

文章编号 1004-924X(2009)12-2966-09

FY-3A 扫描辐射计的可见近红外通道在轨场地定标

李元, 戎志国, 郑照军, 刘京晶, 张立军, 张里阳, 胡秀清, 张勇, 孙凌
(中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 为了对刚刚发射的风云三号 A 星(FY-3A)极轨气象卫星的扫描辐射计(VIRR)进行在轨定标,于 2008 年 9 月在甘肃敦煌进行了中国遥感卫星辐射校正试验。使用 ASD FR 光谱仪测量场地地表反射比,CE318 太阳光度计测量气溶胶光学厚度(AOD),并用敦煌国家气候观象台同步加放的探空观测数据计算水汽总量(TWC),获取了 3 天的有效试验数据。采用反射比基法并配合新的地表反射比修正算法开展定标,其中过境时刻地表反射比由陆表各向异性二向反射比模型算法(AMBRALS)计算并用实测的地表反射比数据修正;表观反射比由 6S 模型计算。结果表明,在非水汽吸收通道计算得到的多天定标斜率很稳定(相对标准差在 2.6%以内)。与发射前相比,不同通道的定标系数在 7.73%~21.52%变化。使用定标结果计算了 23 种观测目标的表观反射比,与 TERRA/MODIS 相应通道结果一致,表明了定标算法的准确性。

关键词: 空间光学;FY-3 扫描辐射计;在轨场地定标;AMBRALS 算法
中图分类号: TP722.4 **文献标识码:** A

Post launch site calibration of visible and near-infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometers

LI Yuan, RONG Zhi-guo, ZHENG Zhao-jun, LIU Jing-jing, ZHANG Li-jun,
ZHANG Li-yang, HU Xiu-qing, ZHANG Yong, SUN Ling

(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to calibrate the Visible and Infrared Radiometer (VIRR) of the Feng Yun 3A (FY-3A) polar orbit meteorological satellite, the China Remote Satellite Radiometric Calibration Experiment was held in September, 2008 at Dun-huang site, Gan-su province, China. By taking an ASD FR spectrometer to measure the vertical reflectance of 11 synchronization points in Dun-huang site, a sun photometer CE318 to measure the Aerosol Optical Depth (AOD) and using the sounding data measured by Dun-huang National Climatic Station synchronously to calculate the Total Water Contents (TWC), the efficient experiment data were totally obtained for 3 days. The calibration was undertaken by combined the reflectance base method with a new reflectance correction method, in which the directional reflectance at the moment of passing a platform was calculated by the Algorithm for Modeling Bidirectional Reflectance Anisotropies of the Land Surface (AMBRALS) and corrected by the reflectance measured from experiments. Moreover, the apparent reflectance was calculated by a 6S model.

收稿日期:2009-01-20;修订日期:2009-02-18.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 40705011;No. 40701118;No. 40606043);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z145)

Obtained results show that the relative standard deviation (RSD) of the calibration coefficients is less than 2.6%. Compared to the pre-launch calibration method, the post-launch calibration has changed about 7.73%~21.52% in different bands. The apparent reflectances of 23 targets by FY-3A/VIRR are compared with that by TERRA/MODIS, which that they are coincident well and proves the calibration algorithm is veracious.

Key words: space optics; FY-3A/VIRR; post launch site calibration; AMBRALS

1 引 言

场地定标是在轨遥感器可见近红外通道定标的主要方法,其精度主要取决于地表反射比二向性描述的准确程度。国际上一般使用大面积均匀的沙漠目标作为定标场,通过对其长时间的连续观测来监视遥感器有关通道的衰减情况。由于获取实测的二向性数据异常困难,常忽略沙漠区域二向性影响,所得到的衰减趋势仅能表征遥感器响应能力的相对变化情况,无法提供绝对定标结果。

中国遥感卫星辐射校正场(敦煌场)具有得天独厚的地理优势,属全球范围内少有的大面积(30 km×30 km)范围内地表均匀、气候干燥(可有效减少水汽吸收对算法的干扰)、交通方便(靠近敦煌市区)的戈壁类型可自恢复场地,可承载机动车运送试验仪器与科考人员进入场地中心区域观测。2008年5月,风云三号极轨气象卫星成功发射;2008年9月,国家卫星气象中心在敦煌校正场首次完成了FY-3A扫描辐射计(VIRR)可见近红外通道在轨场地定标试验。在早前的试验中,通过使用国家卫星气象中心定制的大型(直径为4 m)地表反射比二向性测量架,研究人员已获取了先进的敦煌场 AMBRALS 地表反射比二向性模型。由于 AMBRALS 模型是由固定位置多组方向地表反射比测量数据推导得到的,并不能很好地代表场地上其它位置的二向性;同时 2008年9月在场地上不同位置实测的垂直地表反射比

的平均值也不能真实反映卫星过境时刻观测视角下的方向反射比,因此,如何将已获取的这两组数据有效结合起来,在现有技术水平内最大限度地反映出卫星观测时刻、角度、尺度下的敦煌地表反射比二向性是一项有必要解决的问题。

本文提出了修正地表反射比二向性的新方法。首先计算校正场内不同位置处的实测垂直地表反射比数据与 AMBRALS 模型计算值的比值,然后将不同位置处的比值的平均值作为修正因子,对卫星过境时刻模型计算的方向反射比进行修正,从而实现将模型与数据相结合以综合计算卫星过境时刻的方向地表反射比。为了验证定标方法的准确性,需要比对其它遥感器的定量遥感数据与 VIRR 经场地定标后的遥感数据。文中计算了 FY-3A/VIRR 观测 23 种不同目标的表现反射比,并将之与 TERRA/MODIS 的观测结果进行了比较。

2 定标试验

VIRR 可见近红外通道的场地定标流程图如图 1 所示。在 2008-09-02~2008-09-13 为期 12 天的敦煌同步试验中,完成了地表反射比、气溶胶光学厚度(AOD)、水汽量等多项测量任务,获取了 3 天(2008-09-06、2008-09-10、2008-09-11)有效的大场同步试验数据,其间 FY-3A 均以足够小的观测天顶角过境敦煌。

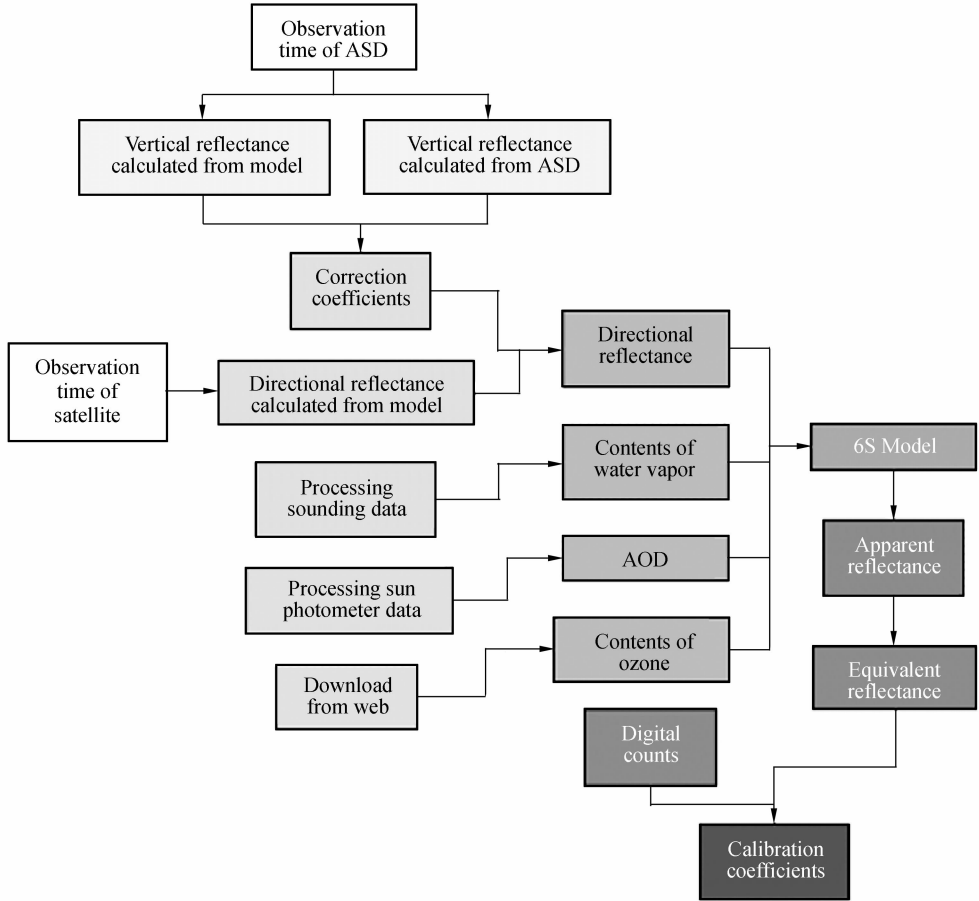


图 1 FY-3A/VIRR 可见近红外通道场地定标流程图

Fig. 1 Flowchart of visible and near-infrared site calibration of FY-3A/VIRR

2.1 地表反射比的测量

场地同步试验时,在敦煌中国遥感卫星辐射校正场上选取 10 km×10 km 大小的试验区域,在区域中设定 11 个同步点(图 2),在卫星过境前后 1 h 内进行同步的地表反射比观测。

地表垂直反射比的实地测量由 ASD FR 野

外光谱仪和标准参考板完成^[1-3],ASD 的观测波段为 350~2 500 nm,主要性能指标见表 1,测量时采用 8°视场镜头。标准参考板由中国科学院安徽光学精密机械研究所生产,在试验前经过二向性校正。测量地表反射比时的照片见图 3。

表 1 ASD FR 野外光谱仪主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of ASD FR spectrometer

Detector	VNIR	SWIR1	SWIR2
Wave length range	350~1 050 nm	900~1 850 nm	1 700~2 500 nm
Component	512 channels Si photoelectricity diode array	InGaAs	InGaAs
Resolution	3 nm(at 700 nm)	10~12 nm	10~12 nm

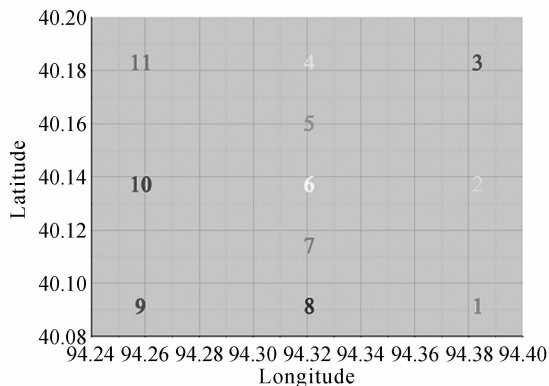


图 2 同步点位置与排列顺序图示

Fig. 2 Position and array order of synchronization points



图 3 2008 年地表反射比测量照片

Fig. 3 Photo of measuring reflectance in 2008

2.2 气溶胶光学厚度的测量

AOD 是由法国 Cimel 公司生产的新一代 10 通道 CE318 自动跟踪太阳光度计测量得到的。CE318 各通道中心波长及带宽如表 2 所示。光度计使用 Langley 法定标,550 nm 处 AOD 按照 Junge 分布计算^[4-5]。

表 2 CE318 各通道中心波长及带宽

Tab. 2 Center wavelength and bandwidth of each band of CE318

Band No.	Center Wavelength/nm	Bandwidth/nm
1	1 020	10
2	11 640	25
3	870	10
4	670	10
5	440	10
6	500	10
7	11 020	10
8	936	10
9	380	2
10	340	2

2.3 水汽量的测量

大气中各层气柱水汽量由敦煌国家气候气象台同步加放的探空观测数据计算,整层大气柱内水汽量用梯形面积叠加求和的方法计算,并忽略对流层外的水汽。水汽压采用当前世界上公认的 Wexler 公式计算^[6-7]。探空施放地点在东经 94°41',北纬 40°09',使用 GFE(L)1 型二次测风雷达和 GTS1 型数字式探空仪进行综合探测。

3 主要实验结果和分析讨论

3.1 场地定标算法

FY-3A/VIRR 的可见近红外通道场地定标算法以反射比基法^[8-10]为主并配合新的地表反射比修正算法开展,过境时刻地表方向反射比由 AMBRALS 算法^[11-12]结合实测地表反射比数据修正得到。

3.1.1 反射比基法

在卫星过境时刻同步测量敦煌校正场的地表反射比、气溶胶光学厚度、水汽含量等参数。测量得到的地表反射比经过二向性修正并代入 6S 模型^[13-14]计算大气层外的表观反射比 $\rho(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 。表观反射比经过太阳天顶角与日地距离修正后,与载荷的输出计数值建立线性关系,得到定标斜率和截距。

斜率计算公式为:

$$S_c = \cos(\theta_s) \frac{r_0^2 \rho(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{r^2 (N_c - N_B)}, \quad (1)$$

其中 S_c 为定标斜率, $\rho(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 为 6S 模型输出的表观反射比, θ_s 为太阳天顶角, ϕ_s 为太阳方位角, θ_v 为卫星天顶角, ϕ_v 为卫星方位角, N_c 为载荷观测敦煌时的输出计数值。 N_B 为载荷观测冷空间或星载黑体时的输出计数值,对应的反射比为 0,等同于载荷的暗电流输出。

3.1.2 地表二向性修正

刘京晶等在 2006 年 8 月进行的中国辐射校正场敦煌场区同步观测试验中,采用简易测量架,通过太阳主平面的测量反演场地的双向反射分布函数(BRDF),构建了 AMBRALS 模型^[9-10]。AMBRALS 模型由两个核函数和 3 个系数组成,如式(2)所示。

$$\rho_{\text{AMBRALS}}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = f_{\text{iso}} + f_{\text{vol}} \text{RossThick} + f_{\text{geo}} \text{LiSparse}, \quad (2)$$

$$A_i(\theta_s) = \frac{\rho_{ASD}(\theta_s, 0, 0)}{\rho_{AMBRALS}(\theta_s, 0, 0)}, i=1, 2, \dots, 11, \quad (3)$$

$$\rho_{\text{direction}}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i(\theta_s) \rho_{\text{AMBRALS}}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v), n = 11, \quad (4)$$

式中 $\rho_{\text{AMBRALS}}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 表示在一定太阳位置 (θ_s, ϕ_s) 条件下, 用 AMBRALS BRDF 模型计算出的沿卫星观测方向的地表反射比。RossThick 和 LiSparse 分别为只与观测几何条件有关的体散射核函数和几何光学散射核函数。在给定核函数的条件下, 式(1)描述的 BRDF 由其各向同性散射系数 f_{iso} 、体散射系数 f_{vol} 和几何光学散射系数 f_{geo} 3 个系数完全确定。

分别用各个同步点实际测量的垂直地表反射比除以测量时刻 AMBRALS 算法计算的垂直地表反射比, 得到 11 个因子, 如式(3)所示。所得 11 个因子的平均值作为修正系数, 乘以卫星过境时刻 AMBRALS 算法计算的方向的地表反射比, 从而计算出卫星过境时刻可以代表整个同步场的方向地表反射比, 如式(4)所示。式(3)中 $\rho_{\text{AMBRALS}}(\theta_s, 0, 0)$ 表示在一定太阳位置 (θ_s, ϕ_s) 条件下, 用 AMBRALS BRDF 模型计算出的垂直地表反射比。

3.2 数据处理结果

2008 年 9 月 6 日、10 日、11 日 FY-3A 过境时刻的太阳与卫星位置及大气状况见表 3。各天平均修正系数见图 4。

表 3 FY-3A 过境时刻的太阳与卫星位置及大气状况
Tab. 3 The sun, satellite positions and air conditions at the moment of FY-3A passing through

	2008-9-6	2008-9-10	2008-9-11
Sun Zenith	38.978 1	37.831 5	39.851 1
Sun Azimuth	144.420 5	155.118	148.489
View Zenith	11.203 4	27.124	1.588 7
View Azimuth	101.763 5	-75.900 3	109.632 4
AOD	0.2	0.175	0.144
Ozone(mm)	0.296	0.283	0.283
TWC(g/cm ²)	0.642 5	0.478 7	0.472

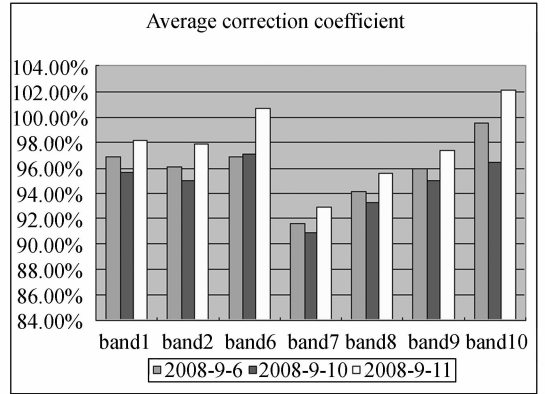


图 4 各通道平均修正系数

Fig. 4 Average correction coefficient of each band

图 4 显示在多天的计算中, 通道 7 场地实测的地表反射比与模型计算值间有接近 10% 的差别, 对通道 1、2、6 而言, 二者的差距在 5% 以内, 而且在不同天中修正系数均略有差异, 说明使用实测数据对 AMBRALS 算法进行修正是非常必要的。按照式(1)计算的定标斜率见表 4。

表 4 FY-3A/VIRR 场地定标斜率比较

Tab. 4 Comparison of FY-3A/VIRR site calibration slopes

Slope	2008-09-06	2008-09-10	2008-09-11	Average	RSD
Band1	0.123 6	0.121 7	0.125 4	0.123 6	1.50%
Band2	0.127 6	0.125 3	0.130 4	0.127 8	2.00%
Band6	0.096 5	0.097 2	0.101 2	0.098 3	2.58%
Band7	0.061 5	0.062 1	0.062 2	0.061 9	0.61%
Band8	0.058 2	0.057 7	0.058 6	0.058 2	0.78%
Band9	0.056 1	0.055 3	0.056 7	0.056 0	1.25%
Band10	0.063 6	0.061 9	0.068 3	0.064 6	5.13%

比较 3 天定标斜率, 1、2、6、7、8、9 通道的相对标准差 < 2.6%, 说明算法非常稳定。由于 10 通道位于大气中的水汽吸收带, 水汽对辐射能量的吸收造成了 ASD 测量得到的地表反射比误差较大, 同时 6S 模型也存在不稳定因素, 导致 10 通道相对标准差 > 5%。将 3 天定标斜率的平均值与发射前定标斜率进行对比, 发现各通道差异达 7.73%~21.52%, 见表 5。

表 5 发射前后定标斜率比较

Tab. 5 Comparison of calibration slope by pre-launching and post-launching

Slope	Before Launch	After Launch	Relative error
Band1	0.100 1	0.123 6	19.01%
Band2	0.100 3	0.127 8	21.52%
Band6	0.090 7	0.098 3	7.73%
Band7	0.050 2	0.061 9	18.90%
Band8	0.050 1	0.058 2	13.92%
Band9	0.049 9	0.056 0	10.89%

3.3 结果验证

取 3 天定标系数均值计算 23 种观测目标在 1、2、6、7、8、9 通道的表观反射比,与 TERRA/MODIS 相应通道进行对比,结果见图 5~10。从图中可以看出 FY-3A/VIRR 与 TERRA/MODIS 的观测结果非常一致。

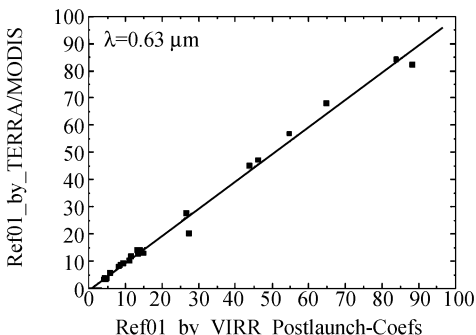


图 5 FY-3A/VIRR 通道 1 与 TERRA/MODIS 通道 1 对比

Fig. 5 Comparison of FY-3A/VIRR band 1 and TERRA/MODIS band 1

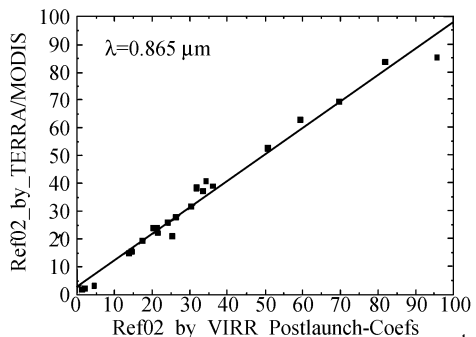


图 6 FY-3A/VIRR 通道 2 与 TERRA/MODIS 通道 2 对比

Fig. 6 Comparison of FY-3A/VIRR band 2 and TERRA/MODIS band 2

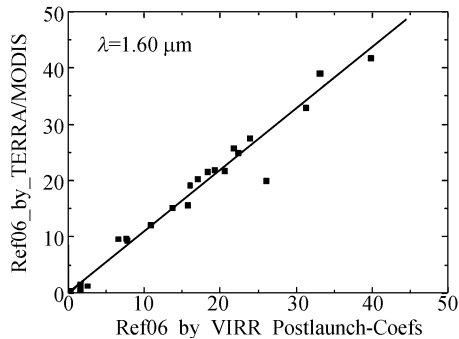


图 7 FY-3A/VIRR 通道 6 与 TERRA/MODIS 通道 6 对比

Fig. 7 Comparison of FY-3A/VIRR band 6 and TERRA/MODIS band 6

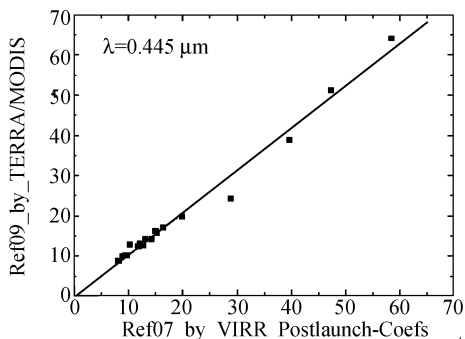


图 8 FY-3A/VIRR 通道 7 与 TERRA/MODIS 通道 9 对比

Fig. 8 Comparison of FY-3A/VIRR band 7 and TERRA/MODIS band 9

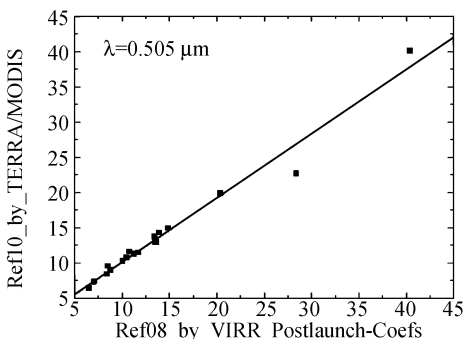


图 9 FY-3A/VIRR 通道 8 与 TERRA/MODIS 通道 10 对比

Fig. 9 Comparison of FY-3A/VIRR band 8 and TERRA/MODIS band 10

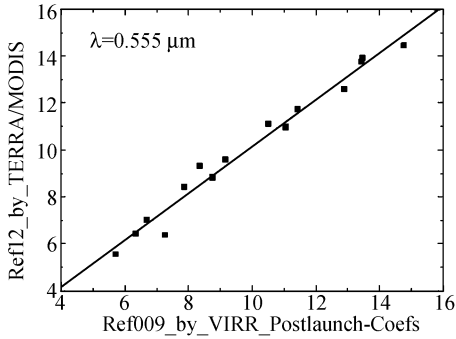


图 10 FY-3A/VIRR 通道 9 与 TERRA/MODIS 通道 12 对比

Fig. 10 Comparison of FY-3A/VIRR band 9 and TERRA/MODIS band 12

4 结 论

由于某些通道场地实测的地表反射比与 AMBRALS 模型计算值间有高达 10% 左右的差别, 本文提出了修正地表反射比二向性的新方法, 结果表明使用实测数据对模型数据进行修正对定

标精度的提高起到了积极作用。

所获得的多天定标斜率相对标准差 $< 2.6\%$, 说明算法的重复性好, 定标结果稳定。与 TERRA/MODIS 的对比显示二者观测结果一致, 可在一定程度上验证算法的准确性。原因在于 TERRA/MODIS 有高精度的星上定标器, 其可见近红外通道的定标可通过星上定标完成且定标准确性是国际上公认的。而场地定标属于一种替代定标方法, 能够与 TERRA/MODIS 有如此高的一致性说明了场地定标算法的准确性。目前国家卫星气象中心已将场地定标系数替代发射前定标系数向用户提供。

各通道发射前后定标斜率差异达 $7.73\% \sim 21.52\%$, 说明了在卫星发射后及时进行在轨定标的重要性和紧迫性。

水汽吸收通道在气象卫星的遥感应用中占重要地位, 目前, 提高其定标精度仍是可见近红外通道场地定标工作的难点。

参考文献:

- [1] 张玉香, 张广顺. FY-1C 卫星可见-近红外各通道在轨辐射定标[J]. 气象学报, 2002, 60(6): 740-747. ZHANG Y X, ZHANG G SH. In-flight vicarious radiometric calibration for VIS-NIR channels of FY-1C satellite sensor at Dunhuang site [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(6): 740-747. (in Chinese)
- [2] 戎志国, 张玉香, 邱康睦, 等. 利用敦煌辐射校正场对 FY-2B 静止气象卫星进行可见光通道的在轨辐射定标 [J]. 应用气象学报, 2004, 15(3): 266-272. RONG ZH G, ZHANG Y X, QIU K M, *et al.*. Radiometric calibration on orbit for FY-2B meteorological satellite's visible channels with the radiometric calibration site of Dunhuang [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2004, 15(3): 266-272. (in Chinese)
- [3] 张舞杰, 杨义禄, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(2): 294-301. ZHANG W J, YANG Y L, LI D, *et al.*. Key algorithms of automatic image measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 294-301. (in Chinese)
- [4] 杨志峰, 张小曳, 车慧正, 等. CE318 型太阳光度计标定方法初探[J]. 应用气象学报, 2008, 19(03): 297-306. YANG ZH F, ZHANG X Y, CHE H ZH, *et al.*. An introductory study on the calibration of CE318 sunphotometer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(03): 297-306. (in Chinese)
- [5] 任宜勇, 李霞, 吕鸣, 等. CE318 太阳光度计观测资料应用前景及其解读[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 349-352. REN Y Y, LI X, LÜ M, *et al.*. Application prospect of measurement by sun photometer CE318 and retrieval methodology [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3): 349-352. (in Chinese)
- [6] 董双林, 崔宏光. 饱和水汽压计算公式的分析比较及经验公式的改进[J]. 应用气象学报, 1992, 3(4): 501-507.

- DONG SH L, CUI H G. Analysis of calculating formula and improvement of empirical formula for saturation vapour pressure[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1992, 3(4): 501-508. (in Chinese)
- [7] 李玉林, 杨梅, 冯宏芳, 等. 江西省空中水汽量与降水效率特征分析[J]. *江西气象科技*, 2003, 26(1): 25-29.
- LI Y L, YANG M, FENG H F, *et al.*. Analysis to the characteristics of vapour amount in air and precipitation efficiency of jiangxi[J]. *Jiangxi Meteorology Science & Technology*, 2003, 26(1): 25-29. (in Chinese)
- [8] BIGGAR S F. *In-flight methods for satellite sensor absolute radiometric calibration* [D]. Tucson: The University of Arizona, 1990.
- [9] 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 Sensing of Environment*, 1987, 22(1): 11-37.
- [10] 赵强, 张工力, 陈星旦. 多元散射校正对近红外光谱分析定标模型的影响[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1): 53-58.
- ZHAO Q, ZHANG G L, CHEN X D. Effects of multiplicative scatter correction on a calibration model of near infrared spectral analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 53-58. (in Chinese)
- [11] LIU J J, RONG ZH G, ZHANG L J. *BRDF measurement and analysis on Dunhuang radiometric calibration site* [R]. Taoyuan: Remote Sensing Symposium on Cross-Strait, 2007.
- [12] LI X W, GAO F, WANG J D, *et al.*. Bi-directional normalized difference vegetation index: concept and application [J]. *Progress In Natural Science*, 2002, 12(2): 115-119.
- [13] VERMOTE E. *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* [M]. 6S User Guide Version 2, 1997.
- [14] 任建伟, 万志, 李宪圣, 等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1186-1190.
- REN J W, WAN ZH, LI X SH, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1186-1190. (in Chinese)

作者简介:



李元(1978—),女,北京丰台人,博士,助理研究员,2001年,2006年于北京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事传感器发射前后的辐射定标工作。E-mail:liyuan@cma.gov.cn



郑照军(1976—),男,山东诸城人,助理研究员,2000年于南京大学获得学士学位,2008年于北京大学获得硕士学位,主要从事冰雪遥感、气候变化分析和遥感数据处理等方面的研究。E-mail:zhengzj@cma.gov.cn



戎志国(1964—),男,江苏丹阳人,研究员级高级工程师,1985年于南京大学获得学士学位,参加了建设气象卫星地面应用系统工程、中国遥感卫星辐射校正场和空间天气监测预警业务;在卫星资料辐射定标和真实性检验方面有深入的研究。



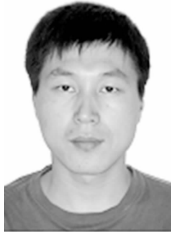
刘京晶(1963—),男,北京人,研究员,1984年于长春地质学院获得学士学位,1987年于核工业北京地质研究院获得硕士学位,主要从事航空遥感和在轨卫星光学传感器辐射定标方法的研究。E-mail: LiuJJ@cma.gov.cn



张立军(1967—),男,北京人,本科,工程师,主要从事气象卫星辐射定标工作。E-mail: zhanglj@cma.gov.cn



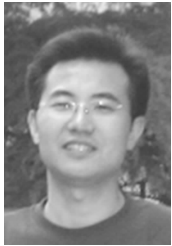
张勇(1977—),男,陕西镇巴人,博士,2006年于中国科学院遥感应用研究所获得理学博士学位,主要从事定量遥感、遥感传感器辐射定标和热红外遥感的理论和应用研究。E-mail: zhangyong@cma.gov.cn



张里阳(1972—):男,吉林通化人,高级工程师,1994年,2002年于南京气象学院分别获得学士、硕士学位,主要从事卫星遥感数据处理和地表环境遥感的研究。E-mail: zhangly@cma.gov.cn



孙凌(1977—),男,山东青岛人,副研究员,1999年,2002年于青岛海洋大学分别获得学士、硕士学位,2005年于中科院海洋研究所获得博士学位,主要从事海洋水色、定标和气溶胶遥感方面的研究。E-mail: sunling@nsmc.cma.gov.cn



胡秀清(1973—),男,湖北蕲春人,副研究员,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,主要从事星载光学遥感器的辐射定标方法、卫星资料预处理算法和大气产品遥感反演算法的研究。E-mail: huxq@cma.gov.cn

● 下期预告

掠入射 X 射线散射法测量超光滑表面

王永刚^{1,2}, 孟艳丽^{1,2,3}, 马文生¹, 陈斌¹, 陈波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

3. 东北师范大学 物理系; 吉林 长春 130033)

介绍了掠入射 X 射线散射法(GXRS)测量超光滑表面的原理及基于商业用 X 射线衍射仪改造而成的实验装置。选择三片不同粗糙度的硅片作为实验样品。根据一级矢量微扰理论对各个样品所测量的散射分布进行处理。结果表明:GXRS 法得到的样品功率谱密度函数(PSD)与使用原子力显微镜(AFM)所测量的结果基本相符。分析了探测器接收狭缝的宽度和入射光发散度对实验结果的影响。分析结果表明:在其他实验条件理想的情况下,探测器接收狭缝宽度 $<0.02\text{ mm}$ 和入射光发散度 $<43''$ 时,在空间频率 $>0.03\ \mu\text{m}^{-1}$ 的范围内,由其引起的 PSD 函数测量误差都 $<2\%$ 。随着探测器接收狭缝宽度和入射光发散度的减小,测量误差呈指数迅速减小。在所测量的空间频率范围内,PSD 函数的误差随频率的增加而减小,仪器的重复精度优于 2.6% 。