

利用 MODIS 对 FY-2E/VISSR 红外窗区 和水汽通道的交叉绝对辐射定标

徐娜, 胡秀清, 陈林, 张玉香

(国家卫星气象中心 中国遥感卫星辐射测量与定标重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:介绍了利用高精度的 TERRA/MODIS 观测资料对 FY-2E 红外窗区和水汽吸收通道进行绝对交叉定标的方法,并选用 2010 年 5、7 和 12 三个月的卫星数据进行了交叉定标计算。结果表明,交叉定标系数计算亮温与 MODIS 匹配点处实测结果非常接近,约 90% 的亮温偏差小于 1K,其中高温区结果更稳定,偏差小于低温区,这主要是由于低温区杂散光影响显著造成的。总的说来,借助 TERRA/MODIS 可以实现对 FY-2E/VISSR 的高频次高精度的绝对定标,为 FY-2E 在轨替代定标提供重要的方法基础。

关键词:静止气象卫星;交叉绝对定标;红外通道;时空匹配;光谱匹配
中图分类号:TP732.2 **文献标识码:**A

Cross-calibration of FY-2E/VISSR infrared window and water vapor channels with TERRA/MODIS

XU Na, HU Xiu-Qing, CHEN Lin, ZHANG Yu-Xiang

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,
National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper addresses the cross-calibration method of infrared window and water vapor channels of VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) with reference data provided by the onboard geostationary satellite FY-2E with MODIS (MoDerate resolution Imaging Spectroradiometer) and the onboard polar-orbit satellite TERRA. The cross-calibration is implemented using the satellite remote data in May, July and December of 2010. The results show that the bright temperature calculated using cross-calibration coefficients is nearly equal to the observed value of MODIS for all collocation samples, and about 90 percent of temperature bias is less than 1K. It can also be seen that the calibration slope decreases obviously from May to the beginning of July, and ascends slightly in the last ten-day of July, then keeps steady in December. The variation of calibration coefficients reveals great consistent with that of remote temperatures. All in all, the cross-calibration method described here can increase frequency and accuracy, and provide a methodological foundation for on-orbit calibration of FY-2E.

Key words: geostationary meteorological satellite; cross-calibration; infrared channel; temporal and spatial collocation; spectral matching

PACS: 95.75.Rs

引言

气象卫星通过装载的遥感仪器可以实现对地的长期连续观测,对天气、气候和资源环境变化等研究都有重要意义。卫星资料定量化应用的关键是遥感数据的高精度辐射定标。辐射定标过程就是建立卫

星遥感仪器输出信号与观测目标绝对物理量间的换算关系的过程^[1]。目前传感器的辐射定标方法有很多,按定标的阶段可划分为发射前定标、在轨星上定标和在轨替代定标三类。

风云二号(FY-2)系列静止气象卫星采用的是自旋稳定方式,用星上黑体难以实现绝对定标,必

收稿日期:2011-06-27,修回日期:2012-02-27

Received date: 2011-06-27, revised date: 2012-02-27

基金项目:国家自然科学基金(41105010);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB403401)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41105010), and National Key Basic Research and Development Program (973 Program) (2011CB403401)

作者简介(Biography): 徐娜(1982-),女,山东烟台人,博士,主要研究领域为大气辐射传输和星载传感器辐射定标, E-mail: xuna@cma.gov.cn.

须进行校正^[2-3]. 目前我国静止气象卫星红外通道采用的最有效的定标方法是在轨替代定标.

替代定标主要分为场地定标^[4-7]和交叉定标. 由于受限于同步观测资料质量以及 RTM 计算精度, 场地定标的精度很难提高. 交叉定标是目前国际上较为流行的在轨替代定标方法.

本文利用 TERRA/MODIS 对 FY-2E 可见光和红外自旋转扫描辐射计 (VISSR, Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 红外通道进行交叉定标. 表 1 给出了 FY-2E/VISSR 与 TERRA/MODIS 对应通道的光谱范围对比. 可以看到, VISSR 与 MODIS 红外窗区和水汽吸收通道的中心波长位置比较接近, 但 VISSR 比 MODIS 通道宽, 短波红外和可见光通道光谱差异较大, 因此主要针对红外窗区和水汽吸收三个通道进行交叉定标计算. 中分辨率成像光谱仪 (MODIS, MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) 是美国 TERRA 和 AQUA 卫星上装载的重要传感器^[8-9], 采用 MODIS 作为定标的参考标准传感器完全可以满足对 VISSR 绝对辐射定标的精度要求.

详细介绍了利用 TERRA/MODIS 对 FY-2E/VISSR 红外窗区和水汽吸收通道进行交叉定标的具体方法, 利用该方法对 FY-2E 2010 年 5、7 和 12 三个月的 L1 数据进行了再定标计算, 借此分析了 2010 年 FY-2E/VISSR 定标系数的变化趋势, 为 FY-2E 的在轨定标提供可靠参考.

表 1 TERRA/MODIS 和 FY-2E/VISSR 对应通道的光谱范围

Table 1 The comparison of corresponding spectral bands between TERRA/MODIS and FY-2E/VISSR

FY-2E/VISSR				TERRA/MODIS		
通道号	通道名称	光谱范围/ μm	分辨率	通道号	光谱范围/ μm	分辨率
IR1	红外窗区通道	10.3~11.7	5 km	31	10.78~11.28	1 km
IR2		11.3~13.1	5 km	32	11.77~12.27	1 km
IR3		6.1~7.7	5 km	27	6.535~6.895	1 km
IR4	短波红外通道	3.4~4.2	5 km	28	7.175~7.475	1 km
				20	3.660~3.840	1 km
				21	3.929~3.989	1 km
				22	3.929~3.989	1 km
				23	4.020~4.080	1 km
				1	0.620~0.670	0.25 km
				2	0.841~0.876	0.25 km
VIS	可见光通道	0.55~0.90	1.25 km	4	0.545~0.565	0.5 km
				12	0.546~0.556	1 km
				13	0.662~0.672	1 km
				14	0.673~0.683	1 km
				15	0.743~0.753	1 km
				16	0.862~0.877	1 km
				17	0.890~0.920	1 km

1 方法介绍

影响交叉定标精度的关键是, 对应通道光谱响应的一致性及其观测目标和观测几何状态的一致性. 交叉定标的具体流程见图 1, 主要由数据匹配、均匀性检查、数据转换和定标计算四部分组成.

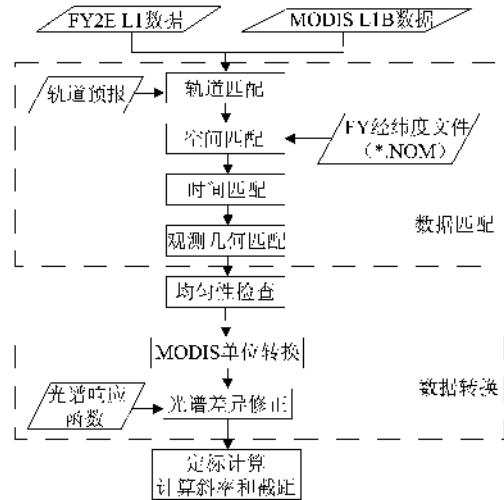


图 1 VISSR 与 MODIS 交叉定标流程
Fig. 1 Flowchart of cross-calibration between VISSR and MODIS

1.1 数据匹配

数据匹配是通过对两星交叉观测区域的样本进行配准, 挑选合适的匹配样本使其尽可能满足时间、空间和观测几何的一致性. 这是交叉定标过程中最关键的步骤, 直接影响计算效率和定标精度. 数据匹配又由轨道匹配、空间匹配、时间匹配和观测几何匹配四个过程组成.

轨道匹配: 对于可参与匹配的所有样本, 通常仅有不到 0.1% 的样本最终被选择, 因此事先确定适合对比的观测区域可以大大减小处理时间. 根据两星的运动和扫描特点, 以 FY-2E 星下点 $\pm 20^\circ$ 经度以内区域为目标区域, 这样可确保静止星监测这块区域时为近似星下点观测, 最终交叉匹配样本位于目标区域内平行于 TERRA 运动轨迹的狭窄范围内. 利用卫星轨道预报软件计算 TERRA 每天过目标区域的时间, 根据 TEERA 过境时间选择时间最接近的 FY-2E 卫星数据;

空间匹配: 确定了对应的数据文件后, 需要将所有观测数据进行空间配准, 寻找与每一个 MODIS 像元最接近的 VISSR 像元. 传统的配准方法是逐点查找法, 通过“反复循环”逐一排除寻找最匹配像元,

计算效率极低. 为了提高效率,设计了一种“追踪”匹配法,如图 2 所示.“追踪”匹配法的基本原理就是利用 FY-2E 星下点经纬度信息,确定一个包含待配准 MODIS 像元的尽可能小的空间区域,在这个小区域内逐点比较寻找最匹配的 FY-2E 像元. 图 2 中 B 点表示待配准的 MODIS 像元, A 点为 FY-2E 的星下点位置,分别从星下点的经度和纬度方向出发可以追踪到距离 MODIS 像元最近的 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 像元,实际匹配样本大致会落于这两点所形成的小矩形区域之内. 前面提到过,本文用于交叉匹配的整个目标区域为 FY-2E 星下点 $\pm 20^\circ$,大约包含 70 万个像元,而小矩形区域内仅包含几十个像元,参与筛选的像元减少了 5 个数量级,从而大大提高了空间配准效率.

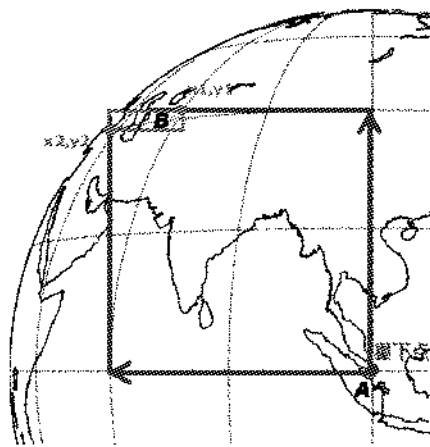


图 2 空间匹配“追踪找点”法示意图
Fig.2 Sketch map of tracking-point method for spatial collocation

时间匹配:虽然经过轨道匹配可以对两星观测时间进行初步限制,但是为了降低目标温度随时间变化的影响尽量保证观测目标的一致性,还需进行时间筛选. 根据 FY-2E 文件中观测时间信息,选择观测时间差小于 15 分钟的空间匹配像元.

观测几何匹配:观测几何匹配的关键是寻找两星同路径扫描区域. 考虑到地表和大气特性,针对经过时空匹配的每对像元进行观测几何匹配,确保两仪器在相似地面入射角和相似大气路径条件下进行观测. 卫星天顶角满足式(1)定义阈值的为最终的匹配样本.

$$\left| \frac{\cos(\text{FY 卫星天顶角})}{\cos(\text{Modis 卫星天顶角})} - 1 \right| < 0.01. \quad (1)$$

1.2 均匀性检查

除了观测几何的一致性,目标地物的均匀性也

是影响交叉定标精度的一个重要因素. 因为目标区域内云是在不断移动的,为了防止由于观测时间的差别观测到不同类型目标,减少时空差异等产生的不确定性,只选择均匀情景下像元进行交叉定标. 前面提到过,VISSR 红外通道星下点分辨率为 5 km,而 MODIS 星下点分辨率为 1 km,定义与 VISSR 像元点最接近的 MODIS 5×5 像元范围为靶区,靶区 3 倍半径范围为环境区域. 辐亮度是判断目标均匀性的最佳参量. 因为卫星辐亮度的变化范围宽且不同通道接收到的辐射强度也有明显差异,仅用一个阈值作为判断标准显然是不妥当的. 环境均匀性检查中,选用下式作为均匀情景判据

$$\text{RSTD} = \frac{\text{STD}(\text{ENV})}{\text{MEAN}(\text{ENV})} < \text{max_RSTD}, \quad (2)$$

式中, ENV 表示环境区域, STD 表示标准偏差, MEAN 表示平均值, RSTD 表示相对标准偏差, max_RSTD 为阈值. 由于采用了相对标准差,对于不同通道可以采用相同的阈值,这里取 max_RSTD = 0.05.

交叉定标时选用环境区域内 MODIS 的辐亮度平均值与 VISSR 观测计数值 DN 的平均值进行对比,采用环境平均值可以降低定位偏差带来的影响. 经过数据匹配和均匀性检查筛选后即可得到适合交叉定标的 MODIS 和 VISSR 匹配样本. 虽然目标地物类型的均匀性对匹配像元的选择具有重要影响,但是由于采用了式(2)所示的均匀性判据,实际匹配样本挑选过程中并不需要单独考虑地物类型的影响. 图 3 显示了最终匹配样本的位置,可以看到匹配样本在赤道附近呈现类似蝴蝶形状的近似对称分布的条带.

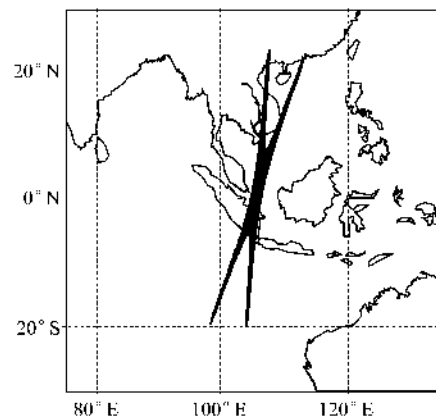


图 3 TERRA/MODIS 与 FY-2E/VISSR 交叉匹配样本分布示意图
Fig.3 The collocation sample distribution of TERRA/MODIS and FY-2E/VISSR for cross-calibration

1.3 数据转换

匹配数据必须转换成能够直接比较的形式,包括单位转换和光谱差异修正. MODIS L1 文件中存储的是经过比例刻度化的 SI (Scaled Integer) 数值,需要还原为辐亮度^[10],并进行单位转换,转换公式为

$$\text{radiance} = \text{radiance_scales}(\text{SI-radiance_offsets})v_{\text{eff}}^2/10, \quad (3)$$

式中, scales 和 offsets 分别为缩放比和缩放截距,由 L1 文件提供; radiance 为辐亮度,单位 $\text{mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$; v_{eff}^2 为通道等效波长,单位为 μm ,定义为

$$v_{\text{eff}} = \frac{\int_{\Delta v} v \times F(v) dv}{\int_{\Delta v} F(v) dv}, \quad (4)$$

式中 $F(v)$ 为光谱响应函数, Δv 为通道光谱范围.

光谱响应差异是影响交叉定标精度的一个重要因素. 光谱响应函数不同会导致对于相同的辐射输入,不同仪器会输出不同的响应信号. 将 MODIS 和 VISSR 两仪器的光谱响应函数分别与不同温度下的黑体辐射光谱卷积,考察光谱响应差异对通道辐射亮温(TBB, Black Body Temperature)的影响,结果如图 4 所示. 图 4 中左列为对应通道的光谱响应函数分布,右列为亮温偏差随温度分布图. 右图中实线和虚线分别代表光谱差异修正前、后 MODIS 与 VISSR 的通道亮温差. 可以看到,光谱响应差异会对亮温计算结果的影响是非常显著,两仪器间的通道亮温差可高达 10 K,因此对 MODIS 观测辐射进行光谱修正是非常有必要的. 由于得到的所有匹配样本均位于赤道地区,以热带模式大气为基础,改变垂直水汽总量、地表温度和卫星观测角度等参量,利用 MODTRAN 大气辐射传输模式计算不同大气条件下的辐射光谱分布. 确保所选参量样本能基本涵盖可能出现的大气状况,其中大气水汽总量通过变化云类型及其光学特性来更改,采用卷云和层云模型取光学厚度分别为 2, 4, 8, 16, 32, 64; 地表温度分别设为 180K, 240K, 300K; 卫星观测角度变化范围为 $0^\circ \sim 20^\circ$, 间隔为 5° . 将模拟得到的 180 个辐射光谱样本分别与 MODIS 和 VISSR 光谱响应函数卷积,得到相应传感器的卫星入瞳辐亮度,建立 MODIS 和 VISSR 入瞳辐射间的关系表达式^[11]为如下所示

$$\begin{aligned} R_{\text{VISSR}}^{\text{IR1}} &= A_1 R_{\text{MODIS}}^{\text{IR31}} + B_1 \\ R_{\text{VISSR}}^{\text{IR2}} &= A_2 R_{\text{MODIS}}^{\text{IR32}} + B_2 \\ R_{\text{VISSR}}^{\text{IR3}} &= A_{31} R_{\text{MODIS}}^{\text{IR27}} + A_{32} R_{\text{MODIS}}^{\text{IR28}} + B_3 \end{aligned}, \quad (5)$$

式中, R 表示辐亮度, A 和 B 为光谱差异修正因子,通过最小二乘法计算得到. 由于 VISSR 水汽通道对

应 MODIS 27 和 28 两个通道,因此利用两通道辐亮度联合计算修正因子. 表 2 为各通道的光谱差异修正因子,及其相应的相关系数. 由图 4 右列虚线可以看到,经过修正后 MODIS 与 VISSR 的亮温差减小,光谱响应差异的影响减弱,特别是在 IR1 和 IR2 通道改善最显著,亮温差减小可达 50%.

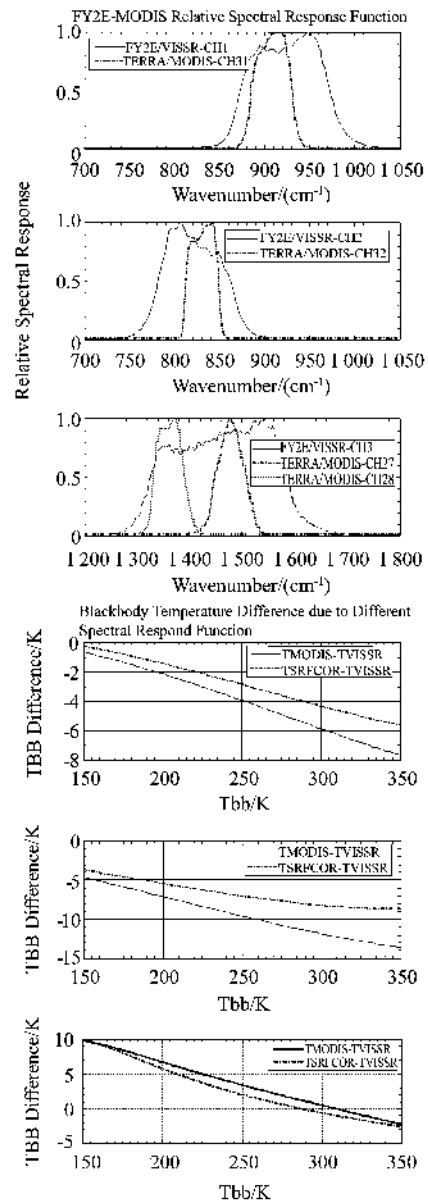


图 4 光谱响应差异对通道黑体亮温(TBB)的影响
Fig. 4 The effect of spectral distribution difference to bright temperature

1.4 定标计算

匹配样本经过单位转换和光谱差异修正后可直接建立经验拟合关系. 参考传感器 MODIS 观测辐亮度与目标传感器 VISSR 的观测计数值之间存在经典的线性拟合关系,即:

表 2 光谱差异修正因子

Table 2 Spectral matching factor for infrared bands cross-calibration of TERRA/MODIS and FY-2E/VISSR

系数	MODIS 通道 31	MODIS 通道 32	MODIS 通道 27	MODIS 通道 28
A	1.025 3	1.057 2	0.597 2	0.311 4
$B/(\text{mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1})$	$8.115\ 6\text{e}-4$	$-2.636\ 4\text{e}-3$	$1.289\ 4\text{e}-3$	
相关系数	0.991	0.987	0.977	

$$R_{\text{MODIS}} = a \times DN_{\text{FY2}} + b, \quad (6)$$

a 和 b 为定标斜率和定标截距, 单位 $\text{mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$.

为了方便比较, 质量分析时需将辐亮度 R 转换为亮温 TB. 任意亮温处的通道辐亮度可以表示为

$$R_{\Delta\nu}(\text{TB}) = \frac{\int_{\Delta\nu} B_{\nu}(\text{TB}) \times F(\nu) d\nu}{\int_{\Delta\nu} F(\nu) d\nu}, \quad (7)$$

式中, $B_{\nu}(\text{TB})$ 是普朗克函数. 在反演亮温时, 通常认为 $R_{\Delta\nu}(\text{TB})$ 等于等效波长处的辐射值 $B_{\nu_{\text{eff}}}(\text{TB})$, 通过普朗克函数反算 ν_{eff} 处黑体辐射为 $R_{\Delta\nu}$ 的通道亮温. 由于这种做法会引入 ν_{eff} 的计算误差, 本文采用查找表方式计算亮温. 通过公式(7)精确计算某一通道随亮温变化的通道辐亮度, 建立 TB ~ R 查找表, 通过线性插值计算任意辐亮度对应的通道亮温.

2 结果与分析

2.1 定标结果分析

利用交叉定标方法, 计算了 2010 年 5、7 和 12 月三个月 FY-2E 的辐射定标系数, 选取回归相关系数大于 0.9 的结果示于图 5. 其中矩形图标代表定标斜率对应左侧坐标轴, 五角星图标代表定标截距对应右侧坐标轴, 上中下分别为 IR1、IR2 和 IR3 通道结果. 由图 5 可见, FY-2E 定标斜率在 5 月到 7 月初期间呈明显衰减趋势, 7 月上旬趋于稳定下旬略有上升趋势, 而整个 12 月定标结果相对平稳. 定标系数的变化与星上仪器状态密切相关. 每年 3~4 月中旬以及 9~10 月中旬卫星处于地影期, 昼夜温差大, 星上状态不稳定; 5~6 月中旬和 7 月下旬~8 月分别处于春夏和夏秋星体温度平稳变化过渡期, 仪器状态发生渐变, 定标也会相应的随之微调; 12 月处于冬季, 星上状态稳定, 定标结果也比较平稳. 综上分析可见, 图 5 所示的定标系数的变化特点与星上遥测温度变化规律符合很好.

2.2 定标精度检验

以 MODIS 观测值为参考基准, 分别利用交叉定

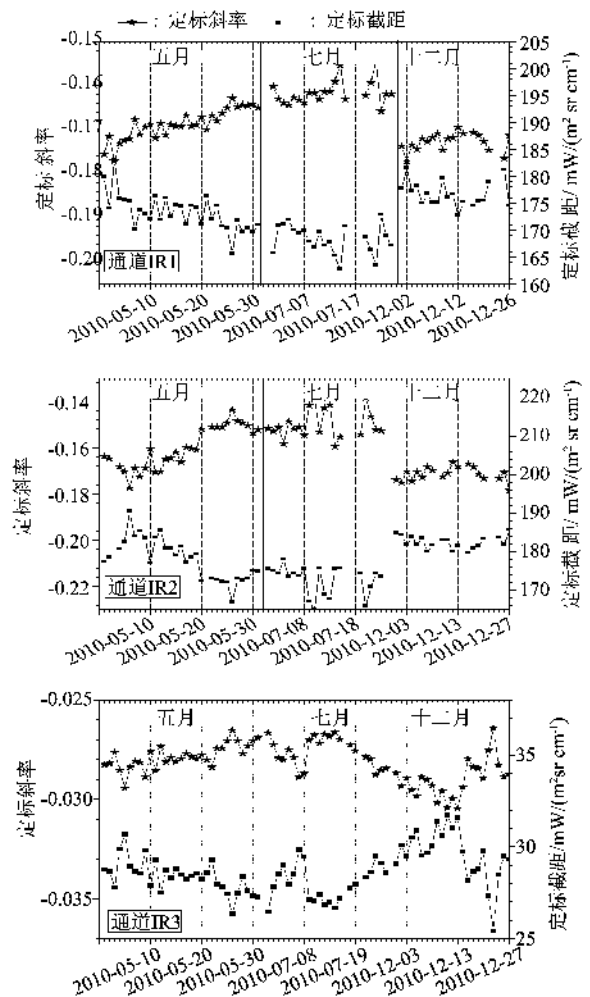


图 5 2010 年 5、7 和 12 三个月 FY-2E 交叉定标系数变化趋势

Fig. 5 Variation of FY-2E Cross-calibration coefficients during MAY, July and December 2010

标系数和卫星数据 L1 文件中提供的业务定标系数计算每天所有匹配样本处 FY-2E 的辐射亮温, 比较不同定标系数计算 FY-2E 亮温与参考基准之间的偏差. 图 6 显示了 2010 年 5、7 和 12 三个月所有亮温偏差 (DTBB) 的分布, 其中上图 a 为亮温偏差随温度变化图, 图中标记点为对应温度处的平均偏差, 而 Bar 代表的是两倍标准差, 上三角和星号分别代表交叉定标和业务定标结果; 下图 b 为交叉定标计算亮温偏差的概率分布图. 由图 6 可见, 交叉定标系数计算亮温与 MODIS 匹配点处实测结果非常接近, 90% 的亮温偏差小于 1 K; 从亮温偏差随温度分布结果来看, 交叉定标结果要明显优于目前业务定标系数计算结果, 其中高温区结果更稳定, 偏差小于低温区, 这主要是因为低温区卫星仪器接收到的辐射信号较弱, 杂散光影响增大, 最终影响定标结果.

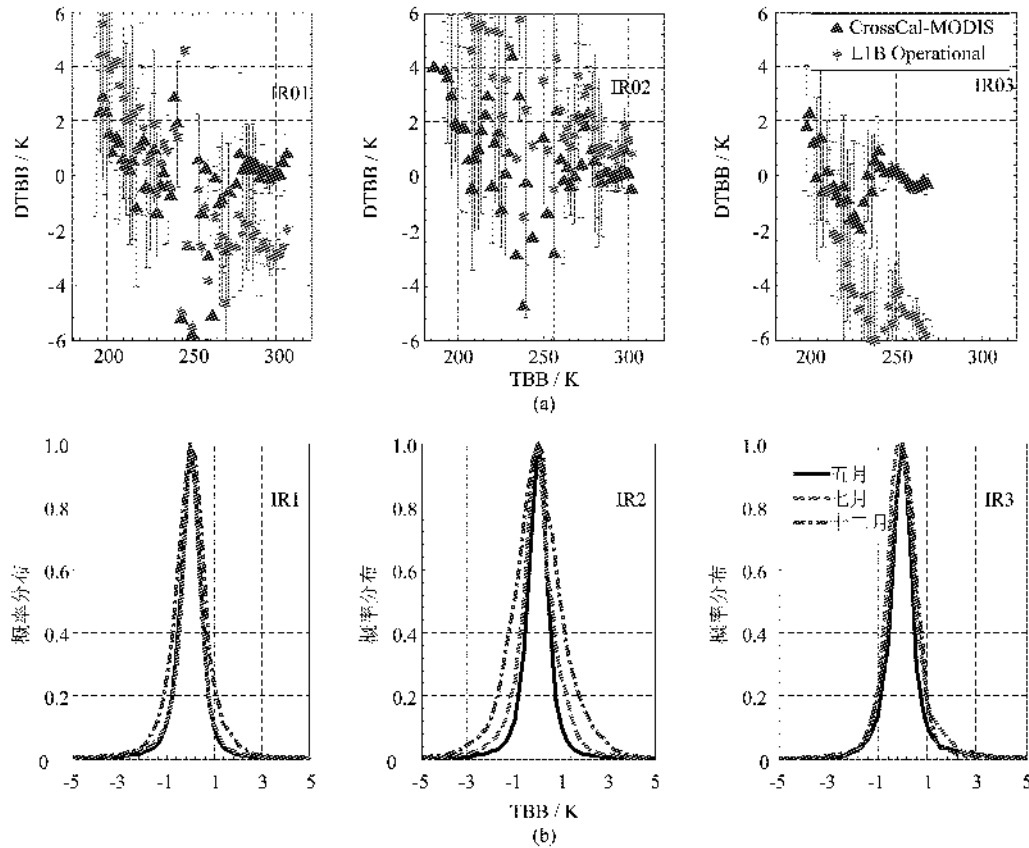


图6 以MODIS为基准FY2E亮温偏差DTBB分布(上图a为DTBB随温度TBB变化;下图b为概率分布)
Fig.6 FY-2E bright temperature Bias with AIRS for MAY, July and December 2010 (Top: DTBB varying with temperature; Bottom: probability distributions)

3 结论

详细介绍了利用高定标精度和业务运行稳定的TERRA/MODIS传感器观测数据对FY-2E/VISSR红外窗区和水汽吸收通道进行交叉定标的方法,通过严格的时空匹配和光谱差异修正使两传感器的交叉观测匹配样本尽可能满足观测几何和光谱响应的一致性。

利用2010年5、7和12三个月的观测资料进行了交叉定标计算,结合星上遥测温度数据可知这三个月处于FY-2E运行平稳变化期,定标结果更具有代表性。定标系数变化趋势分析结果显示,FY-2E定标斜率在5月到7月初期间有明显衰减趋势,7月上旬趋于稳定下旬略有上升趋势,而整个12月定标结果相对平稳,与星上遥测温度的变化趋势有很好的-致性。通过亮温偏差结果分析表明,交叉定标系数计算亮温与MODIS匹配点处实测结果非常接近,约90%的亮温偏差小于1K,其中高温区结果更稳定,偏差小于低温区。综上分析表明,借助TERRA/MODIS可以实现对FY-2E/VISSR的长时间绝对定标,定标精度能够满足定量应用需求。2010年三个

月的定标计算结果可以一定程度反映FY-2E定标随时间的年季变化规律,为预测定标变化和提-高定标精度提供可靠参考。

REFERENCES

- [1]ZHANG Ru-Yi, WANG Yu-Hua. Radiometric calibration of FY-2C meteorological satellite and its result analysis [J]. *Aerospace Shanghai* (张如意, 王-玉花. FY-2C星辐射定标及其结果分析, 上海航天), 2005, 22(21): 31-35.
- [2]RONG Zhi-Guo. Calibration method of scanning radiometer on FY-2 satellite in orbit [J]. *Chinese Space Science and Technology* (戎志-国. FY-2卫星扫描辐射仪在轨定标方法, 中国空间科学技术), 2000, 20(1): 67-71.
- [3]ZHU GUANGZE. Radiation calibration of scanning radiometer for meteorological satellite [J]. *Chinese Space Science and Technolog* (朱广-贻. 气象卫星扫描辐射计的辐射定标, 中国空间科学技术), 1992, 12(5): 27-33.
- [4]HU Xiu-Qing, RONG Zhi-Guo, QIU Kang-Mu. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C and FY-2B meteorological satellite sensors using Qinghai Lake [J]. *J. Space Science Transaction* (胡秀清, 戎志-国, 邱康睦. 利用青海湖水面辐射校正场对FY-1C和FY-2B气象卫星热红外通道进行绝对辐射定标. 空间科学学报), 2001, 21(4): 370-380.

(下转第384页)

表 1 油罐几何参数反演结果

Table 1 Geometry extraction results for the tanks

油罐号	半径			高度		
	测量值/m	参考值/m	误差/m	测量值/m	参考值/m	误差/m
1	14.5	15.0	0.5	15.0	15.5	0.5
2	14.5	15.0	0.5	14.1	14.0	0.1
3	13.5	14.0	0.5	14.2	14.0	0.2
4	8.6	8.8	0.2	14.4	14.5	0.1
5	8.2	9.0	0.8	13.9	14.5	0.6

径. 经研究表明, 这样的现象是由多径散射和雷达特有的合成孔径过程造成的. 同时, 根据多径散射机制和 SAR 工作原理首次建立了油罐目标的多径散射特征的预测模型, 有效分析和表征了圆柱型油罐的 SAR 图像的多径散射特征, 并基于该模型, 给出了油罐几何参数的反演方法, 反演精度和稳定性均比传统方法有所提高. 仿真实验和基于 Terra-SAR 数据的实验验证了本文研究的有效性.

本文虽然只讨论了油罐目标的多径散射特征, 但本文建立预测模型中使用的: 基于射线和合成孔径原理的分析方法可以有效的推广, 它为具有确定性多径散射机制的目标在 SAR 图像上的多径散射特征的分析提供了一种有效的分析途径.

REFERENCES

[1] XIA Xin. Study of feature extraction and recognition of typical targets in SAR images [D]. *Master Dissertation of Si-*

chuan University(夏昕. SAR 图像典型目标特征提取与识别方法研究. 四川大学硕士学位论文), 2006. 5.

[2] Xu F, Jin Y Q. Imaging simulation of polarimetric SAR for a comprehensive terrain scene using the mapping and projection algorithm[J]. *IEEE Geosci. Remote Sens.*, 2006, **44**(11): 3219-3234.

[3] Auer S, Hinz S, Bamler R. Ray-tracing simulation techniques for understanding high-resolution SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, **48**(3): 1445-1456.

[4] Franceschetti G, Iodice A, Riccio D. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2002, **40**(2): 1787-1801.

[5] Guida R, Iodice A, Riccio D. Height retrieval of isolated buildings from single high-resolution SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, **48**(7): 2967-2979.

[6] Guida R, Iodice A, Riccio D. Assessment of TerraSAR-X products with a new feature extraction application: monitoring of cylindrical tanks[J]. *IEEE Geosci. Remote Sens.*, 2010, **48**(2): 930-938.

[7] Ling H, Chou R, Lee S W. Shooting and bouncing rays: calculating RCS of an arbitrary cavity [J]. *IEEE Trans. AP*, 1989, **37**(2): 194-205.

[8] Cumming I G, Wong F H. *Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation* [M]. London, Artech House, 2005.

[9] Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, et al. SAR raw signal simulation for urban structures [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens.*, 2003, **41**(9): 1986-1995.

[10] Oliver C, Quegan S. *Understanding synthetic aperture radar images* [M]. SciTech Publishing Inc, 2004.

[11] <http://www.infoterra.com> [URI]

[12] <http://www.google.com/earth/index.html> [URL]

(上接第 324 页)

[5] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, WANG Yu-Hua, et al. The calibration method for water vapor channel of scanning-radiometer carried by FY-2B satellite [J]. *J. 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.

[6] 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. 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.

[7] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng-Min, et al. On-orbit radiometric calibration of FengYun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-surface measurements in the south China sea [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国, 张玉香, 贾凤敏, 等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标.

红外与毫米波学报), 2007, **26**(2): 97-101.

[8] TANG Jun-Wu, GU Xing-Fa, NIU Sheng-Li, et al. Water target based cross-calibration of CBERS-02 CCD camera with MODIS data [J]. *Science in China (E)*. (唐军武, 顾行发, 牛生丽, 等. 基于水体目标的 CBERS-02 卫星 CCD 相机与 MODIS 的交叉辐射定标. *中国科学 (E 辑)*), 2005, **35**(S1): 59-69

[9] Wan Z M, Zhang Y L, Li Z L, et al. Preliminary estimate of calibration of the moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared data using Lake Titicaca [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **80**(3): 497-515.

[10] Alice I, Salomonson V. *MODIS Level 1B Data Dictionary* [M]. MCST; MODIS Characterization Support Team For NASA/Goddard Space Flight Center Green belt, 2003.

[11] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng, et al. Intercalibration of FY-2B IR channel with NOAA satellites. *Acta Meteorologica* (戎志国, 张玉香, 陆风, 等. FY-2B 与 NOAA 卫星红外通道的相对定标. *气象学报*), 2005, **63**(4): 485-492.