

FY-3C/VIRR 热红外通道精细化再定标模型的构建和精度验证

徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 张里阳, 漆成莉

1. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心) 中国气象局, 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;
3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

摘要: 风云三号可见光红外扫描辐射计(FY-3/VIRR)自2008年FY-3A发射以来,在轨提供了十余年的对地观测数据。这些数据对于大气、地表和环境产品反演、天气和气候变化研究具有重要意义。本文分析了FY-3/VIRR热红外通道的偏差特征,针对定标偏差的昼夜差异和季节变化,结合业务定标模型初步确认误差的主要来源,并分别对星上定标模型和星上黑体辐射模型进行优化,构建热红外通道精细化再定标模型。FY-3/VIRR热红外通道再定标模型直接采用二次定标方程进行星上定标,并考虑了仪器环境辐射影响。以国内外公认的高精度红外大气探测仪器(IASI)为参考仪器,基于GSICS推荐的近同时星下点观测(SNO)匹配样本,实现了精细化再定标模型的参数确定。结果表明,该精细化再定标模型对VIRR热红外通道的系统性偏差,以及偏差的昼夜差异和季节性变化均有明显的修正效果,利用精细化再定标模型重定标后的月平均偏差均在 ± 0.3 K以内;以2018年为例,冬季昼夜差异由业务定标的0.4 K左右减小至小于0.1 K。

关键词: 可见光红外扫描辐射计(VIRR), 红外定标, 星上定标, 精细化定标模型, 再定标, 星上黑体辐射模型
中图分类号: P2

引用格式: 徐寒列,胡秀清,徐娜,张里阳,漆成莉.2023.FY-3C/VIRR热红外通道精细化再定标模型的构建和精度验证.遥感学报,27(10):2307-2317

Xu H L, Hu X Q, Xu N, Zhang L Y and Qi C L. 2023. Construction and validation of FY-3C/VIRR infrared window channel refinement re-calibration model. National Remote Sensing Bulletin, 27(10):2307-2317[DOI: 10.11834/jrs.20231589]

1 引言

风云三号极轨气象卫星所搭载的可见光红外扫描辐射计(FY-3/VIRR)是唯一继承了风云一号多通道扫描辐射计(MVISR),也是目前风云气象卫星中提供观测资料时间最长的光学成像仪器,风云三号的A、B、C星均搭载了VIRR仪器,3颗星共提供了自2008年以来10余年的对地观测数据,可实现长时间序列的地球物理参数定量反演。作为风云卫星再定标数据集的主要目标仪器之一,FY-3/VIRR历史数据可广泛应用于气候研究和气候服务的各个方面。由于早期的认知水平和仪器制造

工艺的限制,历史数据的业务定标过程可能会存在一些考虑不全之处,使得L1辐射级业务存档数据存在明显的系统性偏差及偏差的时空变化特征。

VIRR热红外通道(10.8和12.0 μm)的长期观测数据对于研究气候变化具有重要意义。VIRR热红外通道以用来反演众多陆表和大气参数,其中全球海表温度(SST)就是热红外通道反演的重要产品之一,研究表明,VIRR热红外通道0.1 K的定标偏差会引起0.3 K的日海温反演偏差(Cao等,2017)。在气候变化的研究中全球海温精度要求约为0.1 K/十年(Allen等,1994),这也对热红外通道的定标精度提出更高的要求。对VIRR热红外通

收稿日期:2021-09-07;预印本:2022-12-31

基金项目:国家自然科学基金(编号:42001312);国家重点研发计划(编号:2018YFB0504900,2018YFB0504901);风云卫星应用先行计划(编号:FY-APP-2021.021)

第一作者简介:徐寒列,研究方向为光学仪器辐射定标。E-mail:xuhanlie@cma.gov.cn

通信作者简介:胡秀清,研究方向为卫星传感器定标理论及技术方法。E-mail:huxq@cma.gov.cn

道历史数据进行再定标需要对长期历史数据进行偏差来源和特征规律分析,构建精细化再定标模型,从而实现长序列再定标数据集的构建。

FY-3/VIRR 红外通道采用的是星上黑体—冷空两点法定标,这种定标模式已经延续了几十年,早期的 AVHRR、MODIS 以及后来的 VIIRS、MERSI、高分辨率对地观测红外相机等国内外光学成像类仪器的红外通道均采用该定标方法 (Walton 等, 1998; Xiong 等, 2006; 赵艳华 等, 2021)。随着定量应用的进一步精细化,红外通道星上定标的误差来源及在轨订正的科学问题日益受到定标科技工作者和仪器研制方的高度关注。研究表明,红外通道定标的主要误差来源在于以下 3 个方面:一是仪器在特殊情况下响应异常,如仪器在轨运行时受到来自太阳或地球的污染。国内外诸多研究针对 AVHRR 红外通道太阳污染的产生原因和对定标的影响做过全面分析 (Walton 等, 1998; Cao 等, 2001, 2004; 徐寒列 等, 2015; 钮新华 等, 2015; 朱吉彪 等, 2021); 仪器异常响应所引起的偏差表现为空间局部特征,通常出现在特定时空位置;二是对定标模型中的一些特征参数描述不准确所引起的误差,比如定标模型中对仪器的非线性响应特征的描述不准确 (Weinreb 等, 1990; Brown 等, 1993; Xu 等, 2014; Wu 等, 2014)。仪器的非线性响应所引起的偏差表现为目标局部特征,在高温端或低温端的影响会更明显。三是黑体辐射源估计偏差引起的定标误差,包括黑体测温精度以及由于黑体的“非黑性”(即黑体发射率不为 1)所引起的一系列影响,如黑体等效亮温的计算偏差、环境辐射在定标模型中所引起的误差来源等。相比起前两类定标误差来源,作为参考定标源黑体辐射偏差对遥感器定标精度的影响是全局的,影响载荷全生命期、全域、全动态的定标偏差分布,是红外通道星上定标最主要的误差来源之一。

本文通过分析 FY-3/VIRR 红外通道业务定标模型,结合 FY-3C/VIRR 热红外通道偏差时空特征,对星上定标模型进行精细化重构,实现了定标模型中星上黑体路径辐射的在轨计算。将再定标模型应用于实际数据中并结合 GSICS 推荐的交叉定标方法对再定标结果进行检验,该模型不仅对 VIRR 的系统性偏差有较大改进,且对定标偏差的周期性特征(轨道变化、季节变化等)也有显著改进:热红外通道精细化定标模型所计算的月平

均偏差均在 ± 0.3 K 以内,以 2018 年为例,冬季昼夜差异由业务定标的 0.4 K 减小至小于 0.1 K;白天偏差最大与最小月份之差由业务定标的 0.6 K 以上减小至 0.2 K。

本文对 FY-3C/VIRR 和 Metop/IASI 进行仪器简要介绍,以及以 Metop-B/IASI 为参考仪器的 VIRR 热红外通道的偏差特征,并结合 FY-3C/VIRR 的业务定标模型,分析了 VIRR 热红外通道定标偏差的主要来源;提出一种基于非线性定标的考虑星上环境辐射的热红外通道精细化再定标模型,并介绍了模型参数的推导过程,完成对 FY-3C/VIRR 热红外通道的精细化再定标模型构建;同时介绍该精细化定标模型的应用效果,对 2017 年—2019 年 FY-3C/VIRR 热红外通道再定标后的实际效果的改进评估。

2 FY-3C/VIRR 热红外通道定标偏差特征分析

VIRR 是 FY-3A、3B 和 3C 上均搭载的重要光学成像仪器,它在继承了 FY-1C/1D 的 MVISIR 的设计的基础上进行改进,同时也是目前风云卫星平台中提供数据时间最长的光学仪器。VIRR 共设置有 10 个通道(各通道的波段范围和性能指标见表 1),7 个太阳反射波段和 3 个红外波段(1 个中红外通道和 2 个热红外通道),可实现云、雾探测、云参数反演、地表海表温度等地球物理参数的反演。热红外通道探测器为 HgCdTe 器件,这种器件被广泛的应用在热红外探测器中, HgCdTe 探测器明显的非线性响应特征也被研究人员所熟知,如早期的 AVHRR 红外通道的非线性特征, FY-3A/VIRR 的分裂窗通道的非线性特征等,国内外也进行了很多研究 (Walton 等, 1998; Mittaz 等, 2009; Mittaz 和 Harris, 2011; Xu 等, 2014)。

表 1 VIRR 光谱和通道性能测试结果(杨军 等, 2011)
Table 1 VIRR spectral specification and band performance results (Yang et al., 2011)

通道	波段范围/ μm	噪声等效反射率/ $\rho/\%$ 噪声等效温差/ $\text{K}@300\text{ K}$	定标精度/ (ρ 或 K)
1	0.580—0.676	0.010	1.5006%
2	0.830—0.883	0.021	3.1352%
3	3.436—3.829	0.116 K	0.2 K
4	10.34—11.32	0.034 K	1.6 K
5	11.52—12.54	0.059 K	1 K
6	1.540—1.648	0.012	2.8805%
7	0.444—0.485	0.010	2.6864%
8	0.479—0.523	0.010	1.4136%
9	0.527—0.574	0.009	1.2986%
10	1.320—1.379	0.023	6.78%

2.1 FY-3C/VIRR 热红外通道偏差特征

具有相近光谱的不同的极轨卫星的仪器可以利用两者的近同时同地的观测数据 (SNO) 进行交叉比对, 以国际公认的定标精度和稳定度较高的仪器为参考仪器, 对目标仪器进行定标精度的评估。Metop 系列卫星上的红外高光谱探测仪 IASI 是国际公认的定标精度较高的红外载荷, 它可获得红外谱段地球发射的高光谱辐射。IASI 的光谱覆盖范围为 $645\text{--}2760\text{ cm}^{-1}$ ($3.6\text{--}15.5\text{ }\mu\text{m}$), 光谱分辨率为 0.25 cm^{-1} , 其光谱可以全部覆盖 FY-3/VIRR 的热红外通道 (CH4 和 CH5)。IASI 对地扫描的视场角为 $\pm 48.3^\circ$ 通过 30 次驻留观测实现, 每个驻留由 2×2 个探元组成, 每个探元的星下点空间分辨率为 12 Km 。IASI 的通过对星上黑体和冷空观测实现在轨定标。一些列研究证明了 IASI 的光谱和辐射定标精度和稳定度 (Aumann 和 Pagano, 2008; Blumstein 等, 2004, 2007; Larar 等, 2010), IASI 的测量精度和稳定度在 0.1 K 以内。高精度、高稳定度和高光谱的对地观测使得 IASI 作为国内外普遍使用的交叉比对和交叉定标所用的地球观测的参考源, IASI 也是全球空基交叉定标系统 (GSICS) 推荐使用的红外通道参考仪器之一, 国内外学者以 IASI 为参考仪器进行定标改进或定标评估。Xu 等 (2014) 以 IASI 为参考仪器实现了对 FY-3A/VIRR 红外通道非线性修正系数的推导, 改进了 FY-3A/VIRR 偏差的非线性特征。IASI 也经常被用来进行定标模型改进效果的检验。Mittaz 和 Harris (2011)、Chang 等 (2017)、Wu 等 (2014) 以 IASI 为参考仪器对 AVHRR 和 MODIS 红外通道的定标模型和非线性系数进行验证。Cao 等 (2009) 使用 Metop/IASI 作为参考仪器来评估 HIRS 的光谱偏差。

对在轨仪器进行定标精度评估可以以国内外公认的高精度仪器为参考仪器, 利用 SNO 匹配数据进行评估。该方法最关键的是确定待比对的两个仪器的光谱响应一致性和观测条件的一致性。本文以 IASI 为参考仪器, 利用 FY-3C/VIRR 和 IASI 的 SNO 观测匹配数据对 VIRR 热红外通道进行定标评估和再定标模型参数的确定。LEO-LEO 基于 SNO 的交叉定标方法参考 GSICS 推荐的 GEO-LEO 的 SNO 交叉定标方法, 结合 Xu 等 (2014) 所用的 LEO-LEO 的 SNO 交叉匹配过程, 经过数据匹配、观测匹配、数据转换和辐射比较 4 个步骤, 实现 FY-3C/VIRR 和 IASI 基于 SNO 的交叉匹配数据的获取。

FY-3C/VIRR 热红外通道的业务定标偏差存在 3 个明显特征: 偏差的非线性特征、偏差的昼夜差异性以及偏差的季节变化特征。Xu 等 (2014) 在研究 FY-3A/VIRR 的热红外通道的偏差时曾经指出, FY-3A/VIRR 的窗区通道存在明显的非线性特征, 并利用 VIRR 和 IASI 的 SNO 结果对 VIRR 的非线性特征进行修正, 使得 FY-3A/VIRR 热红外辐射偏差非线性特征得到了明显的改善。类似的, FY-3C/VIRR 的热红外通道偏差也存在显著的非线性特征, 以 Metop-B/IASI 为参考仪器, 从 2021 年 4 月 FY-3C/VIRR 与 IASI 的偏差分布可以看出 (图 1 (a)、(b)), VIRR 热红外通道偏差随目标温度的分布, 在约 230 K 以上的中高端, 平均偏差在 -0.5 K 左右; 在 230 K 以下, 随着目标温度的降低, VIRR 的偏差逐渐变大, 当目标温度为 210 K 左右, 平均偏差增大至 -1.0 K 左右。

FY-3C/VIRR 热红外通道偏差还存在昼夜差异特征。由 2017 年 11 月的 FY-3C/VIRR 红外 CH4 通道与 IASI 在 2017 年 11 月的 SNO 匹配结果可见 (图 1 (c)、(d)), 昼、夜匹配样本存明显的分叉现象, 白天的匹配样本平均偏差为 -1.375 K , 夜晚匹配样本的平均偏差为 -0.682 K , 昼夜差异高达 0.7 K 左右。VIRR 热红外通道定标偏差的周期性化特征比较明显, 白天尤为显著 (图 2)。这也进一步说明了 FY-3C/VIRR 红外通道偏差在某些月份的定标结果存在昼夜差异性。

2.2 热红外通道定标偏差来源分析

热红外通道定标模型直接影响定标偏差及其时空分布特征。VIRR 红外通道的星上定标模型采用与早期 AVHRR 类似的星上线性定标加非线性修正的方式。卫星在跨轨扫描中, 仪器在一次扫描中分别实现对星上定标黑体 (ICT)、冷空 (SV) 和对地进行扫描, 利用星上黑体和冷空的观测进行定标系数 (斜率项和截距项) 的计算, 即:

$$G = (R_{\text{ICT}} - R_{\text{SV}}) / (DN_{\text{ICT}} - DN_{\text{SV}}) \quad (1)$$

$$I = R_{\text{SV}} - G \cdot DN_{\text{SV}} \quad (2)$$

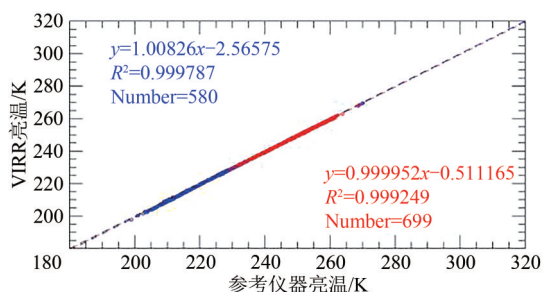
式中, G 和 I 分别为斜率项和截距项, R_{SV} 为冷空辐射 (常数), 由发射前试验确定, DN_{ICT} 和 DN_{SV} 分别为仪器对黑体和冷空的观测计数值, R_{ICT} 为星上黑体辐射, 计算如下:

$$R_{\text{ICT}} = \frac{c_1 \nu_c^3}{e^{\frac{c_2 \nu_c}{T_{\text{ICT}}}} - 1} \quad (3)$$

$c_1 = 1.1910427 \times 10^{-5} \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-4})$, $c_2 = 1.4387752 \text{ cm} \cdot \text{K}$, ν_c 为通道中心波数, T_{ICT}^* 为“有效”黑体温度 (即通过实际光谱响应函数进行通道订正后的黑体温度):

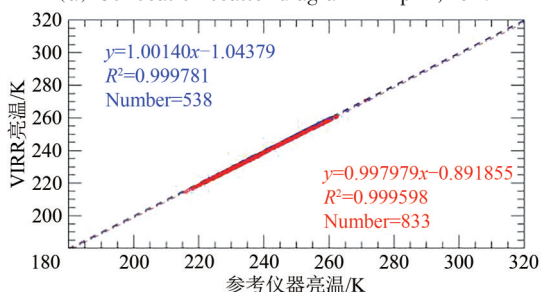
$$T_{\text{ICT}}^* = A + B \cdot T_{\text{ICT}} \quad (4)$$

式中, A 和 B 为“有效”黑体温度订正系数, 在发射前地面定标时给出。



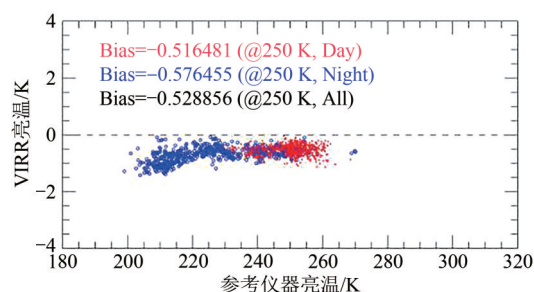
(a) 2017年4月匹配结果散点图

(a) Collocation scatter diagram in April, 2017



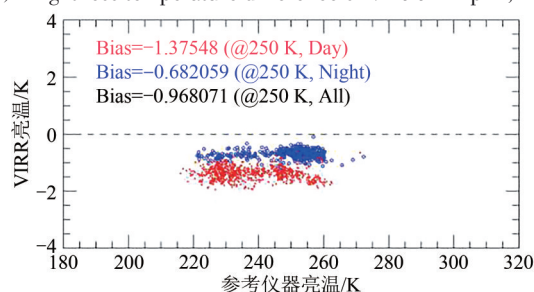
(c) 2017年11月匹配结果散点图

(c) Collocation scatter diagram in November, 2017



(b) 2017年4月 VIRR 的亮温偏差分布图

(b) Brightness temperature difference of VIRR in April, 2017

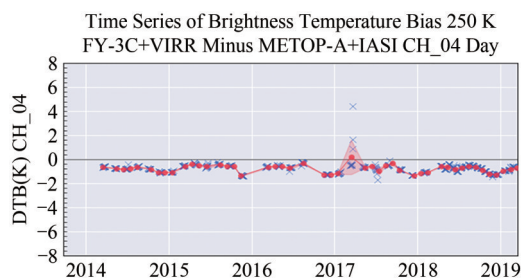


(d) 2017年11月 VIRR 的亮温偏差分布图

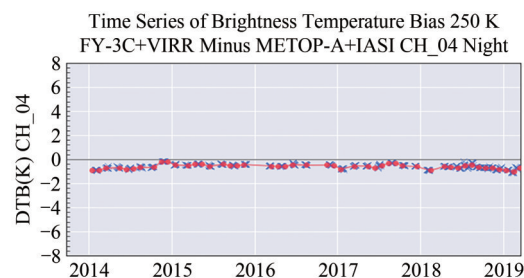
(d) Brightness temperature difference of VIRR in November, 2017

图1 2017年4月和11月 FY-3C/VIRR 红外 CH4 与 IASI 基于 GSICS 匹配结果的散点图和偏差随目标温度的分布 (红色: 白天匹配样本, 蓝色: 夜晚匹配样本)

Fig. 1 TBB comparison between FY-3C/VIRR and Metop-A/IASI and their observation difference (VIRR-IASI) using collocation samples in April and November, 2017 (Red: samples in day; blue: samples at night)



(a) 白天
(a) Day-time



(b) 夜间
(b) Night-time

● Daily ● Monthly 2013-09-23—2019-03-19 NSMC-GPRC

图2 FY-3C/VIRR 红外 CH4 通道偏差的长时间序列

Fig. 2 The time series of TBB bias between FY-3C/VIRR CH4 and Metop-A/IASI

在轨道标过程计算出斜率和截距项后, 则红外通道对地观测的计数值 DN_{EV} 与对地观测的辐射值线性部分 R_{LIN} 可表示为

$$R_{\text{LIN}} = G \times DN_{\text{EV}} + I \quad (5)$$

实际上, 红外通道对入射辐射的响应是非线性的, FY-3/VIRR 基于辐射值的非线性订正方法计算二次项辐射订正值, 即:

$$R_{\text{COR}} = b_0 + b_1 \cdot R_{\text{LIN}} + b_2 \cdot R_{\text{LIN}}^2 \quad (6)$$

式中, 非线性订正系数 b_0 , b_1 和 b_2 在地面定标试验中给出。对地观测的辐射可以表示为

$$R_{\text{EV}} = b_0 + (b_1 + 1) \cdot R_{\text{LIN}} + b_2 \cdot R_{\text{LIN}}^2 \quad (7)$$

结合式 (5)、(6) 和 (7), FY-3/VIRR 红外通道的对地辐射可以表示为

$$R_{\text{EV}} = (b_0 + (b_1 + 1)R_{\text{SV}} + b_2R_{\text{SV}}^2) +$$

$$\left((b_1 + 2b_1 R_{SV} + 1) \left(\frac{R_{ICT} - R_{SV}}{DN_{ICT} - DN_{SV}} \right) \right) (DN_{EV} - DN_{SV}) + b_2 \left(\frac{R_{ICT} - R_{SV}}{DN_{ICT} - DN_{SV}} \right)^2 (DN_{EV} - DN_{SV})^2 \quad (8)$$

由式(8)可见, VIRR 热红外通道业务定标模型的误差主要来自于两方面: (1) 二次项系数。该定标模型中的二次项系数并非常数, 而是与线性系数 G 或星上黑体辐射 R_{ICT} 有关, 即卫星在轨运行中, 当星上定标黑体温度发生变化时, 线性系数发生变化, 二次项系数也随之变化。Mittaz 等(2009)研究曾指出, 热红外通道探测器的二次项系数与探测器温度密切相关, 即当探测器温度不变是, 热红外通道的二次响应形状基本保持不变。该定标模型中, 当黑体温度发生变化时, 本质上改变了二次项系数, 由此会引入定标偏差。(2) 黑体辐射计算。星上黑体辐射通过发射前试验得到的定标系数进行计算: 在发射前试验中相同工况下, 利用面源黑体变温试验推算的定标系数应用于该工况下星上的变温试验中, 计算星上黑体亮温, 进而建立星上黑体 PRT 温度计测量码值与星上黑体亮温的关系, 进而在轨计算星上黑体的“等效”亮温用于定标系数的计算。在轨仪器进行星上黑体观测时, 探测器的响应实际包括: 星上黑体的发射辐射、黑体反射的环境辐射、扫描镜自身的发射辐射以及仪器背景辐射。实际定标计算中, 认为在一个定标周期内扫描镜自身的发射辐射和仪器背景辐射在短时间内保持不变, 通过在定标模型中星上黑体观测减去冷空背景观测消除这两项辐射来源。利用发射前的黑体“等效”亮温转换系数实际上是对以上星上黑体发射率和黑体反射的环境辐射之和进行等效, 即将星上黑体观测路径上的辐射体现在一组多项式拟合系数中。这个拟合过程基于发射前真空试验获得, 在轨的适用情况也会带来定标偏差。

结合以上分析可知, FY-3/VIRR 的定标误差来源, 一方面可能来自于业务定标模型中二次项系数所引起的偏差, 从而导致明显的偏差非线性特征; 另一方面与在轨黑体“等效”亮温和黑体辐射的计算, 特别是黑体反射的环境辐射项的缺少考虑有关。因此在对 FY-3/VIRR 热红外通道进行再定标精细化模型重构时, 首先选择与探测器二次响应基本不变的特征更加一致的星上二次拟合定标模型进行二次定标模型重构, 并确定非线性系

数; 其次, 对星上定标过程的黑体路径辐射的计算进行精细化模型构建, 使之可以较好的反应环境辐射的仪器温度依赖特征, 进而更加真实的反应出星上黑体观测时探测器所接收到的路径辐射。

3 VIRR 热红外通道精细化再定标模型构建

VIRR 分裂窗通道探测器采用的是光导型碲汞器件, 由辐射器二级冷块进行制冷, 器件的非线性特征不可忽略, 且非线性与探测器工作温度直接相关。MODIS、VIIRS 以及 FY-3D/MERSI (Xu 等, 2018; McIntire 等, 2019) 热红外通道星上定标算法中, 均认为探测器响应为二次响应模型, 即:

$$R_{EV} = a_0 + b_1 \cdot dn_{EV} + a_2 \cdot dn_{EV}^2 \quad (9)$$

式中, $dn_{EV} = DN_{EV} - DN_{SV}$, 即对地观测与冷空观测码值之差。在二次定标模型中, 假设仪器的非线性响应是小量, 且在相同工作温度下在轨前后非线性响应形状不发生变化, 即由发射前真空试验确定非线性系数 a_0 和 a_2 , 斜率项 b_1 由在轨定标计算时进行逐扫描行的计算, 即定标系数 b_1 的计算公式为

$$b_1 = (R_{ICT}^{path} - a_0 - a_2 \cdot dn_{ICT}^2) / dn_{ICT} \quad (10)$$

式中, $dn_{ICT} = DN_{ICT} - DN_{SV}$, 即黑体与冷空观测码值之差。由式(10)可见, 在该定标模型中, 定标精度常数项、二次项, 以及在轨计算的黑体路径辐射共同决定, 一旦确定了常数项和二次项, 定标偏差则主要来自于星上黑体观测路径上的辐射值 R_{ICT}^{path} 的计算偏差决定。在对 FY-3/VIRR 热红外通道进行精细化再定标模型构建时, 采取直接二次拟合的方式进行定标模型的构建。

在星上定标定标过程中, 假设仪器为二次响应的, 则进行黑体观测时入瞳处的辐射可以表示为

$$R_{ICT}^{path} = \varepsilon_{ICT} \cdot \text{Planck}(T_{ICT}) + (1 - \varepsilon_{ICT}) \cdot R_{ENV} + R_{SM} + R_{BKG} = a_0 + a_1 \cdot DN_{ICT} + a_2 DN_{ICT}^2 \quad (11)$$

式中, $\varepsilon_{ICT} \cdot \text{Planck}(T_{ICT})$ 为星上黑体 ICT 的发射辐射, $(1 - \varepsilon_{ICT}) \cdot R_{ENV}$ 为由于 ICT 的发射率不为 1 所导致的定标黑体反射的环境辐射, R_{SM} 为扫描镜自身的发射辐射, R_{BKG} 为仪器背景辐射。同样, 当仪器对冷空进行观测时, 同一扫描行仪器分别进行冷空和黑体观测的间隔时间较短, 假设探测器响应、扫描镜发射辐射和仪器自身的背景辐射保持不变, 则冷空观测时入瞳处的辐射可以表示为

$$R_{SV}^{path} = R_{SV} + R_{SM} + R_{BKG} = a_0 + a_1 \cdot DN_{SV} + a_2 DN_{SV}^2 \quad (12)$$

式中, R_{SV} 为冷空端的辐射。假设 R_{SV} 非常小可以忽略, 即:

$$\varepsilon_{ICT} \cdot \text{Planck}(T_{ICT}) + (1 - \varepsilon_{ICT}) \cdot R_{ENV} = a_1 \cdot dn_{ICT} + a_2 \cdot dn_{ICT}^2 \quad (13)$$

理论上, 当精确已知星上黑体 ICT 的发射率 ε_{ICT} 、星上黑体温度 T_{ICT} 和以及黑体路径上的环境辐射 R_{ENV} 时, 式 (13) 是常数项 a_0 接近于 0。

通过以上分析可知, 黑体路径的辐射计算精度直接决定定标精度。环境辐射是黑体路径上计算中的重要影响因子。环境辐射与仪器温度密切相关, 极轨卫星在轨运行过程中, 仪器温度受外界影响较大, 存在昼夜变化和轨道周期、季节周期以及长期变化趋势, 因此在计算星上黑体的路径辐射时, 利用发射前试验数据或短期在轨观测数据对黑体反射环境辐射进行简单的等效, 会导致定标结果偏差出现与仪器温度变化相关的不同尺度的周期性特征。在对 FY-3C/VIRR 红外通道星上定标模型进行重构采用式 (13) 的形式表示, 模型重构包括星上二次多项式定标模型的中非线性系数的确定, 和仪器温度相关的星上黑体路径辐射模型的构建两部分。

本文利用 FY-3C/VIRR 和 Metop-A/IASI 的匹配结果, 以 Metop-A/IASI 的模拟观测值为辐射参考值, 进行精细化定标模型二次响应系数的拟合确定, 同时构建仪器温度相关的星上黑体路径辐射模型, 并确定参数。为了尽量减小由于匹配所引起的不确定度对于模型参数的影响, 在匹配结果选择时除了需要对匹配数据进行严格的质控外, 还需要重点考虑以下 3 个问题: (1) 参与模型参数拟合的样本要去除太阳污染等各类污染区的观测数据; (2) 非线性系数的计算要选择 FY-3C/VIRR 昼夜偏差相对一致的时间段进行模型参数拟合; (3) 参与拟合的样本处于相同或相近的仪器工况下。综合以上影响因素的共同考虑, 本文选择 2017 年 4 月 FY-3C/VIRR 和 Metop-A/IASI 的 SNO 匹配结果并进行质量控制后作为模型参数拟合的数据。

基于 2017 年 4 月 FY-3C/VIRR 和 Metop-B/IASI 的匹配数据进行二次定标模型的系数拟合。以红外高光谱 IASI 与 VIRR 的通道光谱响应函数进行卷积得到 VIRR 对应通道的 IASI 模拟辐亮度, 以 IASI 的模拟辐亮度为观测目标参考值, 建立 VIRR 对地观测码值与辐射参考值的多项式关系。通过对 FY-3C/VIRR 红外 CH4 通道经过数据质控筛选后基准工况下用于进行非线性系数拟合的匹配数据利

用最小二乘法进行二次拟合, 得到二次定标模型的拟合系数。

结合常数项和二次项系数以及黑体“等效”温度及其辐射, 可重新计算得到 VIRR 的对地观测辐射。再定标后的误差来源主要来自于线性项系数的计算, 即与定标时刻星上黑体观测的路径辐射计算偏差直接相关。结合前面的分析可知, 仪器对星上黑体进行观测时, 路径辐射包括黑体自身的发射辐射和由于黑体发射率不为 1 所引起的黑体反射的环境辐射, 业务定标算法中利用黑体“等效”亮温计算黑体路径辐射会引起一定的定标偏差。FY-3/VIRR 作为早期仪器, 星上测温遥测数据较少, 缺乏仪器温度或扫描镜支架温度等遥测温度, 直接建立考虑星上黑体反射的环境辐射的黑体观测路径辐射的模型构建存在很大难度。考虑到 FY-3/VIRR 星上黑体不控温, 与黑体温度与仪器温度始终处于热平衡状态, 虽然黑体温度并不能真正代表仪器温度, 它在一定程度上可以反应仪器所处的环境温度以及环境温度的变化特征, 因此本文拟采用星上黑体温度作为仪器代理温度进行星上黑体观测路径辐射模型构建。

根据式 (13), 仪器对星上黑体观测时刻, 观测路径辐射可以表示为

$$\Delta L_{ICT}^{path} = \varepsilon_{ICT} \cdot R_{ICT} + (1 - \varepsilon_{ICT}) \cdot \varepsilon_{ENV} \cdot R_{ENV} \quad (14)$$

考虑早期仪器星上黑体发射率的测量偏差以及环境辐射利用星上黑体物理温度进行替代建模, 因此黑体辐射模型中暂时不考虑使用黑体发射率的实测数据, 式 (14) 可以写成:

$$\Delta L_{ICT}^{path} = R_{ICT} + f(ICT_{temp}) = \text{Planck}(ICT_{temp}) + f(ICT_{temp}) \quad (15)$$

式中, ICT_{temp} 为星上黑体的物理温度。在式 (15) 中, $f(ICT_{temp})$ 表示利用星上黑体 ICT 的物理温度对仪器所观测到的由于黑体自身发射率不为 1 所引起的反射的环境辐射以及黑体自身发射辐射的共同等效作用。该黑体路径辐射模型中, 等号右边第一项可以利用黑体实际物理温度 (黑体铂电阻温度计实测温度) 和通道的 SRF 计算结合 Planck 函数计算得到, 该模型的关键在于等号右边第二项的黑体等效环境辐射的函数模型构建及模型参数的确定。

以 IASI 的模拟辐射值作为参考值, 星上黑体辐射 $\Delta L'_{ICT}$ 可表示为

$$\Delta L'_{ICT} = a_0 + ((R_{EV}^{IASI} - a_0 - a_2 \cdot dn_{EV}^2)/dn_{EV}) \cdot (dn_{ICT} + a_2 \cdot dn_{ICT}^2) \quad (16)$$

式中, $\Delta L'_{ICT}$ 与星上黑体辐射 $\text{Planck}(ICT_{temp})$ 之差即

可以认为是业务定标模型中星上黑体路径辐射的缺失部分。分析 $\Delta L'_{\text{ICT}}$ 和星上黑体辐射 Planck (ICT_{temp}) 之差与星上黑体物理温度的关系发现, 星上黑体路径辐射的偏差与黑体物理温度的变化方向一致, 两者存在明显的二次关系特征:

$$\Delta L'_{\text{ICT}} - \text{Planck}(\text{ICT}_{\text{temp}}) = c_0 + c_1 \cdot \text{ICT}_{\text{temp}} + c_2 \cdot \text{ICT}_{\text{temp}}^2 \quad (17)$$

黑体路径辐射的模型可表示为

$$\Delta L_{\text{ICT}}^{\text{path}} = \text{Planck}(\text{ICT}_{\text{temp}}) + c_0 + c_1 \cdot \text{ICT}_{\text{temp}} + c_2 \cdot \text{ICT}_{\text{temp}}^2 \quad (18)$$

经过以上分析, FY-3C/VIRR 红外通道在轨定标模型采用固定常数项和二次项系数的二次拟合定标模型, 在轨计算的一次项定标系数可表示为

$$b_1 = \frac{\left(\text{Planck}(\text{ICT}_{\text{temp}}) + (c_0 + c_1 \cdot \text{ICT}_{\text{temp}} + c_2 \cdot \text{ICT}_{\text{temp}}^2) \right) - a_0 - a_2 \cdot dn_{\text{ICT}}^2}{dn_{\text{ICT}}} \quad (19)$$

式中, $dn_{\text{ICT}} = DN_{\text{ICT}} - DN_{\text{SV}\odot}$ CH4和CH5的模型系数见表2。FY-3C/VIRR 热红外通道的对地辐射可表示为

$$R_{\text{EV}} = a_0 + b_1 \cdot dn_{\text{EV}} + a_2 \cdot dn_{\text{EV}}^2,$$

式中, $dn_{\text{EV}} = DN_{\text{EV}} - DN_{\text{SV}\odot}$

表2 FY-3C/VIRR 热红外通道再定标模型系数

Table 2 The re-calibration model coefficients of FY-3C/VIRR IR channels

通道	a_0	a_2	c_0	c_1	c_2
CH4	-0.669400	6.98875E-6	10906.126	-80.8977	0.150026
CH5	-0.681902	-1.14463E-5	25375.619	-187.430	0.346109

4 模型应用与结果分析

图3为利用本文所构建的精细化再定标模型对2017年4月和11月的FY-3C/VIRR 红外通道进行再定标之后的偏差分布情况, 其结果可以与图1进行对比。该再定标模型对FY-3C/VIRR 热红外通道偏差的非线性特征(2017年4月)以及偏差的昼夜差异(2017年11月)进行了很好的修正, 修正后的2017年11月昼、夜偏差分别为-0.13 K和0.07 K, 昼夜偏差之差异差异由修正前的接近0.7 K降低至0.06 K左右。

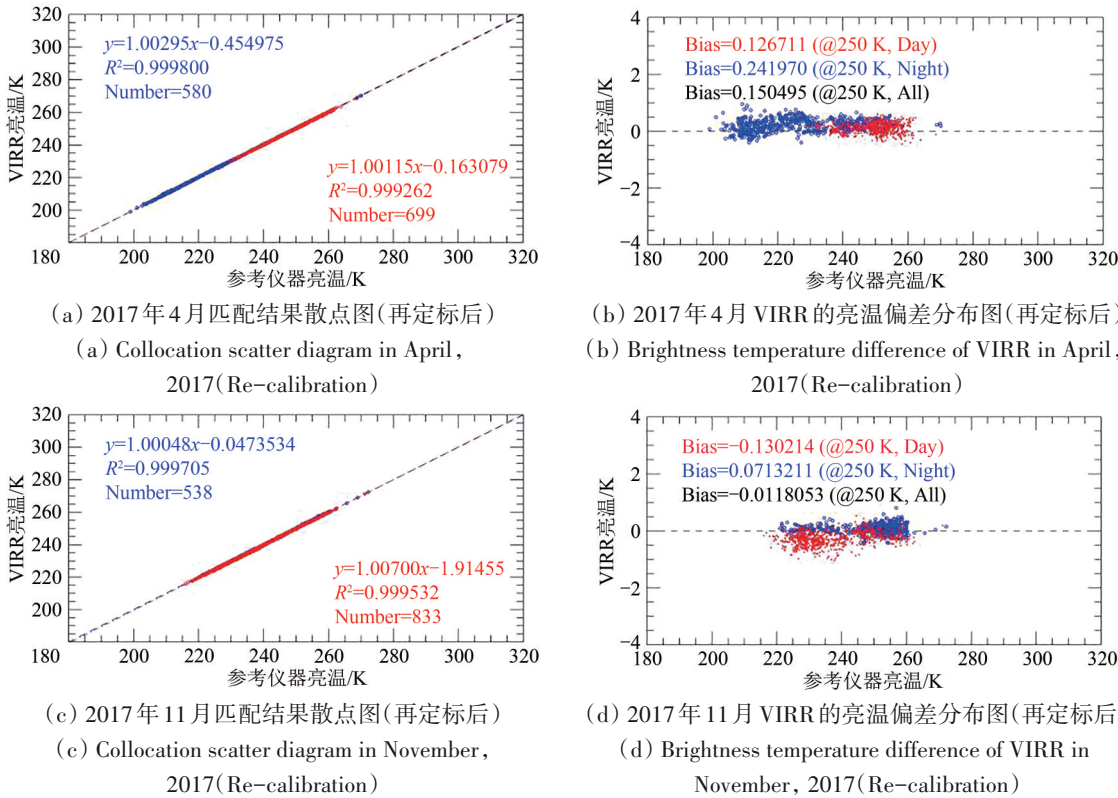


图3 同图1, 但为再定标后的偏差结果。2017年4月(上)和11月(下)FY-3C/VIRR 红外CH4与IASI基于GSICS匹配结果的散点图(左)和偏差随目标温度的分布(右)(红色:白天匹配样本, 蓝色:夜晚匹配样本)

Fig. 3 As Fig. 1, but the re-calibration result of FY-3C/VIRR CH4. TBB comparison between FY-3C/VIRR and Metop-A/IASI (left) and their observation difference (VIRR-IASI) using collocation samples in April (Upper) and November (Bottom), 2017 (Red: samples in day; blue: samples at night)

图4为以Metop-B/IASI为参考仪器，VIRR热红外通道2018年业务定标和再定标的偏差结果。以CH4为例，表3给出了VIRR CH4逐月的昼、夜偏差以及昼、夜定标偏差的差值的具体数值。业务定标结果偏差的昼夜差异较大，白天的定标偏差明显大于夜间，昼夜偏差的差异在冬季普遍达到了0.35 K以上冬季昼夜差异较大，2018年的1月、11月和12月的SNO匹配样本中，白天和夜间的业务定标偏差之差分别达到-0.38 K、-0.412 K和-0.436；对数据进行再定标修正后，冬季3个月的偏

差的昼夜差异分别为-0.038、-0.047和-0.099 K，昼夜差异均小于0.1 K，说明再定标模型对冬季昼夜偏差的差异改进效果非常明显。在偏差的季节变化方面，2018年逐月的白天匹配样本统计结果中，偏差最大月份与偏差最小月份分别是12月和6月，之间差异达到0.665 K；修正后的结果中，全年偏差最大月份与偏差最小月份的差异在0.2 K左右，说明随着该模型对偏差昼夜差异的改进，偏差的季节变化尤其是白天数据的偏差季节变化也得到了明显的改进。

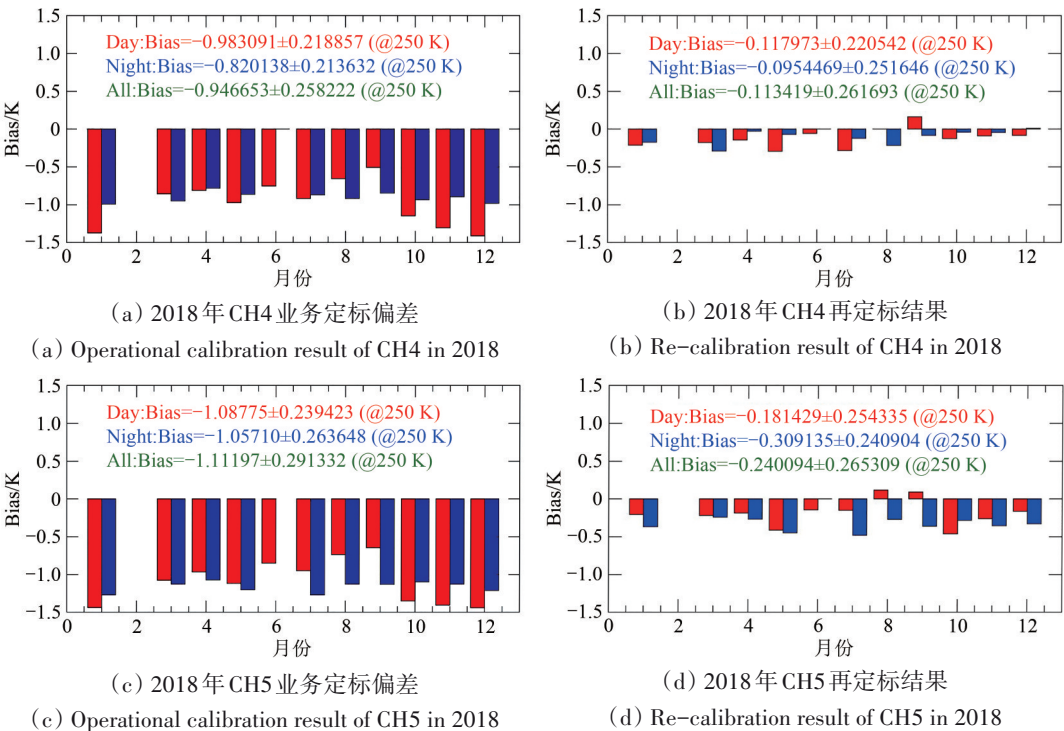


图4 FY-3C/VIRR 红外CH4和CH5 2018年业务定标与再定标模型的偏差
Fig. 4 The TBB bias of operational calibration result and re-calibration result between FY-3C/VIRR CH4 and CH5

表3 FY-3C/VIRR 红外4通道2018年业务定标与再定标的偏差统计
Table 3 The TBB bias of operational calibration result and re-calibration result between FY-3C/VIRR CH4 vs. IASI in 2018

月份	业务定标偏差/K			再定标偏差/K		
	昼	夜	昼-夜	昼	夜	昼-夜
1	-1.37482	-0.994556	-0.380	-0.217391	-0.179575	-0.038
3	-0.861303	-0.947673	0.086	-0.182084	-0.285289	0.104
4	-0.811485	-0.790715	-0.021	-0.14404	-0.0334531	-0.111
5	-0.971552	-0.836316	-0.135	-0.293586	-0.0370063	-0.257
6	-0.751601			-0.0564117		
7	-0.916913	-0.890292	-0.027	-0.283539	-0.136137	-0.147
8	-0.656053	-0.944423	0.288	-0.238374	-0.0500977	-0.188
9	-0.507288	-0.902747	0.395	0.163704	-0.142202	0.306
10	-1.15883	-0.936248	-0.223	-0.133905	-0.0454593	-0.088
11	-1.30609	-0.894455	-0.412	-0.0901082	-0.0433185	-0.047
12	-1.41668	-0.981047	-0.436	-0.0863142	0.0131231	-0.099

为了进一步检验该精细化模型的定标精度和模型的适用性,本文以另一个国际公认的红外高光谱探测器 Metop-A/IASI 为参考仪器,对再定标模型的定标偏差进行评估。图5为评价结果。由图5可见,再定标模型不仅对业务定标的系统性偏差

进行了修正,对于昼夜偏差的不一致性和偏差的季节变特征也进行了较好的修正。昼、夜定标偏差的长时间序列比较稳定,业务定标偏差中,冬季出现的较大的昼、夜定标差异也得到了很好的修正。

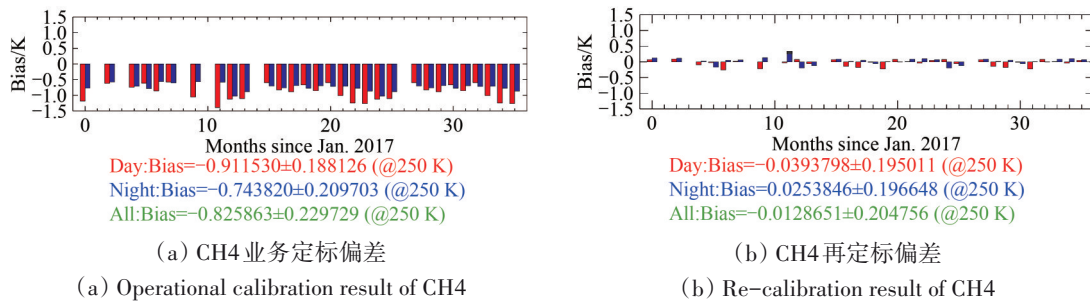


图5 FY-3C/VIRR 红外CH4通道业务定标与再定标偏差的长时间序列结果蓝

(蓝色:夜间匹配数据;红色:白天匹配数据,参考仪器为 Metop-A/IASI)

Fig. 5 The time series of TBB bias between FY-3C/VIRR and Metop-A/IASI (Blue: samples at night; red: samples in day; green: all collection samples, reference instruments is Metop-A/IASI)

5 结 论

本文分析了FY-3C/VIRR红外通道的业务定标模型和偏差规律。以IASI为参考辐射, FY-3C/VIRR热红外通道的业务定标存在明显的系统性偏差,同时定标偏差也存在明显白天和夜晚差异,尤其在冬季,白天的偏差明显大于夜晚,另外偏差存在季节波动特征,冬季的偏差明显大于夏季。

通过对FY-3C/VIRR红外通道偏差的特征分析,发现FY-3C/VIRR红外通道的定标偏差主要是来源两个原因,一是业务的定标模型采用线性定标加非线性能量修正的方式;二是星上黑体辐射计算中对黑体发射率不为1所产生的反射环境辐射部分的考虑不周所引起的差异,从而出现偏差的非线性特征以及偏差的昼夜差异和季节变化特征。

针对FY-3C/VIRR热红外通道的偏差现象,本文对业务定标模型的进行深入细致分析,重构了星上黑体定标模型。该模型基于二次拟合的定标方案,采用VIRR和参考载荷IASI的SNO匹配数据,确定了定标模型的常数项和二次项系数;并使用IASI的参考辐射和二次定标模型,对定标时刻星上黑体的路径辐射进行了模型构建,以星上黑体的物理温度作为环境辐射的代理数据,分析黑体温度偏差与黑体物理温度的关系,进而构建星上黑体路径辐射模型,并基于SNO匹配数据确定模型参数。

本文再定标模型应用于FY-3C/VIRR热红外通道中,对2017年—2019年的FY-3C/VIRR热红外通道的观测数据进行再定标示范,以IASI为参考仪器采用GSICS LEO-LEO方法的定标精度评估,评估结果表明,该再定标模型对VIRR热红外通道的系统性偏差、偏差的昼夜差异和季节性波动均有明显的修正效果,月平均偏差均在 ± 0.3 K以内;以2018年为例,冬季昼夜差异由业务定标的0.4 K左右减小至小于0.1 K;白天偏差最大与最小月份之差由业务定标的0.6 K以上波动减小至0.2 K。由此可见,本研究开发的在定标模型值得进一步推广和应用到更长序列和多个遥感器的历史再定标处理。

参考文献(Reference)

- Aumann H H, Pagano T S. Using AIRS and IASI data to evaluate absolute radiometric accuracy and stability for climate applications. Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization IV: Readiness for GEOSS II. SPIE, 2008, 7085: 16-20.
- Blumstein D, Chalon G, Carlier T, Buil C, Hebert P, Maciaszek T, Ponce G, Phulpin T, Tournier B and Simeoni D. 2004. IASI instrument: technical overview and measured performances. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004, 5543[DOI:10.1117/12.560907]
- Blumstein D, Tournier B, Cayla F R, Phulpin T, Fjortoft R, Buil C and Ponce G. 2007. In-flight performance of the infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) on METOP-A//Proceedings Vol-

- ume 6684, Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization III: Readiness for GEOSS. San Diego: SPIE: 103-114 [DOI: 10.1117/12.734162]
- Brown J W, Brown O B and Evans R H. 1993. Calibration of advanced very high resolution radiometer infrared channels: a new approach to nonlinear correction. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C10): 18257-18268 [DOI: 10.1029/93JC01638]
- Cao C Y, Sullivan J, Maturi E and Sapper J. 2004. The effect of orbit drift on the calibration of the 3.7 μ m channel of the AVHRR on-board NOAA-14 and its impact on night-time sea surface temperature retrievals. *International Journal of Remote Sensing*, 25(5): 975-986 [DOI: 10.1080/0143116031000095899]
- Cao C Y, Weinreb M and Sullivan J. 2001. Solar contamination effects on the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer (AVHRR). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D24): 33463-33469 [DOI: 10.1029/2001jd001051]
- Cao C Y, Wang W, Blonski S and Zhang, B. 2017. Radiometric traceability diagnosis and bias correction for the Suomi NPP VIIRS long-wave infrared channels during blackbody unsteady states. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(10), 5285-5297 [DOI: 10.1002/2017JD026590]
- Chang T J, Wu X Q and Weng F Z. 2017. Modeling thermal emissive bands radiometric calibration impact with application to AVHRR. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(5): 2831-2843 [DOI: 10.1002/2016JD025601]
- Larar A M, Smith W L, Zhou D K, Liu X, Revercomb H, Taylor J P, Newman S M and Schlüssel P. 2010. IASI spectral radiance validation inter-comparisons: case study assessment from the JAIVEx field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2): 411-430 [DOI: 10.5194/acp-10-411-2010]
- McIntire J, Moyer D, Oudrari H and Xiong X X. 2019. Pre-launch radiometric characterization of JPSS-2 VIIRS thermal emissive bands. *Remote Sensing*, 11(6): 732 [DOI: 10.3390/rs11060732]
- Mittaz J and Harris A. 2011. A physical method for the calibration of the AVHRR/3 thermal IR channels. Part II: an in-orbit comparison of the AVHRR longwave thermal IR channels on board *MetOp-A* with IASI. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(9): 1072-1087 [DOI: 10.1175/2011JTECHA1517.1]
- Mittaz J P D, Harris A R and Sullivan J T. 2009. A physical method for the calibration of the AVHRR/3 thermal IR channels I: the pre-launch calibration data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(5): 996-1019 [DOI: 10.1175/2008JTECHO636.1]
- Niu X H, Zhou J G, Chen S S, Wang X H, Ding L and Hu X Q. 2015. Simulation and suppression of solar on-orbit pollution of FY-3/MERSI onboard blackbody. *Optics and Precision Engineering*, 23(7): 1822-1828 (钮新华, 周巨广, 陈帅帅, 王向华, 丁雷, 胡秀清. 2015. FY-3/中分辨率光谱成像仪星上黑体的在轨太阳污染模拟与抑制. *光学精密工程*, 23(7): 1822-1828) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1822]
- Walton C C, Sullivan J T, Rao C R N and Weinreb M P. 1998. Corrections for detector nonlinearities and calibration inconsistencies of the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2): 3323-3337 [DOI: 10.1029/97jc02018]
- Weinreb M P, Hamilton G, Brown S and Koczor R J. 1990. Nonlinearity corrections in calibration of advanced very high resolution radiometer infrared channels. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C5): 7381-7388 [DOI: 10.1029/JC095iC05p07381]
- Wu A, Wang Z, Li Y, Madhavan S, Wenny B N, Chen N and Xiong X. 2014. Adjusting Aqua MODIS TEB nonlinear calibration coefficients using iterative solution. *Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III* (Vol. 9264, pp. 156-166). SPIE [DOI:10.1117/12.2069246]
- Xiong X, Chiang K, Chen N, Xiong S, Barnes W L and Guenther B. 2006. Results and lessons from MODIS thermal emissive bands calibration: pre-launch to on-orbit//*Proceedings Volume 6296, Earth Observing Systems XI*. San Diego: SPIE: 85-96 [DOI: 10.1117/12.680992]
- Xu H L, Hu X Q, Xu N and Min M. 2015. Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR. *Optics and Precision Engineering*, 23(7): 1874-1879 (徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 闵敏. 2015. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的识别和修正. *光学精密工程*, 23(7): 1874-1879) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1874]
- Xu N, Chen L, Hu X Q, Zhang L Y and Zhang P. 2014. Assessment and correction of on-orbit radiometric calibration for FY-3 VIRR thermal infrared channels. *Remote Sensing*, 6(4): 2884-2897 [DOI: 10.3390/rs6042884]
- Xu N, Niu X H, Hu X Q, Wang X H, Wu R H, Chen S S, Chen L, Sun L, Ding L and Zhang, P. 2018. Prelaunch calibration and radiometric performance of the advanced MERSI II on FengYun-3D. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 56(8), 4866-4875
- Yang J and Dong C H. 2011. *Products and Applications of New Generation Fengyun Polar-Orbit Meteorological Satellites*. Beijing: Science Press: 44 (杨军, 董超华. 2011. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用. 北京: 科学出版社: 44)
- Zhao Y H, Wang H, Li Y F, Li Y and Zhang X Q. 2021. Research on high-precision radiation calibration technology of long-wave infrared space optical remote sensor. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1646-1654 (赵艳华, 王浩, 李云飞, 李岩, 张秀茜. 2021. 长波红外空间光学遥感器高精度辐射定标技术. *遥感学报*, 25(8): 1646-1654) [DOI: 10.11834/jrs.20211225]
- Zhu J B, Hu X Q, Yang L K, Xu H L, Xu N and Zhang P. 2021. Study on the correction of sunlight pollution in mid-infrared image of FY-3C/VIRR. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(3): 803-815 (朱吉彪, 胡秀清, 杨磊库, 徐寒列, 徐娜, 张鹏. 2021. FY-3C/VIRR 中红外图像太阳光污染订正. *遥感学报*, 25(3): 803-815) [DOI: 10.11834/jrs.20209474]

Construction and validation of FY-3C/VIRR infrared window channel refinement re-calibration model

XU Hanlie, HU Xiuqing, XU Na, ZHANG Liyang, QI Chengli

1. National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

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

3. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China

Abstract: FY-3 visible infrared scanning radiometer (FY-3/VIRR) has provided Earth-observation data in orbit for more than 10 years since the launch of FY-3A in 2008. These data are important for atmospheric, surface, and environmental product inversion, weather, and climate change research. In this study, the calibration bias characteristics of FY-3/VIRR thermal infrared channel were analyzed, and the main sources of error were preliminarily identified in combination with the operational calibration model in day-night difference and seasonal variation of the operational calibration bias. In addition, the on-board calibration model and the on-board blackbody radiation model were optimized to construct the fine re-calibration model of the thermal infrared channel. In the linear calibration model plus nonlinear correction adopted by the FY-3/VIRR infrared channel, the quadratic term is related to the calibrated blackbody radiation. When the satellite is in orbit, the temperature change of the blackbody causes change in the quadratic term coefficient. As a result, the shape of the quadratic response of the infrared channel is changed. When the blackbody temperature changes, the quadratic term coefficient is changed, thereby introducing calibration deviation. In addition, the blackbody radiation on the infrared channel is calculated using the equivalent brightness temperature coefficient of the blackbody obtained from the pre-launch test. In fact, the radiation in the blackbody observation path is reflected in a set of polynomial fitting coefficients. This fitting process is based on the pre-launch vacuum test, and the on-orbit application results in calibration deviation. The FY-3/VIRR re-calibration model of thermal infrared channel directly uses quadratic calibration equation for on-board calibration model and considers the influence of instrument environmental radiation. The blackbody radiation model on the planet is reconstructed by considering the blackbody temperature as the proxy ambient temperature given that traditional instruments lack temperature measurement points on the planet. Based on the matching samples of Simultaneous Nadir Observation (SNO) recommended by GSICS, The parameters of the refined re-calibration model were determined using the internationally recognized high-precision Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) as the reference instrument. The results show that the refined re-calibration model has a significant correction effect on the systematic deviation, diurnal difference, and seasonal variation of the operational calibration model, and the monthly mean deviation is within $\pm 0.3\text{K}$ after re-calibration using the refined re-calibration model. In 2018, for example, the difference between day and night in winter decreased from approximately 0.4 K of the service calibration to less than 0.1 K.

Key words: Visible and Infra-Red Radiometer (VIRR), Infrared calibration, on-board calibration, refinement calibration model, re-calibration, onboard blackbody radiance model

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42001312); National Basic Research Program (No.2018YFB0504900, 2018YFB0504901)