

# 风云二号卫星水汽波段在轨辐射定标新方法

郭强, 陈博洋, 杨昌军, 冯绚

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:**将月球作为热发射波段定标参考源,在无需月表发射率和温度信息条件下,通过引入 UDER 参数,建立了不同热发射波段观测辐射亮度间定量关系,并导出了新的波段间交叉定标方法.同时,利用 FY-2E 卫星多波段月球观测结果,以辐射精度较高的热红外波段为基准,在无星载全光路黑体情况下,初步实现了水汽波段在轨高精度辐射定标,且在 200~220 K 低温区内的定标精度平均提高约 3.5 K,并显著改善了云分类等定量产品的性能.

**关键词:**月球观测;在轨定标;水汽波段;UDER

**中图分类号:**P414.4 **文献标识码:**A

## On-orbit radiometric calibration for water-vapor band of FY-2 satellite

GUO Qiang, CHEN Bo-Yang, YANG Chang-Jun, FENG Xuan

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** With the Moon as a reference source for thermal emissive band (TEB) calibration without any knowledge of lunar surface's emissivity or temperature, the quantitative relationship of the measured radiances between different TEBs is established by introducing the parameter universal dual-band emissivity ratio (UDER). This was further used to deduce a novel cross-calibration approach between different bands. Meanwhile, selecting the thermal infrared band with the highest radiometric accuracy as a baseline, the on-orbit radiometric calibration for water-vapor band of FY-2E satellite is realized by using multi-bands lunar observations without any space-borne full-path blackbody. The radiometric calibration accuracy has been improved by about 3.5 K in the lower temperature region between 200K and 220 K, which is great benefits to the enhancement of some quantitative products significantly, i. e. cloud classification.

**Key words:** lunar observation; on-orbit calibration; water-vapor band; UDER

**PACS:** 06.20.fb

## 引言

风云二号(FY-2)是我国目前在轨业务运行的静止气象卫星,其主载荷——多通道扫描辐射计(MCSR)中唯一的大气吸收谱段,水汽波段(6.3~7.6  $\mu\text{m}$ )观测资料已在云分类、云导风、降水估计、强对流跟踪等气象应用中发挥了不可替代的作用.受早期研制水平所限,MCSR 仅在后光路中引入单个参考黑体,无法实现在轨全光路、全口径绝对辐射定标.迄今为止,FY-2 卫星业务应用中只能利用交叉、比对等替代方法来实现在轨辐射定标.

在 FY-2 替代定标中,对于窗区波段,可通过与

辐射精度较高的宽波段(如 NOAA 卫星 AVHRR 资料)或高光谱(如 GSICS 推荐的 AIRS、IASI 资料<sup>[1]</sup>)观测数据的交叉比较,或者通过与对大洋浮标<sup>[2]</sup>等特定目标实测结果的比对来实现;对于吸收波段,一般选择光谱分辨率较高的 HIRS、AIRS、IASI 等观测数据来实现在轨交叉定标<sup>[1,3-4]</sup>.现有高光谱资料的空间分辨率都相对较低(12~19 km),且交叉定标往往需要至少  $3 \times 3$  像元尺度上的理想均匀目标.然而,寻找  $10^3 \text{ km}^2$  量级均匀目标对于吸收波段内的低温目标而言,几乎是不可实现的.因而,目前 FY-2 卫星水汽波段的辐射定标性能,特别是在低温端有待进一步提高.

收稿日期:2011-09-09,修回日期:2012-03-15

基金项目:国家自然科学基金(40971200,41075019)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (40971200, 41075019)

作者简介(Biography):郭强(1975-),男,福建福州人,研究员,主要研究方向为气象卫星辐射定标、光谱定标及地理定位. E-mail: guoqiang@cma.gov.cn.

Received date: 2011-09-09, revised date: 2012-03-15

作为距离地球最近的自然天体,月球的光度稳定度达到  $10^{-9}$ /年,且在反射和辐射波段内均可视为被均匀的低辐射目标(冷空间)所包围,因此,月球被广泛认为是一个潜在理想的外定标参考源<sup>[5]</sup>. 在 ROLO 计划地基观测结果支持下,SeaWiFs、MODIS 等仪器实现了  $2.5 \mu\text{m}$  以下反射波段辐射定标. 相对应的,如何利用月球观测数据来实现  $2.5 \mu\text{m}$  以上发射波段的在轨辐射定标,则鲜见报道. 由于月球在观测波段上的发射率和随太阳光照剧烈变化的表面温度等信息无法预先获知,因而,基于传统黑体定标方法无法满足对月定标需求.

本文将提出以月球为外定标源,利用 MCSR 多波段在轨月球观测结果,以辐射精度较高的热红外波段(IR1,  $10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$ )为基准,通过引入新定义的普适双波段发射率比(Universal Dual-band Emissivity Ratio, UDER)参数,在无需额外的月球表面发射率和温度信息的条件下,建立 FY-2 卫星水汽波段在轨辐射定标方法,改进低温端辐射定标性能.

## 1 基于月球观测的水汽波段辐射定标方法

### 1.1 UDER 参数定义

在热发射波段遥感应用中,像元尺度上仪器瞬时视场内观测到的月球辐亮度  $I_\lambda$  满足<sup>[6]</sup>:

$$I_\lambda = \varepsilon_\lambda B_\lambda(T_s), \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_\lambda$ 、 $T_s$ 、 $B_\lambda(T_s)$  分别代表特定波长上月球表面发射率、温度以及普朗克函数,且  $\varepsilon_\lambda$  将随目标在月球表面的位置及观测相位角变化<sup>[7]</sup>. 考虑仪器特定波段  $i$  上光谱响应函数( $f_i(\lambda)$ )对入射目标辐亮度的影响后,式(1)可改写为:

$$I_i = \varepsilon_i \frac{\int f_i(\lambda) B_\lambda(T_s) d\lambda}{\int f_i(\lambda) d\lambda}. \quad (2)$$

同时,假定  $B_i(T_s)$  满足如下近似关系,即

$$B_i(T_s) \cong \frac{p_i}{(q_i)^{\frac{1}{T_s}}}, \quad (3)$$

式中,  $p_i$ 、 $q_i$  是与特定波段及其光谱响应函数相关的常数,可由最小二乘方法拟合得到. 将式(3)代入式(2)可得

$$I_s \cong \varepsilon_i \frac{p_i}{(q_i)^{\frac{1}{T_s}}}. \quad (4)$$

对于满足式(4)辐亮度关系的两个不同的热发射波段  $i, j$ ,可进一步定义 UDER 参数如下:

$$\text{UDER}_{ij} = \prod_{k \in \{i, j\}} \varepsilon_k^{a_k} = \frac{\prod_k^{a_k}}{p_k^{a_k}}, \text{其中 } \sum_{k \in \{i, j\}} a_k \ln(q_k) = 0, \quad (5)$$

式中,系数比  $\frac{a_i}{a_j}$  由常数  $q_k$ ,  $k \in \{i, j\}$  完全确定.

### 1.2 基于 UDER 参数的水汽波段辐射定标

根据 FY-2 卫星在轨月球观测实际情况,这里假定月球表面两个相邻瞬时视场内的目标(记为  $m$  和  $n$ )辐射特性均匀,且此时二者间的观测相位角相对变化仅为约  $0.008^\circ$ ,完全可以忽略,则对于 IR1 和 WV 波段上的 UDER 参数,有如下关系成立:

$$\text{UDER}_{\text{IR1}, \text{WV}@m} \cong \text{UDER}_{\text{IR1}, \text{WV}@n}. \quad (6)$$

为了讨论问题的方便,这里将位置  $m$  和  $n$  上 IR1 和 WV 波段内的观测值分别记为  $m_{\text{IR1}}$ 、 $m_{\text{WV}}$ 、 $n_{\text{IR1}}$  和  $n_{\text{WV}}$ ,则式(6)可改写为:

$$I_{\text{WV}}(m_{\text{WV}}) = K \cdot I_{\text{WV}}(n_{\text{WV}}), \quad (7-1)$$

$$K = \left[ \frac{I_{\text{IR1}}(n_{\text{IR1}})}{I_{\text{IR1}}(m_{\text{IR1}})} \right]^{\frac{a_{\text{IR1}}}{a_{\text{WV}}}}. \quad (7-2)$$

不失一般性,这里假定待标定的 FY-2 卫星 WV 波段定标方程含有非线性项,且满足:

$$I_{\text{WV}}(u_{\text{WV}}) = \sum_{k=0}^2 c_k (u_{\text{WV}})^k, \quad (8)$$

式中,  $u$  代表观测计数值. 将式(8)代入式(7),则

$$\sum_{k=0}^2 [(m_{\text{WV}})^k - K(n_{\text{WV}})^k] c_k = (K-1)c_0, \quad (9)$$

式中,  $c_0$  表示 WV 波段最小可探测亮温对应的辐亮度值,可结合卫星发射前实验室定标结果和仪器在轨工况来确定,  $c_1$ 、 $c_2$  分别为待定的 WV 波段线性项和非线性项定标系数.

## 2 定标方法的真实性检验与初步定标结果

### 2.1 UDER 参数的真实性检验

本文提出的 FY-2 卫星水汽波段辐射定标方法的关键,是假定月球表面相邻目标 UDER 参数值相等,为此,这里将分别对式(3)和式(7)中的两个近似过程做必要的真实性检验.

表1给出了在构造 FY-2E 卫星 IR1 和 WV 波段 UDER 参数中,用目标表面温度的幂函数来近似代替普朗克函数时,生成的常系数  $p$ 、 $q$  及其引入的亮温误差. 结果表明,在 IR1 和 WV 波段整个动态范围内,式(3)所示近似过程引入的亮温误差均方根值不超过  $0.05 \text{ K}$ ,最大  $0.29 \text{ K}$ ,且对 WV 波段而言近似误差更小. 显然,上述近似对于 WV 波段  $1 \text{ K}$  定标精度需求而言是完全可以接受的.

表 1 FY-2E 卫星 IR1 和 WV 波段辐亮度近似性能  
Table 1 The performance of approximated radiance for IR1 and WV bands of FY-2E satellite

Band	$\lambda/\mu\text{m}$	Dynamic Range/K	$p_i$	$\ln(q_i)$	$\Delta(T_s)_{\text{rms}}/\text{K}$	$\Delta(T_s)_{\text{max}}/\text{K}$
IR1	10.3 ~ 11.3	180 ~ 330	25.7098	1333.2332	0.05	0.29
WV	6.3 ~ 7.6	190 ~ 300	220.9187	2064.3157	0.02	0.09

图 1 给出了 2008 年 7 月 6 日 FY-2E 卫星实验室定标中,当  $a_{\text{IR1}}$  取常数 1 时,  $\text{UDER}_{\text{IR1,WV}}$  计算值(由精确辐亮度和参数  $p$  计算得到)随目标黑体温度变化曲线. 经测定,目标黑体的发射率优于 0.999, 则  $\text{UDER}_{\text{IR1,WV}}$  理论值(由黑体发射率计算得到,如图 1 中红色粗实线所示)应为 0.9996. 由图 1 不难看出,当目标黑体温度从 175 K 变化到 300 K 时,  $\text{UDER}_{\text{IR1,WV}}$  计算值间的相对误差小于 2‰,且与理论值间的相对误差优于 1.6‰. 验证结果显示,在构造 UDER 参数时引入的误差,将引起约 1 ~ 2‰ 的目标辐亮度估计误差,这对于目前的水汽定标应用同样是可接受的. 同时,图 1 结果也进一步表明,在 190 ~ 220 K 的低温端,UDER 参数计算值与理论值更为接近,这为提高 WV 波段低温端定标精度提供了可能.

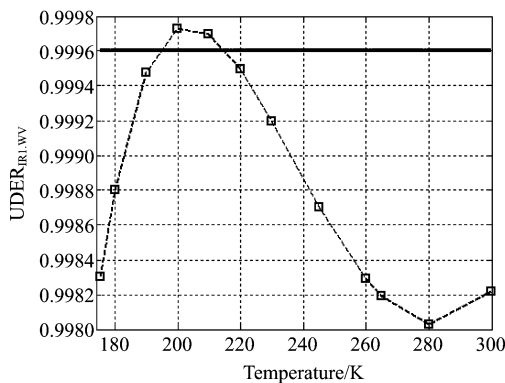


图 1 2008 年 7 月 6 日 FY-2E 卫星实验室定标中  $\text{UDER}_{\text{IR1,WV}}$  随目标黑体温度变化曲线

Fig. 1  $\text{UDER}_{\text{IR1,WV}}$  vs. blackbody's temperature from in-lab calibration of FY-2E satellite in July 6, 2008

## 2.2 FY-2E 卫星水汽波段辐射定标结果

图 2 给出了 2011 年 6 月 11 日 UTC0000 时次 FY-2E 卫星在轨月球观测个例及 WV 波段定标结果. 从计数值与辐亮度的散点图(如图 2(c)所示)中不难看出,定标结果在低温端的相关性明显优于高温端,这使得回归后的 WV 定标结果在低温端的辐射精度更为可靠,佐证了 2.1 节中的推论. 同时,

图 3 给出了 FY-2E 卫星在 2011 年上半年间基于月球观测的 WV 波段定标结果中,定标斜率随辐射制冷功率变化的曲线(注:二级冷块保持在 93.6 K).

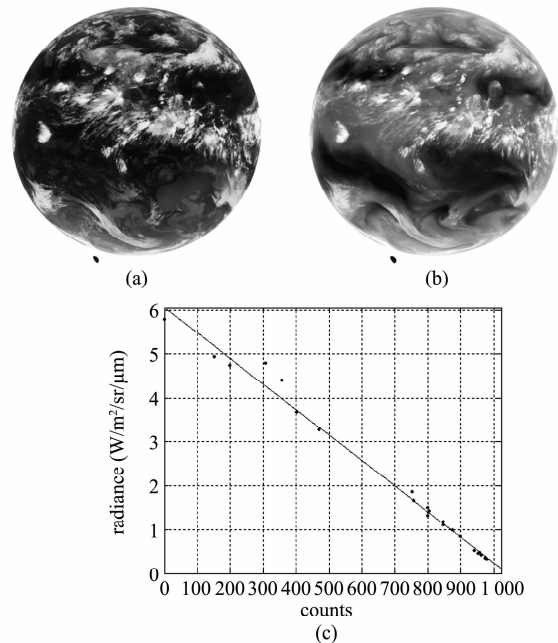


图 2 FY-2E 卫星在轨月球观测个例(2011 年 6 月 11 日 UTC0000)及 WV 波段定标结果 (a)IR1 图像, (b)WV 图像, (c)WV 定标结果

Fig. 2 On-orbit lunar observation example of FY-2E satellite at UTC0000 June 11, 2011 and calibration results of WV band (a) IR1 image, (b) WV image, and (c) calibration results of WV band

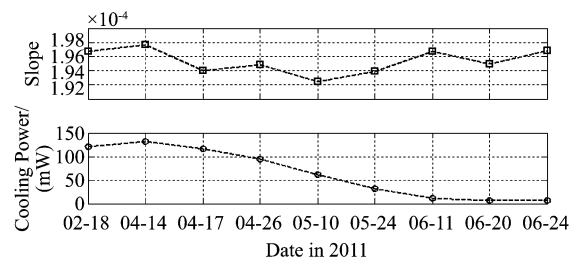


图 3 FY-2E 卫星 2011 年上半年基于月球观测的 WV 定标结果中斜率随制冷功率变化

Fig. 3 Slope of WV band calibration results vs. cooling power during the first half year of 2011 for FY-2E satellite

需要说明的是,与 IR1 波段不同,WV 波段的探测性能并不是在制冷温度越低或制冷量越大时探测性能越好,这恰恰解释了图 3 中 WV 定标斜率在制冷功率约 60 mW 时达到最佳(斜率最小)的原因. 总的来说,FY-2E 卫星 WV 波段在 2011 年上半年的定标结果还是相当稳定的,定标斜率的最大相对变化不超过 5%.

### 3 定标结果分析及对定量产品性能的改进

#### 3.1 利用高云目标 IR1 和 WV 波段间亮温关系检验

图 4 给出了 FY-2E 卫星 2011 年 5 月 10 日 UTC2300 时次典型高云区域目标,图 4(a)中红色框区域内 IR1 和 WV 波段不同定标表条件下(注:业务定标标记为 OC,月球观测定标标记为 LC)亮温比较.从理论上来说,对于亮温介于 200 ~ 220 K 间的低温高云目标而言,由于此时云高已接近甚至超过对流层顶,因而水汽吸收对 IR1 和 WV 波段探测辐射的影响都可以忽略,则此时二者间的亮温差应该在 2 K 以内<sup>[8]</sup>.为此,这里随机选取了上述高云区域内的 6 个观测目标,在不同定标表下分别计算了 IR1 和 WV 波段的亮温值,如表 2 所示.显然,相对于 WV 波段的 OC 定标结果,WV 波段的 LC 定标结果使得 WV 与 IR1 间的亮温差平均值由 4.770 K 降至 1.295 K,定标性能提高了约 3.5 K,且二者亮温差值分布符合理论分析结果.

表 1 FY-2E 卫星 2011 年 5 月 10 日 UTC2300 时次典型高云目标不同定标结果下 IR1 与 WV 波段亮温比较

Table 1 BT comparisons between IR1 and WV bands with different calibration results for a typical high cloud targets zoom at UTC2300 May 10, 2011

Position	(1281,803)	(1280,746)	(1241,808)	(1267,804)	(1218,792)	(1293,761)
BT <sub>IR1_OC</sub> /K	212.117	214.109	214.434	211.435	217.007	213.454
BT <sub>WV_OC</sub> /K	217.090	219.131	217.989	216.791	220.770	219.407
BT <sub>WV_LC</sub> /K	213.596	215.665	214.501	213.288	217.327	215.948
BT <sub>WV_OC</sub> -BT <sub>IR1</sub> /K	4.973	5.022	3.555	5.356	3.763	5.953
BT <sub>WV_LC</sub> -BT <sub>IR1</sub> /K	1.479	1.556	0.067	1.853	0.320	2.494
Mean of(BT <sub>WV_OC</sub> -BT <sub>IR1</sub> )/K				4.770		
Mean of(BT <sub>WV_LC</sub> -BT <sub>IR1</sub> )/K				1.295		

#### 3.2 WV 波段定标结果对 FY-2E 卫星云分类产品性

这里选择了 FY-2E 卫星 2010 年 1 月 15 日 UTC0300 时次观测数据,分别采用 OC 和 LC 方法确定的 WV 波段定标结果生成了不同的云分类产品,如图 5(d)和(e)所示,详细的产品算法说明可在 <http://satellite.cma.gov.cn/> 上查阅.显而易见,采用 LC WV 定标结果后,高云,尤其是对积雨云(图中标识为黄色)的判识和分类结果明显改善,这将在很大程度上提高对强对流天气系统的预报、分析及应用服务水平.

### 4 关于定标方法的几点讨论

本节将简要讨论基于月球观测的 WV 波段辐射定标实现中的几个问题:

(1)关于月球表面目标在热发射波段上视为理

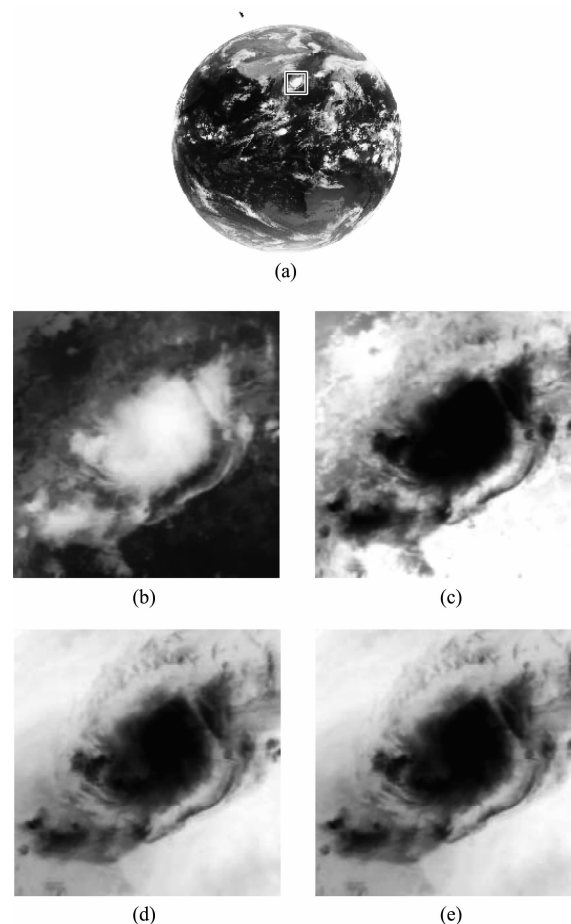


图 4 FY-2E 卫星 2011 年 5 月 10 日 UTC2300 时次典型高云区域目标 IR1 和 WV 波段亮温比较 (a) IR1 全圆盘图, (b) IR1 高云区图像, (c) IR1 高云区亮温分布, (d) WV 高云区 OC 亮温分布, (e) WV 高云区 LC 亮温分布

Fig. 4 Comparison of BTs in IR1 and WV bands for a typical high cloud target zoom at UTC2300 May 10, 2011 (a) raw IR1 image, (b) typical high cloud targets in IR1 image, (c) BT distribution of (b) in IR1 band, (d) BT distribution of (b) in WV band with OC, (e) BT distribution of (b) in WV band with LC

#### 想朗伯体的适用性问题

由于月球表面结构复杂多变,且在现有对地观测仪器角分辨率条件下,以 FY-2 卫星为例,观测月面目标时的实际分辨率约为 50 km,像元尺度内辐射特性完全均匀且同温的目标并不总是存在,这也正是实际定标中出现局部异常点的主要原因.基本的解决方法可在精确获取观测几何信息(含卫星轨道和观测指向)基础上,实现对月面目标的精确定位,并结合已有的月面地形信息,剔除明显不均匀的目标,减小尺度效应对定标性能的影响.

(2)基于月球观测的波段间交叉定标方法对其他热发射波段的普适性问题

本文从 FY-2 卫星定量应用对高质量在轨定标

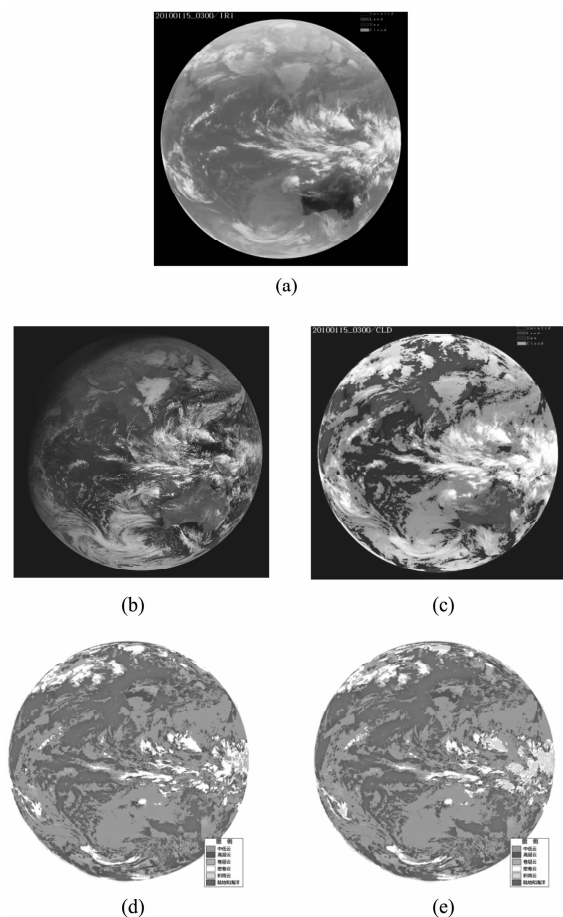


图5 WV 波段 LC 定标结果对 FY-2E 卫星云分类产品性能的改进(a)IR1 图像, (b)可见光图像, (c)云检测产品, (d)OC WV 定标表下云分类产品, (e)LC WV 定标下云分类产品

Fig.5 The improved performance of FY-2E cloud classification product (CLC) due to WV calibration results based on LC method (a)IR1 image, (b)VIS image, (c) Cloud detection product, (d) CLC with OC for WV band, (e) CLC with LC for WV band

性能的迫切需求出发,以多波段月球观测数据为基础,提出了不同热发射波段间新的交叉定标方法,初步解决了 FY-2 卫星非窗区水汽波段的在轨辐射定标问题.从原理上来说,该方法的基本思路完全适用于其他热发射波段,如热红外分裂窗、中红外等,但由于不同波段  $c_0$  值的在轨选取及波段间配准等技术实现途径存在显著差异,因此,相关研究工作尚在

进行中.

## 5 结论

将月球目标视为外定标参考源,利用 FY-2 卫星多波段在轨月球观测结果,通过新定义的 UDER 参数,建立了不同热发射波段对同一目标观测辐亮度间的定量关系.同时,以辐射精度较高的 IR1 波段为基准,在无需额外月球表面发射率和温度信息的条件下,提出了不同热发射波段间的交叉定标方法,初步解决了 FY-2 卫星无星上全光路黑体情况下水汽波段的在轨辐射定标,且低温端辐射定标精度平均提高 3.5 K 以上,并显著改善了云分类等定量产品的性能.目前,相关业务化工作正在进行中.

## REFERENCES

- [1] Yoshihiko T. New approach to inter-calibration using high spectral resolution sounder [J]. *Meteo. Sat. Center Tech. Note*, 2008, **50**:1-14.
- [2] ZHANG Yong, LI Yuan, RONG Zhi-Guo, *et al.* Absolute radiometric calibration of FY-2C infrared split-window channels by using sea buoy data and NCEP reanalysis data [J]. *J. of Infrared Millim. Waves* (张勇,李元,戎志国,等.利用大洋浮标数据和 NCEP 再分析资料对 FY-2C 红外分裂窗通道的绝对辐射定标, *红外与毫米波学报*)2009, **28**(3):188-193.
- [3] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, WANG Yu-Hua, *et al.* Calibration method for water-vapor channel of scanning-radiometer carried by FY-2B satellite [J]. *J. of Infrared Millim. Waves* (戎志国,张玉香,王玉花,等.风云二号 B 星星载扫描辐射计水汽通道定标方法, *红外与毫米波学报*)2005, **24**(5):357-360.
- [4] Gunshor M M, Timothy J. *et al.* Intercalibration of geostationary and polar orbiting infrared window and water vapor radiances [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2001, **21**(1):61-68.
- [5] Kieffer H H. Establishing the Moon as a spectral radiance standard [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2006, **13**(2):360-374.
- [6] Shaw J A. Modeling infrared lunar radiance [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(10):1763-1764.
- [7] Urquhart M L, Jakosky B M. Lunar thermal emission and remote determination of surface properties [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(E5):10959-10969.
- [8] Li J, Menzel W P, Yang Z D, *et al.* High-spatial-resolution surface and cloud-type classification from MODIS multispectral band measurements [J]. *J. Appl. Meteo.*, 2003, **42**(2):204-226.