接区域,因此与MODIS交叉匹配样本的表观反射率相对较低;FY-3C与METOP-A的轨道交点纬度低于AQUA且太阳高度角更大,因此获得的表观反射率高于MODIS;稳定目标中月球为低亮度目标反射率,大多低于10%,沙漠和盐湖反射率在20%~60%之间,而DCC为高亮目标可见波段反射率高于80%。不同方案虽然样本覆盖范围不同,但它们之间重叠区域内却具有很好的一致性,样本相关性可达0.99,重叠区域样本间相对差异小于1%,满足对业务5%~7%的定标需求。

2) 定标结果计算及分析

按照2.2节所述方法,将各VC方案样本进行融合,基于融合后的样本加权回归计算辐射定标斜率和截距,定标结果如图2(b)和图3(b)列所示。由于基于发射前室外实验获得的非线性系数进行定标曲线的约束回归,为了考察非线性项在高、低端的应用效果,这里DCC和SV样本没有参与综合定标回归计算。

融合后的样本具有很好的相关性,相关系数高于0.99。进一步说明各方案结果的一致性,并且说明MERSI在定标样本时段内没有显著衰减,可以用于定标计算。基于所有样本,图2(c)和图3(c)显示了残差分布 $[\rho(C_i) - \rho_i]$,同时分别统计了低端($\rho \leq 10\%$)和中高端($\rho > 10\%$)相对差异 $[(\rho(C_i) - \rho_i) / \rho_i \times 100]$ 的平均值。由统计结果可见,综合定标样本回归残差在中高端低于1%,说明提出的综合定标融合方法对各方案的样本有很好的表征。从通道1~3的DCC样本验证结果可见,综合定标结果与DCC样本具有很好的一致性,相对差异小于1.5%,说明基于发射前非线性项获得的综合定标结果适用于高端定标。残差分布在各通道存在相似规律,即定标结果在低端偏高,冷空处的辐射值明显大于零。这主要是由于MERSI在低端对辐射的响应能力显著降低,由此推断发射前非线性项在低端可能不适用。由样本分布图可以看到,随着入瞳辐射的减弱,仪器响应数值(DN)变化变缓,因此基于发射前非线性系数获得的定标结果在低端出现高估现象。

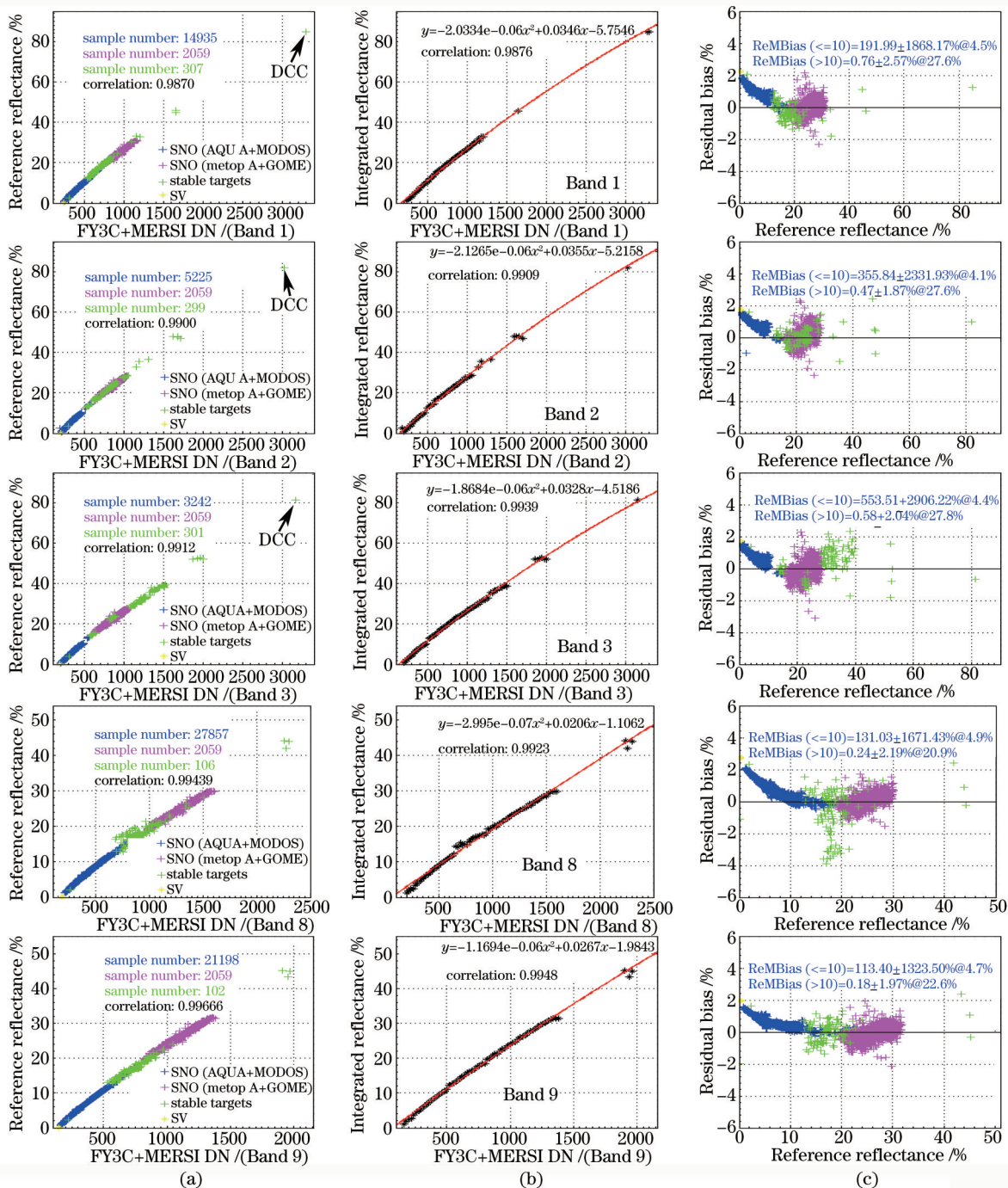


图2 FY-3C MERSI综合定标及残差分析。(a)各VC方案样本分布散点图;(b)融合样本分布及综合定标结果;(c)定标残差分布

Fig.2 Integrated calibration and residual analysis of FY-3C MERSI. (a)Distributions scatter diagram of various VC samples; (b) distributions of fusion samples and integrated calibration results; (c)distributions of residual biases

3.2 结果验证

基于2.1节介绍的第一种VC方法,利用2014年8月中国遥感卫星辐射校正场(CRCS)敦煌星地同步观测实验资料,对获得的综合定标结果进行验证,结果如表2所示。表中第一列为通道号,第二列为场地同步实验时MERSI观测敦煌场地的响应计数值,第三列为基于地面同步观测模拟的卫星入瞳反射率,第四列为基于综合定标系数获得的卫星观测值,第五列为卫星观测与模拟结果之间的相对偏差。检验结果显示,WD-IVC定标后卫星观测结果与场地同步试验模拟结果有很好的-一致性,相对差异小于3%。

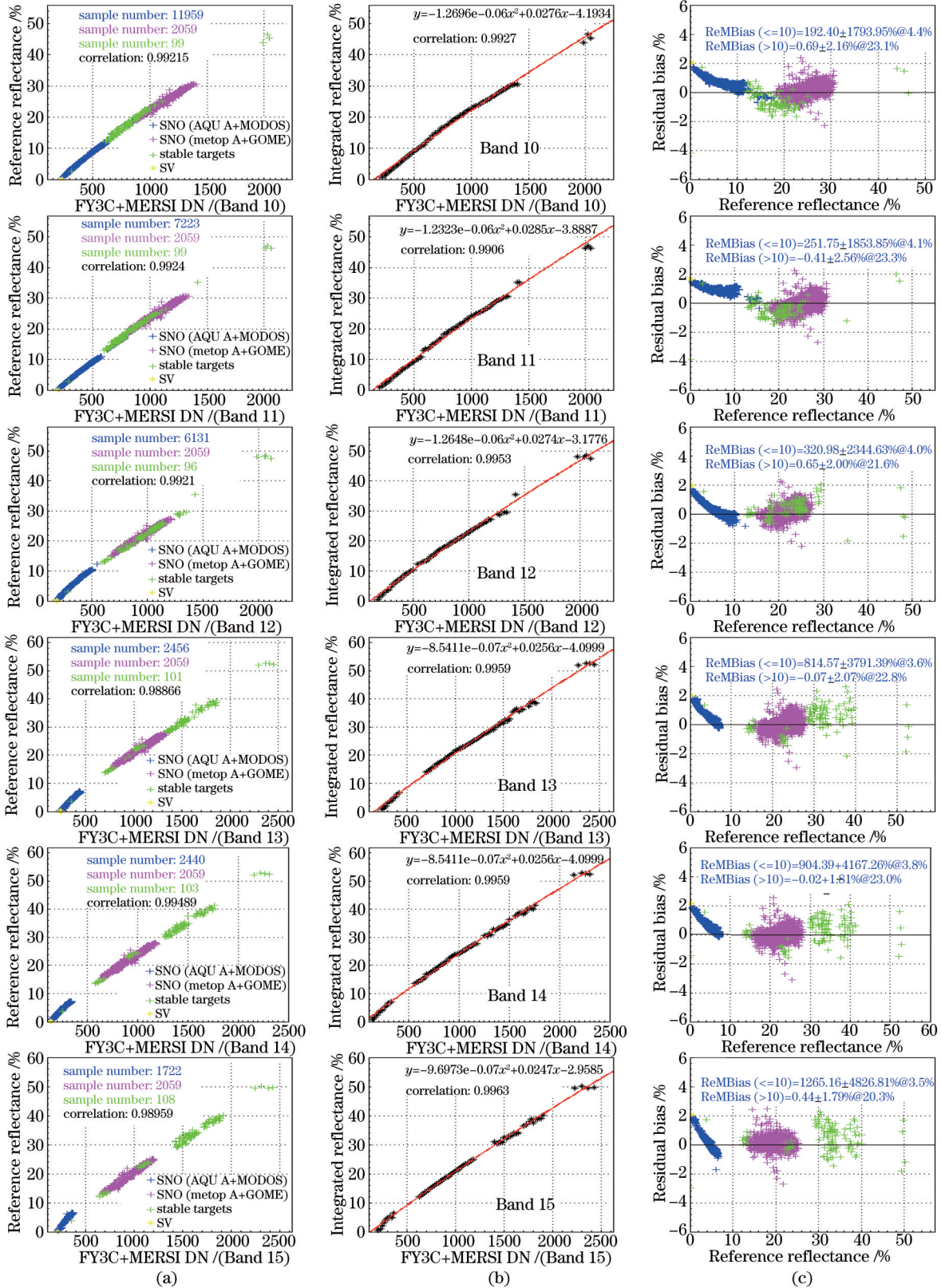


图3 FY-3C MERSI综合定标及残差分析。(a)各VC方案样本分布散点图;(b)融合样本分布及综合定标结果;(c)定标残差分布

Fig.3 Integrated calibration and residual analysis of FY-3C MERSI. (a)Distributions scatter diagram of various VC samples; (b) distributions of fusion samples and integrated calibration results; (c)distributions of residual biases

表2 基于敦煌辐射校正场星地同步观测实验资料的综合定标结果验证

Channel number	MERSI DN	Simulation reflectance /%	Observation reflectance /%	Relative difference /%
1	668.3333	16.24069	16.45169	1.299262
2	647.4444	17.20495	16.90884	-1.72109
3	715.2222	18.63355	18.11961	-2.75881
8	910.8889	16.94852	17.42333	2.801488
9	730.7778	16.51264	16.92636	2.50547
10	766.4444	16.17185	16.18053	0.053676
11	745.2222	16.544	16.63583	0.555059
12	753.3333	16.42601	16.76698	2.075829
13	867	17.56732	17.45736	-0.62591
14	736.7778	17.13306	17.57827	2.598542
15	806.8889	16.38125	16.36524	-0.09778

4 结 论

针对FY-3C MERSI反射波段辐射响应的非线性特征,融合多种替代定标手段提出了一种宽动态的综合定标方法,解决目前单一定标方案仅覆盖有限动态范围而无法适用宽动态的难题。简要介绍了几种常用VC方案,并重点阐述综合定标的样本融合和加权回归方法。以可见光通道为例,给出了定标结果示例,并基于DCC、SV以及敦煌辐射校正同步实验资料对综合定标结果在高、中、低端的定标精度进行了分析和验证。结果表明:1)采用的几种替代定标样本在综合定标曲线上具有很好的一致性,融合后的样本相关性可达0.99,证明了所提综合定标的可行性和可靠性;2)基于发射前定标的非线性系数获得综合定标结果适用于反射率大于10%的中高端,样本回归平均残差低于1%,高端定标结果与DCC样本具有很好的一致性,相对差异小于1.5%,基于敦煌场地同步实验的验证结果显示综合定标精度优于3%;3)由于MERSI在低端辐射响应能力显著减弱,基于发射前非线性系数获得的定标结果在低端出现高估现象,冷空处定标结果高估可达2%的绝对量。

宽动态综合定标方法适用于大部分反射通道,选用的替代定标方案可以根据各方案的优缺点和通道特征进行配置。综合定标结果可以表征宽动态范围的辐射响应特征,定标不确定性较传统的两点法线性定标有明显改善。对于具有非线性响应特征的载荷,宽动态的在轨定标可以一定程度上降低非线性系数测量误差的影响。FY-3C MERSI由于低端灵敏度显著降低,目前综合定标结果在低端适用性不够,若要进一步提高精度,需要考虑分段回归的方式解决低端问题。

参 考 文 献

- 1 Dong C, Yang J, Yang Z, *et al.*. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2009, 90(10): 1531-1544.
- 2 Yang J, Zhang P, Lu N M. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond[J]. International Journal of Digital Earth, 2012, 5(3): 251-265.
- 3 Xiong X X, Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization[J]. Adv Atmos Sci, 2006, 23(1): 69-79.
- 4 Xiong X X, Sun J, Barnes W, *et al.*. Multiyear on-orbit calibration and performance of Terra MODIS solar reflective bands[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2007, 45(4): 879 - 889.
- 5 Barnes R A, Eplee R E, Schmidt G M, *et al.*. Calibration of SeaWiFS. I. direct techniques[J]. Appl Opt, 2001, 40(36): 6682-6700.
- 6 Hu X, Sun L, Liu J, *et al.*. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12): 4915-4928.
- 7 Hu X Q, Liu J J, Sun L, *et al.*. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun(FY) series sensors[J]. Can J Remote Sens, 2010, 36(5): 566 - 582.
- 8 Xu N, Chen L, Wu R, *et al.*. In-flight intercalibration of FY-3C visible channels with AQUA MODIS[C]. Proc SPIE, 2014, 9264: 926408.
- 9 Sun L, Hu X Q, Xu N, *et al.*. Postlaunch calibration of FengYun-3B MERSI reflective solar 10 bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience

- and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1383–1392.
- 10 Chen L, Hu X Q, Xu N, *et al.*. 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)[J]. Remote Sensing, 2013, 5(12): 6958–6975.
- 11 Hu X Q, Xu Na, Wu R H, *et al.*. Performance assessment of FY-3C/MERSI on early orbit[C]. SPIE, 2014, 92640Y.
- 12 Chen L, Xu N, Li Y, *et al.*. FY-3C/MERSI pre-launch calibration for reflective solar bands[C]. SPIE, 2014, 9264: 92640Z.
- 13 Slater P N, Biggar S F, Holm R G, *et al.*. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors[J]. Remote Sens Environ, 1987, 22(1): 11–37.
- 14 Sun Ling, Guo Maohua, Xu Na, *et al.*. On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1869–1877.
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.
- 15 Han Qijin, Ma Lingling, Liu Li, *et al.*. On-orbit calibration and evaluation of GF-2 satellite based on wide dynamic ground target[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0728003.
韩启金, 马灵玲, 刘 李, 等. 基于宽动态地面目标的高分二号卫星在轨定标与评价[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0728003.
- 16 Han Qijin, Liu Li, Fu Qiaoyan, *et al.*. Vicarious calibration of multiple sensors based on reanalysis data of pseudo-invariant site[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1128002.
韩启金, 刘 李, 傅俏燕, 等. 基于稳定场地再分析资料的多源遥感器替代定标[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1128002.
- 17 Kieffer H H, Stone T C. The spectral irradiance of the moon[J]. Astronomical Journal, 2005, 129(6): 2887–2901.
- 18 Xiong X X, Wang Z P, Sun J Q, *et al.*. MODIS and VIIRS lunar observations and applications[C]. SPIE, 8889:88890V.
- 19 Callies J, Corpaccioli E, Eisinger M. GOME-2–Metop’s second-generation sensor for operational ozone monitoring[J]. ESA Bulletin, 2000, 102: 28–36.
- 20 Wang Ling, Hu Xiuqing, Chen Lin. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1911–1920.
王 玲, 胡秀清, 陈 林. 基于多种亮度稳定目标的 FY-3C/MERSI 反射太阳波段辐射定标精度检验[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1911–1920

栏目编辑: 苏 岑