

FY-2D 红外探测器窗区通道非线性特性 及其定标订正方案

徐娜, 陈林, 胡秀清, 陆风

(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:利用实验室定标与基于高光谱探测器 IASI 的交叉匹配样本, 分析了 FY-2D 红外探测器在窗区通道的非线性特征, 结果显示, VISSR 在信号两端都存在非线性特征, 但对低信号端的影响最为显著. 与实验室测量结果比较, 线性定标在低温端会带来大于 10 K 的亮温偏差. 为了同时保证定标结果的质量及其稳定性, 采用分段定标方案, 高温端为线性定标而中低温端为非线性. 从一致性以及台风个例分析等方面对定标方案进行了验证, 分析结果表明, 分段定标方案稳定, 对低温端的定标精度改进显著, 与线性结果比较台风监测亮温精度提升大于 7K.

关键词:静止气象卫星; 红外高光谱传感器; 交叉定标; 非线性订正

中图分类号: TP732. 2 **文献标识码:** A

Nonlinearity of FY-2D infrared detector in thermal window channels and its correction method

XU Na, CHEN Lin, HU Xiu-Qing, LU Feng

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

Abstract: Nonlinearity of FY-2D infrared detector in window channels was investigated using laboratory calibration measurements and collocation samples based on high-spectral sensor IASI. It was found that nonlinear performance existed both at high and low signal, but impacts at low signal were the most significant. Comparing with laboratory measurements, linear calibration could cause more than 10 K deviations at low temperature. In order to guarantee the quality of calibration results and its stability, nonlinear calibration scheme was applied only in low temperature area. Nonlinear calibration scheme was investigated from its consistency, and also typhoon application. The results indicated nonlinear calibration was stable, and significantly improved calibration accuracy at low temperature, especially in typhoon monitoring which was advanced at least by 7K.

Key words: geostationary meteorological satellite; high-spectral resolution sounder; inter-calibration; nonlinearity correction

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. 风云二号 (FY-2) 系列卫星是我国第一代静止气象卫星 (GEO), 共分为三个批次. 目前

仍在轨运行的 FY-2C、FY-2D 和 FY-2E 属于 02 批, 2012 年 1 月成功发射的 FY-2F 属于 03 批, 均为业务型地球静止气象卫星. 可见光和红外自旋转扫描辐射计 (VISSR, Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 是搭载在 FY-2 上的主要仪器, 每隔一到半小时从北向南扫描获取一幅圆盘影像 (根据汛期服

收稿日期: 2012-03-21, 修回日期: 2012-11-10

Received date: 2012-03-21, revised date: 2012-11-10

基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY200906036); 国家重点基础研究发展计划 (2011CB403401); 国家自然科学基金 (41105010)

Foundation items: Supported by Meteorological Special Project under Contract (GYHY200906036), National Key Basic Research and Development Program (973 Program) (2011CB403401), and National Natural Science Foundation of China (41105010)

作者简介 (Biography): 徐娜 (1982-), 女, 山东烟台人, 博士, 主要研究领域为定量遥感和星载传感器的辐射定标. E-mail: xuna@cma.gov.cn

务及测风需求调整观测频次). 02 批和 03 批 VISSR 具有 1 个短波红外和 3 个热红外通道, 星下点分辨率是 5 km; 1 个可见光通道, 星下点分辨率是 1.25 km. 两颗 FY-2 静止卫星的错时观测可以提供每半小时到 15 min 一次的高频次观测资料, 为动态监测各类突发灾害性天气的发展提供了有力工具, 尤其是在台风监测预报中发挥重要作用.

高精度的辐射定标是卫星资料定量应用的基本保障. 卫星传感器对地球目标的观测是以仪器信号的形式输出的, 必须经过一定的转换得到绝对物理量才能供用户使用. 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换算关系的过程. 而且卫星发射上天后感感仪器性能会随着时间发生变化, 卫星数据的观测精度不可避免产生偏差, 这就需要随之对定标方案进行不断调整, 所以定标的精度直接影响遥感定量应用的质量. 通常情况下, 仪器输出信号与其接收到目标入瞳辐射之间可以认为是线性相关的, 因此只要确定几组信号与入瞳辐射间的对应关系就可以通过线性回归进行定标. 但是, 我们在分析时发现 FY-2D 辐射计输入能量与输出信号间具有明显的非线性特征, 导致利用线性定标结果监测台风等低温目标时会产生显著偏差, 严重影响 FY-2 的定量应用性能.

文中介绍了基于高光谱交叉定标方法, 针对 FY-2D 红外窗区通道的非线性特性进行的非线性订正方案. 并从多方面对定标结果进行检验, 考察了该方案的稳定性, 定标结果与观测结果的一致性, 以及应用在台风监测中的效果.

1 发射前实验室定标数据分析

FY-2D 红外通道采用的是碲镉汞探测器. 参照卫星在轨运行时环境温度实际变化分布, FY-2D 辐射计实验室定标是根据辐冷器二级冷块温度和辐射计主镜、次镜温度共 9 种工况, 每种工况进行一组定标. 每种工况黑体温度依次设定为: 180 K、190 K、200 K、210 K、220 K、230 K、245 K、260 K、265 K、280 K、300 K、305 K、320 K、330 K、340 K. 红外窗区通道测量 14 个温度点. 星上黑体在每种工况中均切入后光路两次, 获取定标数据.

根据实验室的测量数据即可以得到目标辐亮度和辐射计输出电压的关系. 目标辐亮度是根据黑体温度和通道光谱响应函数由普朗克公式卷积计算得到^[1]. 根据卫星研制部门提供的卫星发射前扫描辐射计设定的电路输出量化关系(A/D 量化关系), 可

以将电压值线性转换为计数值. 最终得到目标辐亮度和计数值关系, 建立定标关系式. 通常情况下认为辐亮度 R 与计数值 DN (电压 U) 为线性关系, 定标式可以表示为

$$R = a * (m * DN + n) + b \quad (1)$$

其中 a 和 b 为定标系数, m 和 n 为 A/D 量化转换系数. FY-2 辐射计的量化等级是 10 bit, 对应 1024 个计数值(范围是 0 ~ 1023).

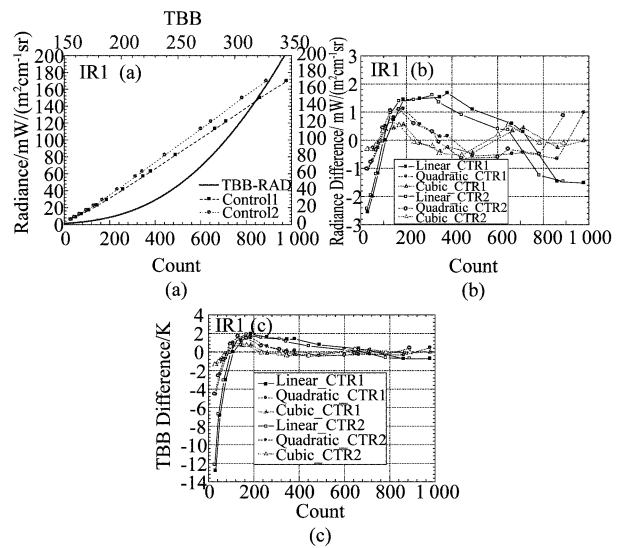


图 1 (a) 实验室测量 FY-2D IR1 通道目标辐亮度与辐射计计数值的对应关系, (b) 辐亮度偏差分布, (c) 亮温偏差分布(其中 Control1 (CTR1) 和 Control2 (CTR2) 分别表示两种不同工况)

Fig. 1 The relation between radiance and responding count for FY-2D IR1 (a) and bias distributions for different fitting methods (b) ~ (c) (Control1 (CTR1) and Control2 (CTR2) denote two different working conditions)

图 1(a) 显示了实验室测量其中两种工况下, FY-2D IR1 窗区通道(中心波数 10.8 μm) 目标辐亮度与辐射计响应计数值的对应关系(以虚线表示), 同时为了方便对比, 图中还用实线给出了该通道辐亮度 R 和亮温 TBB 的对应关系(对应顶部横坐标). 图 1(b) ~ (c) 给出了分别采用线性拟合、二次项拟合和三次项拟合得到的辐射值与实测结果的偏差分布, 其中图(b)为辐亮度偏差, 图(c)为对应的亮温偏差. 与图 1 相似, 图 2 为 IR2 通道(中心波数 12 μm) 结果. 由图可见, 对于这两个通道三次项拟合的偏差最小, 说明在高和低能量端都存在非线性. 根据普朗克函数特性, 亮温随辐亮度的变化率在低温端远远大于高温端, 因此低温端非线性对亮温的影响最大. 亮温在 180 K 附近, IR1 和 IR2 的线性拟合偏

差分别约 12 K 和 9 K. 亮温大于 300 K 时,IR1 和 IR2 的线性拟合偏差基本小于 1K.

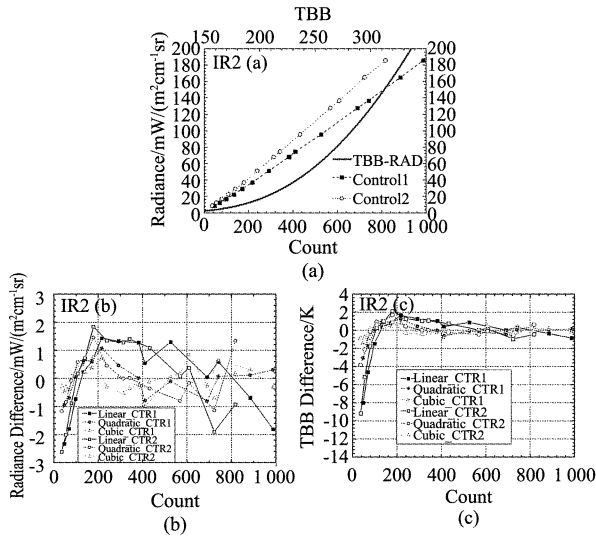


图2 (a)实验室测量 FY-2D IR2 通道目标辐亮度与辐射计计数值的对应关系,(b)辐亮度偏差分布,(c)亮温偏差分布(其中 Control1 (CTR1) 和 Control2 (CTR2) 分别表示两种不同工况)

Fig. 2 the relation between radiance and responding count for FY-2D IR2 (a) and bias distributions for different fitting methods (b) ~ (c)

2 在轨辐射定标

FY-2 采用自旋稳定方式的卫星平台,用于星上红外定标的参考黑体是在目标光路后端插入,星上黑体辐射通过反射镜进入接收器,反射镜之前光路上各光学部件的热辐射的影响无法在定标中考虑. 而由于受日照和宇宙环境的影响,靠近外端的光学镜(主、次、折镜)温度变化较为频繁与显著,其对目标观测光路的辐射影响无法反应到星上内光路进行的黑体定标中^[2-3],因此,只能选择替代的全光路定标方法. 为了实现高频次、高精度的轨定标,FY-2 业务系统中选用以极轨卫星传感器为基准的交叉定标方法进行红外通道的在轨定标^[4-6],目前采用的基准传感器为国际公认的搭载在 METOP 上的高光谱探测器 IASI^[7-16].

交叉定标法是利用定标精度较高的传感器作为参考标准,选择相同或相近观测条件下的资料,建立参考传感器入瞳辐亮度与目标传感器测量值之间的关系,实现对目标传感器的定标. 如图 3 所示,该方法主要分为三个步骤^[6]:1) 样本匹配和筛选,即通过对两星交叉观测区域的数据进行匹配和筛选,使其尽可能满足时间、空间和观测几何的一致性,这是

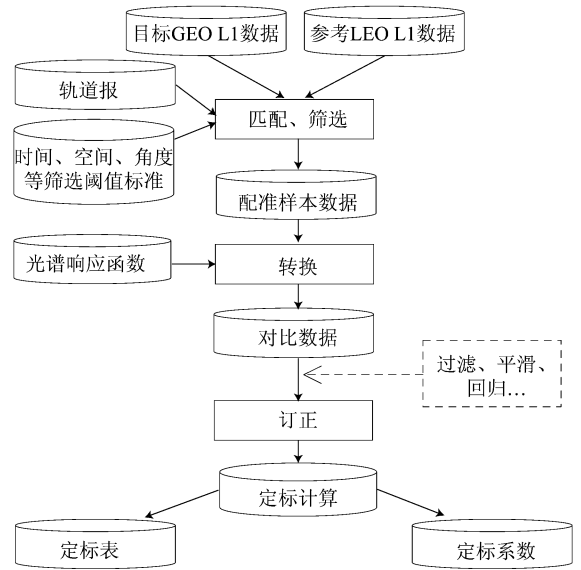


图3 LEO-GEO 交叉定标流程介绍

Fig. 3 Flowchart of cross-calibration between LEO and GEO

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;2) 数据转换,即将两仪器的匹配样本数据转换成可直接比较的形式,主要包括单位转换、光谱卷积或光谱补偿的处理;3) 定标计算,将经过数据转换和过滤等转换后匹配样本数据根据经验拟合关系进行定标. 目前均采用线性拟合公式建立辐亮度与计数值之间定标关系式,最终再通过普朗克逆函数将辐亮度转换为亮温得到 DN ~ TBB 转换关系的定标表.

3 非线性特性分析及其订正方案

根据卫星轨道运行特点,METOP 每个白天和晚上各有 1 ~ 2 轨经过 FY-2 星下点附近区域,最终通过匹配和筛选后的样本约 600 个/天. 卫星仪器输出信号响应关系受星上工作环境状况影响会产生变化,因此定标结果也会随着工况进行调整. 由于采用自旋稳定方式,一天内 FY-2 星上工况会发生略微变化,但相邻天邻近时刻的工况基本一致. 为了保证定标结果的稳定性,选择 5 天相近时刻的匹配样本滑动回归来进行定标计算. 图 4 显示了 FY-2D 一次定标过程所选用的匹配样本点的分布,样本日期是 2012 年 01 月 01 日 ~ 05 日,时间是世界时 2 时 ~ 4 时. 图 4(a)为样本点的空间分布,图 4(b)、(c)分别为两个窗区通道 FY-2D 计数值与 IASI 实测辐亮度的对应关系,并且图中给出了线性、二次项和三次项拟合曲线. FY-2 数据转换过程中采用反相关的 A/D

量化关系,即计数值由 0 增长到 1023 对应辐射值的减小.由图可见,经过时间、空间、角度判据等筛选得到的样本相关性非常好,基本没有野点,不同拟合曲线在两端有明显差异.

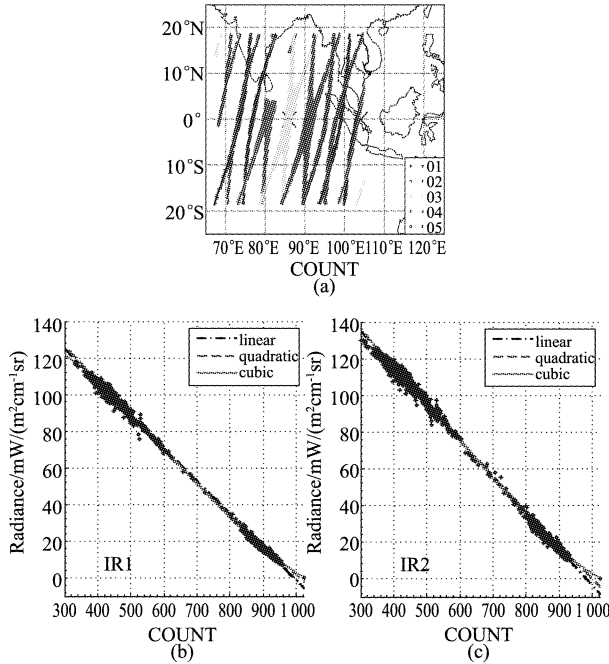


图 4 FY-2D 和 MRTOP/IASI 交叉匹配样本分布 (20120101 ~ 20120105, 2:00 ~ 4:00UTC)

Fig. 4 The distribution of collocation samples between MR-TOP/IASI and FY-2D/VISSR for cross-calibration (20120101 ~ 20120105, 2:00 ~ 4:00UTC)

将所有样本按计数值大小分四个区间,分别考察每种拟合方法在不同区间的拟合效果,如图 5 所示.自上而下分别对应四个计数值区间,大约对应的温度区间分别为 350 ~ 280 K、280 ~ 220 K、220 ~ 200 K 和 200 ~ 180 K (参照图 1(a) 和图 2(a) 中实线所示).前两列为通道 IR1 的结果,其中第一列为该区间内的样本点对应关系和三种拟合曲线,第二列为每种拟合偏差的概率分布,图中 mean1、mean2 和 mean3 分别表示该区间内不同拟合方法的平均偏差,单位 $\text{mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$.后两列为通道 IR2 的结果,各图含义与前两列类似.由图可见,三次项拟合偏差在这四个区间都近似呈正态分布,在第 1-2 区间与线性拟合结果较为接近,而后两个区间特别是第 3 区间非线性的偏差最小;二次项拟合偏差较大.对于这两个通道,线性拟合结果在第 3 区间普遍偏高,平均偏差分别为 $0.8 \text{ mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$,约对应 2 K 亮温偏差,而三次项拟合平均偏差小于 $0.05 \text{ mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$;在第 4 区间

线性拟合结果偏低,平均偏差分别为 $0.38 \text{ mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$ 和 $0.13 \text{ mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$,约对应 1 ~ 2 K 亮温偏差,而三次项拟合平均偏差显著减小.不同拟合曲线在四个区间的比较可见,非线性拟合与线性拟合在高温端 ($\text{TBB} > 300 \text{ K}$) 和低温端 ($\text{TBB} < 190 \text{ K}$) 差异最大.由于高温端绝对辐射值大而且亮温随辐射变化缓慢,非线性对亮温的影响小于 1K.而低温端正好相反,随着温度的降低这种差异引起的亮温偏差可达 10 K 多,严重影响低温目标的观测结果.图 5 所呈现的结果与实验室定标分析结论非常吻合.

在轨运行时,卫星接收到地球目标的人瞳辐射是经过下面定标公式转换得到的,即

$$R_{\text{target}} = f(\text{DN} - \text{DN}_s) - R_s \quad (2)$$

式中, f 表示定标关系方程, R_s 为宇宙背景辐射和仪器噪声,而 DN_s 为仪器对 R_s 辐射的响应计数值.通常情况下, $R_s \approx 0$, DN_s 很小,所以式(2)应该近似过原点,即对于 FY-2D 当其扫描地球外目标时 VISSR 响应计数值应约为 1023.比较图 5 中第四区间的拟合曲线可以发现,对于 IR1 和 IR2 线性拟合曲线分别在计数值约 990 和 980 时为零辐射,计数值为 1023 时对应明显的负能量,这样会导致计算结果大大低于真实值,而三次项拟合曲线近似过 (1023, 0) 结果最合理.

上面的比较分析结果表明, FY-2D 扫描辐射计对辐射信号的非线性响应在低温端表现最为显著,因此需要进行非线性订正.为了保证定标结果的稳定性,这里我们采用分段拟合的方法进行定标计算.对于大于 250 K 的匹配样本(对应 FY-2D 计数值约 700)仍采用线性拟合,而小于 250 K 的样本采用三次项拟合.同时为了保证定标结果的连续性,取两种拟合曲线在 600 ~ 800 计数值区间内的交叉点作为线性到非线性的过渡点 DN_0 .定标方案如下式所示,

$$R = A_1 * \text{DN} + A_2 \quad (\text{DN} < \text{DN}_0)$$

$$R = B_1 * \text{DN}^2 + B_2 * \text{DN} + B_3 \quad (\text{DN} > \text{DN}_0) \quad (3)$$

其中

$$A_1 * \text{DN}_0 + A_2 = B_1 * \text{DN}_0^2 + B_2 * \text{DN}_0 + B_3 \quad (4)$$

且 $800 > \text{DN}_0 > 600$

图 6 比较了非线性订正前后低温端 ($\text{DN} > 600$) 定标表(左侧)及其差异(右侧).其中非线性订正后定标表(简称非线性定标表)表示为“Nonlinear”,订正前定标表(简称线性定标表)表示为“Linear”,下同.由图可见,非线性订正后低温端亮温提高约 7 K,而且可探测动态范围增加约 15 个计数值.

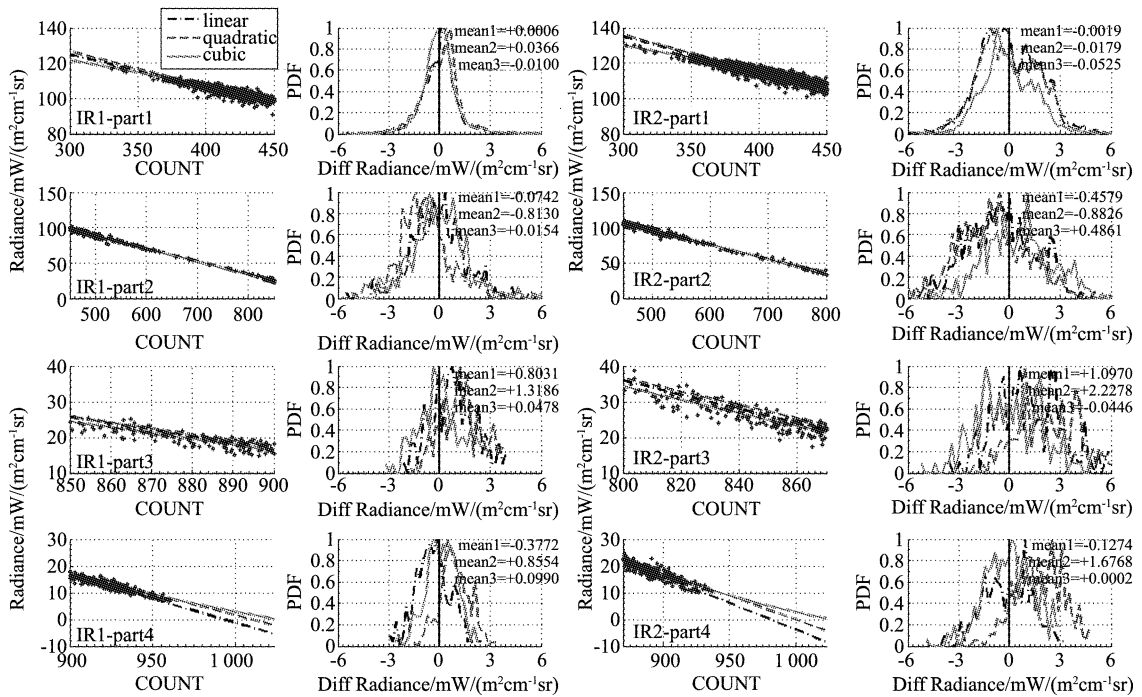


图 5 不同计数值区间内匹配样本点分布和拟合偏差的概率分布

Fig. 5 The regression distributions of collocation samples and the probability distributions of radiance bias for different fitting methods during four different count regions

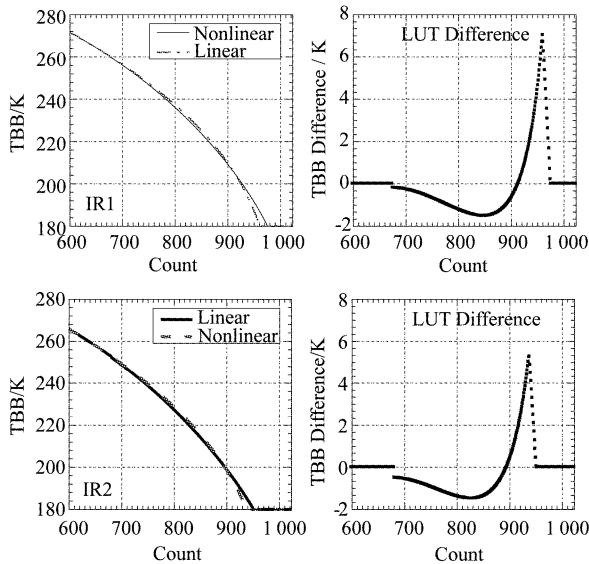


图 6 线性(虚线)和非线性(实线)定标表比较(计数值大于 600)左侧:定标表 右侧:定标表相同计数值处亮温差异
Fig. 6 Comparison of calibration look-up tables (CAL_LUT) separately calculated by linear and nonlinear methods (only displaying the part counts exceeding 600) Left: CAL_LUT Right: LUT difference at the same count

4 检验与分析

4.1 定标一致性检验

基于交叉观测的匹配样本,通过与基准传感器观

测结果的比较,可以实现对目标传感器定标结果的修正,同时也反映辐射定标的质量.为了使比较结果更加客观,这里选择另一搭载在 AUQA 上的高光谱探测仪 AIRS 作为比较基准.基于 2011 年 7 月 20000 多个匹配样本,图 7 比较了基于上述分段定标方法得到的 FY-2D 亮温与 AIRS 观测结果的一致性,并通过线性回归给出了修正系数.图 7(a)和(b)分别显示 IR1 和 IR2 的匹配点分布,同时给出了回归方程.图 7(c)给出了基于 7(a)和(b)中修正系数(即回归系数)对 FY-2D 两通道亮温的修正量.由图可见,FY2D 亮温与 AIRS 具有非常高的线性相关性,相关性达 99.7%.基于线性回归修正系数,亮温由 180K 变为 320 K,IR1-2 通道的亮温修正量小于-0.6,而且修正量的变化小于 0.2 K.这说明 FY-2D 分段定标的亮温与 AIRS 观测结果间一致性非常高.

4.2 台风监测检验

台风监测时主要利用台风云墙在 10.8 μm 窗区通道的亮温产品进行定强和定位分析.通过台风区域亮温对比,可以最直接反映低温端定标精度.以 2011 年 11 号台风“南玛都”为例,比较非线性订正前后的定标亮温,并与 MODIS 观测结果进行对比分析.并且为了降低定位及混合像元等因素的影响这里采用 0.2° 等经纬度投影方式将台风投影到相同区域,该台风

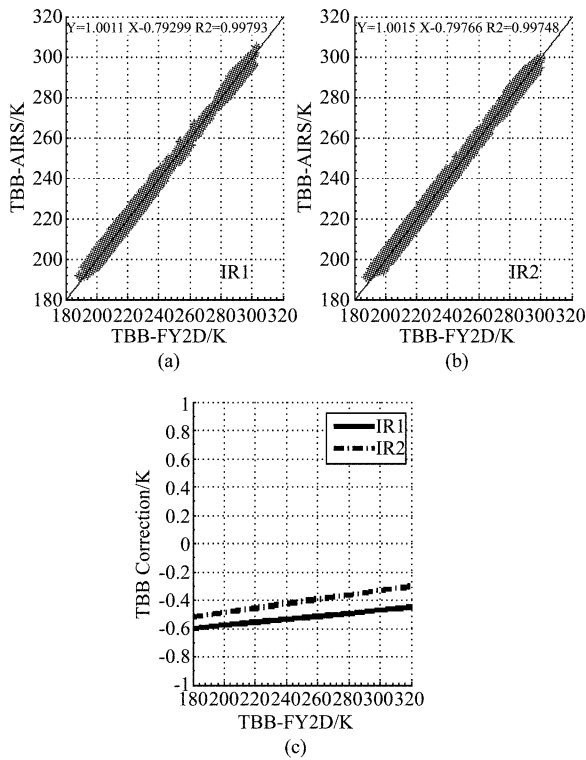


图7 FY-2D与AQUA/AIRS观测亮温一致性比较(a,b)及亮温修正量分布(c)
Fig.7 Consistency test of bright temperature between FY-2D and AQUA/AIRS, and the correction distributions for FY-2D IR1 and IR2

生成于8月23日并于27日11时发展为超强台风.表1挑选了与MODIS开始扫描时间差异小于5min且强度为超强台风的时次进行统计分析.其中,TBBmin 10%分别表示台风云墙的最低亮温和10%最低亮温平均值,DTBB表示与MODIS的亮温偏差.与MODIS对比结果表明:1)FY2D线性定标结果明显偏低,云墙出现饱和(TBB≤180K),最低亮温偏差大于7.6K,而10%最低平均亮温偏差大于1.4K(TBB≤180K的样本没有参与统计);2)FY2D非线性定标亮温明显提高,饱和现象消失,且与MODIS非常接近,最低亮温偏低1.1K,10%最低亮温偏高0.9K,与线性结果相比精度提高大于7K.

5 结论

结合发射前实验室定标数据和交叉匹配样本,分析了FY-2D红外探测器在两个红外窗区通道的非线性特征.结果表明:1)这两个通道在高和低信号端都存在非线性,但是由于亮温随辐亮度的变化率在低温端远远大于高温端,低温端非线性对亮温的影响最大.实验室数据分析显示,亮温在180K附

表1 台风云壁10.8 μm红外窗区最低亮温对比(单位:K)
Table 1 Minimum TBB Comparison of 10.8 μm channel between FY-2D and AQUA/MODIS for Typhoon case in 28 August 2011 (unit : K)

	TBBmin	DTBB	TBBmin 10%	DTBB
MODIS	187.6		196.4	
FY2D Linear	<180	> -7.6	<195	> -1.4
FY2D Nonlinear	186.5	-1.1	197.3	0.9

近,线性拟合偏差约12K,亮温大于300K时,线性拟合偏差基本小于1K.2)不同拟合方法比较可见,三次项拟合的误差最小.根据分析结论,针对FY-2D的非线性特性同时为保证定标结果的稳定性,文中采用分段拟合的定标方案,对低温端进行非线性订正.

为了考察定标方案的可行性,从多方面对定标方案进行了验证.基于与另一高光谱仪器AIRS的交叉匹配样本,分析FY2D定标亮温与AIRS观测结果的一致性相关性,结果显示两者观测结果间具有非常高的一致性,亮温由180K变为320K,IR1-2通道的亮温修正量小于-0.6,而且修正量的变化小于0.2K.通过台风个例的分析,非线性订正后定标对低温端的定标精度改进非常显著,与线性结果比较亮温提升大于7K,非线性定标结果与MODIS观测结果更为接近.

综上所述,本文介绍的分段拟合的交叉定标方案稳定可靠,尤其是非线性订正对低温端定标结果有显著改善,将大大提升FY-2在台风监测中的观测精度.

致谢

中科院技术物理研究所组织进行了FY-2扫描辐射计红外通道实验室定标工作并提供定标数据,在此表示感谢.

REFERENCES

[1] RONG Zhi-Guo, QIU Kang-Mu, HU Xiu-Qing, et al. Comparison of pre-launch calibration in lab with the radiometric calibration in orbit for FY-2B meteorological satellite sir channel [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (戎志国,邱康睦,胡秀清,等. FY-2B 气象卫星红外通道发射前实验室定标与在轨辐射定标比较[J]. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(6):408-412.

[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 卫星扫描辐射计在轨定标方法, *中国空间科学技术*), 2000, 1, 67-71.

[3] ZHU Guang-Ze. Radiation calibration of scanning radiometer for meteorological satellite [J]. *Chinese Space Science and Technology* (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, 5, 27-33.

- [4] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, LU Feng, *et al.* Inter-calibration of FY-2B IR channel with NOAA satellites [J]. *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 - 1492.
- [5] XU Na, HU Xiu-Qing, CHEN Lin, *et al.* Cross-calibration of FY-2E/VISSR infrared window and water vapor channels with TERRA/MODIS [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (徐娜, 胡秀清, 陈林等. 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. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(4): 319 - 384.
- [6] XU Na, HU Xiu-Qing, CHEN Lin, *et al.* Inter-calibration of infrared channels of FY-2/VISSR via high-spectral resolution sensors IASI and AIRS [J]. *Journal of Remote Sensing* (徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. 基于高光谱传感器 IASI 和 AIRS 的 FY-2 静止卫星 VISSR 红外通道的交叉定标. *遥感学报*), 2012, **16**(5): 939 - 952.
- [7] Gunshor M M, Schmit T J, Menzel W P. Inter-calibration of the infrared window and water vapor channels on operational geostationary environmental satellites using a single polar-orbiting satellite [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2004, **21**: 61 - 68.
- [8] Wu X. GSICS GOES-AIRS Inter-Calibration Algorithm at NOAA GPRC. Draft version, 2009.
- [9] ZHANG R, WANG Y. Radiometric calibration of FY-2C meteorological satellite and its result analysis [J]. *Aerospace Shanghai*, 2005, supplement: 31 - 35.
- [10] Tahara Y, Kato K. New spectral compensation method for inter-calibration using high spectral resolution Sounder [J]. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 2009, **52**: 1 - 37.
- [11] Tahara Y. New approach to inter-calibration using high spectral resolution sounder [J]. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 2008, **50**: 1 - 14.
- [12] Gunshor M M, Schmit T J, Menzel W P *et al.* Inter-calibration of broadband geostationary imagers using AIRS [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2009, **26**: 746 - 758.
- [13] Hiroimi O. Theoretical basis for MTSAT-AIRS/IASI inter-calibration algorithm for GSICS, 2009.
- [14] Wang L, Cao C, Goldberg M. Inter-calibration of GOES-11 and GOES-12 water vapor channels with MetOp/IASI hyperspectral measurements [J]. *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, 2009, **26**: 1843 - 1855.
- [15] Timothy H. ATBD for prototype GSICS SEVIRI-IASI inter-calibration. 2010, from http://www.eumetsat.int/groups/sir/documents/document/PDF_GSICS_ATBD_INTERCALIB_EN.pdf.
- [16] Tim J H, Wu X, Yu F, *et al.* GSICS inter-calibration of infrared channels of geostationary imagers using metop/IASI [J]. *IEEE TGARS*, 2012, submitted for this issue.
- ~~~~~
- (上接 318 页)
- [3] Kuki K N, Olival M A, Costa A C. The simulated effects of iron dust and acidity during the early stages of establishment of two coastal plant species [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2009, **196**: 287 - 295.
- [4] Keir S, John S C. Dust as a nutrient source for Fynbos Ecosystems, South Africa [J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(4): 550 - 561.
- [5] Kumar S S, Singh N A, Kumar V, *et al.* Impact of dust emission on plant vegetation in the vicinity of cement plant [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2008, **7**(1): 31 - 35.
- [6] LI Qiao-Yun, LI E, GUAN Xin, *et al.* Effects of dust-fall upon the anatomical structure of cotton leaves [J]. *Ecology and Environmental Sciences* (李巧云, 李鄂, 关欣, 等. 降尘对棉花叶片解剖结构的影响. *生态环境学报*), 2010, **19**(6): 1318 - 1321.
- [7] Shenk W E, CURIAN R J. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements [J]. *Monthly Weather Review*, 1974, **102**: 820 - 837.
- [8] Griggs M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data [J]. *Air Pollution Control Association*, 1975, **25**: 622 - 625.
- [9] Carison T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data [J]. *Monthly Weather Review*, 1979, **107**: 322 - 335.
- [10] ZHENG Xin-Jiang, LU Wen-Jie, LUO Jing-Ning. Research on the dust storm monitoring using multi-channel meteorological satellite data [J]. *Journal of remote sensing* (郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究. *遥感学报*), 2001, **5**(4): 301 - 305.
- [11] LUO Jing-Ning, FAN Yi-Da, SHI Pei-Jun, *et al.* Information-comparable method of monitoring the intensity of dust storm by multisource data of remote sensing [J]. *Journal of Natural Disasters* (罗敬宁, 范一大, 史培军, 等. 多源遥感数据沙尘暴强度监测的信息可比方法. *自然灾害学报*), 2003, **12**(2): 28 - 34.
- [12] XIAO Ji-Dong, WANG Xi-Yuan, CHEN Ai-Jin. Model of sand storm satellite remote sensing monitoring index using EOS/MODIS data [J]. *Arid Land Geography* (肖继东, 汪溪远, 陈爱京. 沙尘暴 EOS/MODIS 监测指数模型. *干旱区地理*), 2007, **30**(6): 902 - 906.
- [13] XIAO Ji-Dong, WANG Xi-Yuan, CHEN Ai-Jin. Study on satellite remote sensing index model for monitoring dust storms using EOS/MODIS data [J]. *Arid Zone research* (肖继东, 汪溪远, 陈爱京. 沙尘暴 EOS/MODIS 卫星遥感监测指数模型. *干旱区研究*), 2007, **24**(2): 268 - 272.
- [14] HAI Quan-Sheng, BAO Yu-Hai, Alatenguoya, *et al.* New method to identify sand and dust storm by using remote sensing technique—with inner Mongolia autonomous region as example [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (海全胜, 包玉海, 阿拉腾图雅, 等. 利用遥感手段判识沙尘暴的一种新方法—以内蒙古地区为例. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2): 129 - 132.
- [15] JI Wen-Jun, LI Xi, LI Xue-Cheng, *et al.* Using different data mining algorithms to predict soil organic matter based on visible-near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (纪文君, 李曦, 李成学, 等. 基于全谱数据挖掘技术的土壤有机质高光谱预测建模研究. *光谱学与光谱分析*), 2012, **32**(9): 2393 - 2398.
- [16] WANG Tao, LIU Yang, WU Hai-Yun, *et al.* Influence of foliar dust on crop reflectance spectrum and nitrogen monitoring [J]. *Spectroscopy and spectral analysis* (王涛, 刘洋, 吴海云, 等. 叶面尘对作物反射光谱及氮营养监测的影响. *光谱学与光谱分析*), 2012, **32**(7): 1895 - 1898.