

风云三号B星 (FY-3B) 上地球辐射探测仪的绝对辐射定标及其与Aqua卫星上云和地球辐射能量系统 (CERES) 数据之间的对比

邱红¹ 胡丽琴¹ 张艳¹ 陆段军² 齐瑾¹

(1 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 中国科学院上海技术物理所, 上海 200083)

摘要: 风云三号B星 (FY-3B) 携带的地球辐射探测仪 (ERM) 通过窄视场 (NFOV) 扫描和宽视场 (WFOV) 非扫描方式来观测地球大气。每种视场包括两个宽带通道, 即光谱范围在0.2~50 μm 的全波段通道和在0.2~4.3 μm 之间的短波通道。将ERM观测去滤波的长波辐射、短波辐射与美国地球观测系统 (EOS) Aqua卫星携带的云和地球辐射能量系统 (CERES) 飞行模式 (FM) 3中观测数据对比来检验ERM的定标。ERM的长波辐射和短波辐射与CERES数据具有较好的相关性, 二者之间存在一定系统偏差。利用CERES数据对ERM数据做光谱订正。经过订正后, ERM长波辐射偏差会从-3.00W/(sr·m²)减小到-0.60W/(sr·m²), 短波辐射的偏差从6.00W/(sr·m²)减小到4.00W/(sr·m²)。根据ERM在轨内定标数据分析了ERM长波及短波通道辐射响应的稳定性, 结果显示全波通道长波部分较为稳定并且变化率小于1.5%, 与之相比, 短波通道变化较大, 变化率超过3%。这些变化可能是由于探测器的退化而引起的, NFOV短波通道在轨运行8个月后因故障失效。

关键词: 绝对定标, 地球辐射收支 (ERB), 地球辐射探测仪 (ERM), 光谱订正

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.012

Absolute Radiometric Calibration of Earth Radiation Measurement on FY-3B and Its Comparison with CERES/Aqua Data

Qiu Hong¹, Hu Liqin¹, Zhang Yan¹, Lu Duanjun², Qi Jin¹

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

2 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083)

Abstract: The Earth Radiation Measurement (ERM) instrument onboard FengYun (FY)-3B satellite observes the Earth's atmosphere with a narrow scanning field of view (NFOV) and a wide nonscanning FOV (WFOV). For each field of view, the measurements are made from two broadband channels: a total waveband channel covering 0.2–50 μm and a shortwave (SW) band covering 0.2–4.3 μm . The validation to the ERM calibration was carried out by comparing the unfiltered longwave (LW) and SW radiances from ERM with those from Clouds and Earth's Radiation Energy System (CERES) flight model (FM) 3 onboard Earth Observing System Aqua satellite. While the ERM LW and SW radiances have a good correlation with CERES data, there is a systemic bias between the two data sets. A spectral correction is made for the ERM data using the CERES data. After the correction, the error of the ERM LW radiance is reduced from -3.00 to -0.60 W/(sr·m²). For the SW radiance, the bias is reduced from 6.00 to 4.00 W/(sr·m²). Based on the ERM in-orbit calibration data, the stability of the ERM LW radiometric response is analyzed, and it is shown that the gains are stable with a variation of less than 1.5% during its first 9 months in orbit. However, the gains at the SW channels have larger changes and exceed 3%. These drifts might be caused by the detector degradation. Also, the NFOV scanner at the SW channel is no longer working after its 8 months in orbit.

Keywords: Absolute calibration, Earth radiation budget (ERB), Earth Radiation Measurement (ERM), spectral correction

收稿日期: 2013年4月3日; 修回日期: 2013年6月30日
第一作者: 邱红 (1968—), Email: qiu hong@cma.gov.cn
资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (2010CB950800)

1 引言

地球大气系统向外的长波辐射与其吸收的太阳短波辐射在总量上是相平衡的^[1]。但是, 在较短的时间尺度或区域上, 吸收的太阳辐射与发射的红外辐射之

间的不平衡是引导大气环流和海洋循环的主要因素。作为全球气候观测系统中一个重要的气候变量,地球辐射收支(ERB)测量可以用于验证气候模式输出,确定数值预报模式中的云参数化方案,以及分析痕量气体、气溶胶和云对于气候变化的影响。

ERB观测在卫星时代开始之时就已起步。1958年,美国著名卫星气象学家Suomi首次提出了卫星ERB观测概念^[2],美国威斯康辛大学研发了一种自积分辐射计,分别在1959和1962年搭载于Explore VII及TIROS-IV卫星在轨观测上^[3]。扫描式ERB辐射计在20世纪60年代后期,先后由Nimbus-II/III和ESSA-VII卫星携带升空,其在星下点地面的分辨率小于80km,卫星观测到的地球反射太阳辐射和射出长波辐射被用来计算净辐射和反照率^[4]。在20世纪70年代,更先进的ERB观测仪器由Nimbus-6/7卫星携带升空,通过窄视场和宽视场,在几个光谱通道来观测地球吸收和发射的能量。20世纪80年代中期,NOAA-9, NOAA-10和ERBS卫星同时携带了地球辐射收支试验(ERBE)仪器^[5],基于改进的采样方式和可追溯的辐射定标,卫星ERB观测具有更高的定标精度。20世纪90年代末期开始,美国国家航空航天局(NASA)先后在热带降雨测量卫星(TRMM)和EOS/Terra和Aqua卫星上装载了新一代辐射收支探测仪——云和地球辐射能量系统(CERES)仪器系统。搭载在Terra和Aqua卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)和TRMM卫星上的可见光红外扫描仪(VIRS),提供了丰富的云的观测,使地球辐射观测具有更高的精度和空间分辨率,使云对辐射收支的影响效应及其不确定性的研究得以进行^[6]。针对气候监测需求,NASA科学家对CERES的7年观测数据进行了评估分析,结果显示CERES观测具有较好的稳定性^[7,8]。从原型飞行模式(PFM)到1-4型飞行模式(FM1-FM4),所有CERES已提供超过10年的观测数据。2011年10月28日发射的Suomi NPP卫星携带了CERES(FM5)载荷,并且将在未来的10年中继续提供ERB观测^[9,10]。为了对云、水汽和辐射随时间的变化有更好的理解,欧洲发展了地球同步卫星轨道上的ERB观测仪器(GERB)^[11],并在2002和2006年分别由Meteosat-8和9卫星搭载,实现对ERB日变化的观测^[12]。

ERB的观测也是中国第二代极轨气象卫星风云三号(FY-3)系列卫星的主要任务之一。分别于2008年5月27日和2010年11月5日发射的FY-3A和FY-3B上先后携带了两台地球辐射探测仪(ERM)。FY-3A卫星上午轨道,在地方时10:20过境,而FY-3B卫星为下午轨道,过境时间为13:50。中国FY-3A/B卫星携带的两

台ERM仪器,与Terra、Aqua以及Suomi NPP卫星上的CERES仪器,将可能为地球辐射观测提供时空覆盖面更广的、不间断的气候数据记录。

ERM仪器通过以扫描窄视场和非扫描宽视场方式,通过波长覆盖范围分别为0.2~50 μm 的全波通道和波长范围为0.2~4.3 μm 的短波通道来观测地球反射太阳短波辐射和射出长波辐射,结合FY-3卫星上可见光红外扫描辐射计(VIRR)上的云检测产品,可以获得大气层顶(TOA)去滤波的地球反射太阳短波辐射和射出的长波辐射亮度和辐射通量。利用FY-3卫星上的太阳辐射监测仪(SIM)获取到的入射太阳辐照度,可以得到TOA的反照率。令人遗憾的是这两颗卫星在轨道运行不到两年的时间内,其携带的ERM仪器中的扫描视场短波通道均发生通道辐射响应急剧衰减的问题,短时间迅速失效。关于ERM故障原因仍在调查中。

本文第2节首先介绍了ERM设备的特性,第3节讨论了仪器地面评估、在轨定标和观测数据处理方法,第4节基于交叉定标概念,通过对比FY-3B卫星ERM和Aqua卫星CERES/FM3定标观测数据,检验ERM观测精度,第5节基于星上内定标观测分析了ERM在轨稳定性,第6节是总结与讨论。

2 ERM仪器介绍

ERM仪器由中国科学院上海技术物理所设计、制造、地面测试和评估。ERM包括两个模块:一是通过窄视场扫描方式对地观测的扫描仪,二是通过宽视场凝视方式观测的非扫描仪。每个模块都有两个通道,一个是对在0.2~4.3 μm 光谱范围内的观测地球反射太阳辐射的短波通道,另一个是对在0.2~50 μm 整个光谱范围内的地球反射和地球射出的辐射敏感的全波通道。ERM的扫描仪和非扫描仪的描述详见表1。

每个ERM窄视场扫描仪的通道都包括一个卡塞

表1 ERM扫描视场与非扫描视场技术指标

(a) 扫描视场(NFOV)		
通道	0.2~4.3 μm	0.2~50 μm
视场	2°×2°	2°×2°
扫描范围	±50°	±50°
动态范围	0~370Wm ⁻² sr ⁻¹	0~500Wm ⁻² sr ⁻¹
定标精度	1%	0.8%
灵敏	0.4Wm ⁻² sr ⁻¹	0.4Wm ⁻² sr ⁻¹
两年在轨稳定性	<1%	<1%
(b) 非扫描视场(WFOV)		
通道	0.2~4.3 μm	0.2~50 μm
视场	120°	120°
动态范围	0~370Wm ⁻² sr ⁻¹	0~500Wm ⁻² sr ⁻¹
定标精度	1%	0.8%
灵敏度	0.4Wm ⁻² sr ⁻¹	0.4Wm ⁻² sr ⁻¹
两年在轨稳定性	<1%	<1%

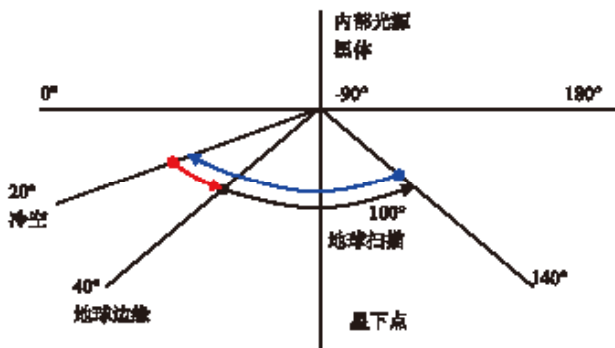


图1 窄视场扫描示意图

格林望远镜，一个传感器，一个内定标源（ICS）和一个扫描驱动马达。传感器是一个由主动和参考探测器组成的热敏电阻辐射探测器。每个扫描通道的瞬时视场是一个 $2^\circ \times 2^\circ$ 的矩形视场。对应FY-3卫星836km的轨道高度上，地球面积星下点空间分辨率大约为 $28\text{km} \times 35\text{km}$ 。非扫描宽视场的通道包括视场限制光栏、传感器、内定标源和驱动马达。非扫描宽视场中的传感器是一个主动腔式的探测器，其利用电加热功率使得主动腔持续保持在恒定温度来精确地确定探测辐射。圆锥角度为 120° 的限制光栏能够精确地确定视场范围。窄视场和宽视场的短波通道在传感器前方有一个石英玻璃滤光片，只有短波辐射可以通过。

为了使仪器在轨辐射响应能够保持较高的稳定性，ERM包含了一个内定标模块（ICM），用来监测轨道内每个探测通道对辐射响应的变化。ICM有两个黑体来测量窄视场和宽视场中全波通道的增益变化；黑体的温度是由铂电阻温度计（PRT）测定的。两个卤钨灯作为短波内定标源，用于检测短波通道增益的变化，卤钨灯的输出光强主要由硅光电二极管来监测。

ERM在轨运行模式包括地球观测模式和内定标模式。对于地球观测模式，非扫描宽视场通道中心指向星下点，以凝视方式观测地球，每500ms对全波和短波通道各采样一次；窄视场通道每4s对地球进行跨轨一次扫描，完成151个视场对地观测。窄视场的扫描模式见图1。当窄视场通道对地扫描开始时，用0.5s的

时间在 20° 的视角对冷空进行观测，作为地球辐射观测基准（冷空间测量），然后移到地球边缘，用3s的时间完成从 $40^\circ \sim 140^\circ$ 对地球的扫描，最后用0.3s的时间快速返回空间点（图2a）。

在正常在轨运行模式中，每个扫描和非扫描通道定标每天进行一次在轨辐射定标。采用线性方程计算各通道定标系数。在定标模式中，非扫描宽视场通道转到天顶方向（ 90° ），观测内定标源（ICS）进行定标采样。当窄视场通道的以4s周期的内定标开始时，辐射仪首先指向空间点来获取辐射基准，然后转向天顶（ 90° ）对ICS观测3s，最后返回空间点（图2b）。在每个辐射定标点的每个ERM通道需要大约2min的时间来完成内定标。

3 ERM数据处理综述

FY-3系列卫星ERM的地面处理系统包括一级数据预处理和一个二级产品处理。通过卫星GPS和扫描时间数据，来自地球目标ERM数据首先是地理定位，然后利用地面及在轨定标数据进行辐射定标，定标生成全波及短波滤波辐射亮度定标；进而生成去滤波的短波、长波辐射亮度和辐射通量。

3.1 发射前 ERM 的绝对定标

ERM发射前的定标包括确定仪器光谱响应和辐射响应。发射前地面ERM辐射的定标过程是在安装有辐射定标设备热真空罐内定标进行的，该真空罐是为包括ERM在内FY-3卫星载荷定标而制造的。地面ERM真空定标包括对于扫描及非扫描视场的全波及短波通道辐射响应标定和星上ICS定标。一个宽视场标准黑体是ERM地面真空定标的绝对定标参考源。为了使得定标具有可追溯性，首先通过PRT将1990年的国际温标（ITS-90）传递黑体定标源上，一个积分球被用作短波通道的定标源，通过标定过的全波通道进行辐射基准的传递。在辐射定标过程中，首先根据PRT测得的黑体温度、仪器光谱响应函数和普朗克函数计算黑体辐射，与窄视场和宽视场的全波通道观测建立线性定标方程，得到线性定标系数。其次，利用宽视场和窄

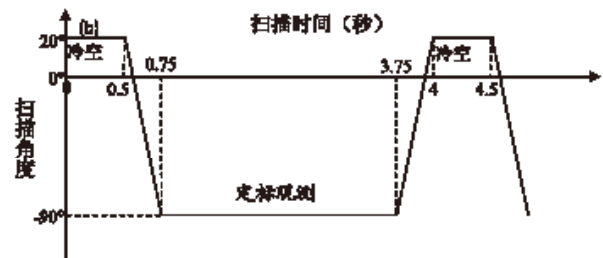
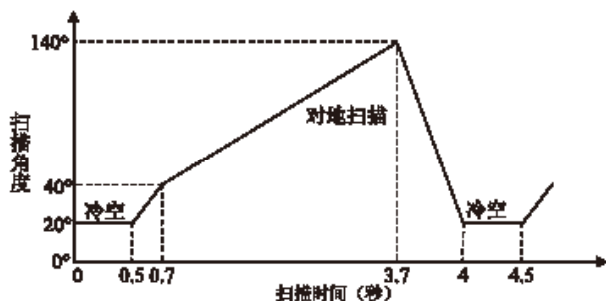


图2 在正常观测模式下窄视场通道的扫描时序图：（a）对地观测模式；（b）在轨定标观测模式

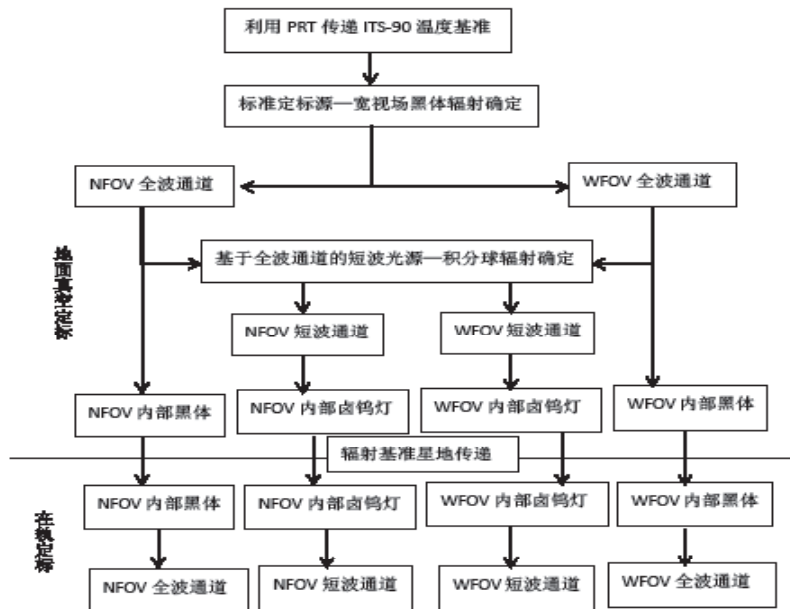


图3 ERM发射前及在轨定标示意图

视场的全波通道，以及短波通道滤光片的透过率对积分球的出射辐射进行标定定标；基于标定的积分球对短波通道辐射响应进行定标。对于ERM中ICS的发射辐射确定，即定标状态下的黑体和钨丝灯射出辐射，将根据定标过的全波及短波通道测量结果确定，将基于ITS-90的地面测量基准传递到在轨ERM的ICM内。图3是发射前后ERM定标的流程图。卫星在轨运行后，通过内定标源监测所有ERM通道辐射响应的增益变化，并做出校正。

在FY-3A/B星阶段，仪器研制方尚未设计ERM各个通道的光谱响应的综合测量手段及设备，目前采用分别测定通道光路上各个光学器件的反射率、透过率及热敏探测器表层黑漆的吸收率，通过各项乘积得到整个通道的光谱响应。

3.2 在轨辐射定标

卫星在轨运行期间，基于ERM内部定标系统，监测和校正4个通道辐射增益的变化。ERM在轨每天进行一次定标观测。在轨定标过程中，窄视场和宽视场的黑体准确温控在两个温度点上，利用基于ITS-90温度测量标准的辐射传递过程，黑体发射辐射在发射前定标中进行确定，基于黑体辐射及全波通道定标观测，利用线性回归来计算通道的增益。卤钨灯的灯亮和灯暗是短波通道定标中的两个辐射定标水平通过在轨定标确定通道增益变化来监测通道在轨稳定性；定标结果与发射前定标相比较，当其变化超过一定阈值时，新的在轨辐射定标系数就会更新。

利用定标系数，ERM对地观测的滤波辐射可以利

用线性方程来计算：

$$R = G \times C + I \quad (1)$$

其中， R 和 C 分别是地球目标滤波辐射值和探测器计数； G 和 I 是用来转换计数到辐亮度的定标系数。 G 和 I 可以从以下方程式中得到：

$$G = \frac{R_2 - R_1}{C_2 - C_1} \quad (2)$$

$$I = R_2 - G \times C_2 \quad (3)$$

其中， C_1 和 C_2 分别是通道对于两个辐射定标点通道向外输出计数值，是每次在轨定标观测的平均值； R_1 和 R_2 是在发射前定标确定的内定标源，黑体或灯在两个定标点发射辐射。黑体的温度由PRT确定，温控的误差小于0.1K。电流控制的卤钨灯亮时提供了高点辐射值，利用硅光电二极管来监测卤钨灯输出光强的变化。不幸的是，硅光电二极管信号在轨期间变化的太快，在卫星发射3个月后，宽视场和窄视场的硅光电二极管输出变化分别约2.21%和9.4%，因此失去了监测卤钨灯发射辐射变化的这个功能。目前对在轨的ERM来说，短波通道和全波通道中的短波部分没有太阳定标设计，计划在未来的ERM仪器设计。

3.3 滤波辐射的光谱订正

ERM全波及短波通道观测到的是滤波辐亮度，对于应用于科学研究的数据来说应该是经过去滤波处理的辐射。光谱校正处理用来将ERM测量到的滤波辐射转换为去滤波的短波和长波宽带辐射。光谱校正算法是基于一组包含滤波和去滤波辐射之间的回归方程，回归系数，也就是光谱校正系数（SCC），是基于大

型数据库通过辐射传输计算得出的。对于短波和长波辐射，光谱订正系数在白天及夜晚的陆地、海洋、积雪和云等情况有不同。随着太阳天顶角、观测角度和相对方位角的变化，SCC也会发生相应的变化。根据下面方程，由观测的滤波辐射计算去滤波的反射短波辐射和射出长波辐射：

$$m_u^{SW}(D) = a_0 + a_1 m_f^{SW}(D) + a_2 m_f^{TOT}(D) \quad (4)$$

$$m_u^{LW}(D) = b_0 + b_1 m_f^{SW}(D) + b_2 m_f^{TOT}(D) \quad (5)$$

$$m_u^{LW}(N) = c_0 + c_1 m_f^{TOT}(N) \quad (6)$$

其中 a_i ， b_i 和 c_i ($i=0,1,2$)是根据理论模拟计算得到回归系数，D和N分别表示白天和夜晚。

3.4 辐射到通量的转换

在气候研究中，TOA处的ERM去滤波辐射亮度需要转换成地球反射的太阳短波通量和地球射出长波通量。辐射通量是利用角度分布模型（ADM）转换的。在FY-3卫星发展初期，由于缺少足够的数据库，尚未建立ERM专门的ADM，在数据处理中采用ERBE和ERBE-like产品处理中使用12类目标的ERBE的ADMs^[13, 14]，来获得辐射通量的短波和长波宽频带。利用FY-3卫星上的VIRR云检测产品和静态的陆地覆盖数据，以及ERM视场的点扩展函数（PSF），将ERM的视场判识为12种ERBE类型（表2）中的一种。TOA上的长波和短波通量的转换可以用下式来表示：

$$F_j = \frac{\pi I_j}{R_i(\Omega)} \quad (j = SW, LW) \quad (7)$$

其中 F 是辐射通量， I 是去滤波辐射， $R(\Omega)$ 是ADMs。

4 ERM和CERES数据的比较

4.1 ERM 和 CERES 观测之间的比较

卫星地球辐射观测的验证对于其在气候研究中的应用非常重要。由于FY-3B卫星和EOS/Aqua卫星过境地方时相差15min，可通过比较FY-3B卫星上ERM和EOS/Aqua卫星上CERES（FM3）的去滤波辐射数据验证ERM窄视场的扫描观测精度。

表2 ERBE 12类视场分类^[13, 14]

编号	视场类型	云分布
1	晴空海洋	晴空
2	晴空海洋	
3	晴空雪面	
4	晴空沙漠	
5	晴空下海陆混合区域（海岸）	
6	部分有云下海洋	部分有云
7	部分有云下的陆地或沙漠	
8	部分有云下的海陆混合区域	
9	大部分有云下海洋	
10	大部分有云下陆地或沙漠	
11	大部分有云的海陆混合区域	
12	阴天	阴天

根据下列标准进行ERM和CERES数据匹配和比较：

- （1）观测时间之差要小于15min；
- （2）匹配点的地理位置（纬度和经度）之差要小于0.1°；
- （3）太阳天顶角之差小于1°；
- （4）只有当观测星下点具有相同的方位角时才能被选中。

由于ERM和CERES载荷的各通道光谱响应存在一些差异，因此只有经过光谱订正去滤波的长波和短波辐射可以进行直接比较。本文选用2011年的Edition1-CV中CERES的ERBE-LIKE轨道（ES-8）产品作为比对数据，需要注意的是这个产品使用静态在轨定标系数，未对探测器辐射响应随时间变化进行订正，对于产品精度是有影响的^[15]。因此，这只是初步的比较结果，在这之后我们仍然需要对FY-3B卫星上ERM做更定量的评估。此次比较使用2011年2月25日—4月30日的ERM和CERES数据，比较结果见图4。

图4散点图显示FY-3B/ERM和Aqua/CERES的去滤波长波和短波宽带辐射之间有良好的相关性，直方图显示了二者之间的偏差。这表明ERM和CERES的数据匹配标准是适用的。图4a，b表明，在长波波段ERM观测到的地球发射辐射要比CERES中观测的要大，白天的偏差（CERES-ERM）大约为-3.06W/（sr·m²），夜间的偏差大约为-2.78W/（sr·m²），标准差分别为1.67和1.47W/（sr·m²），长波辐射的均值偏差有可能是由设备噪声造成的；ERM和CERES两者的去滤波辐射比值（ L_{ERM}/L_{CERES} ）大约为1.0354±0.00038和1.0445±0.00138，相关系数分别为0.99967和0.99949（见表3）。ERM中的长波辐射比CERES中的要高3.5%~4.5%。夜间和白天两者的结果有些不同，主要是由以下原因造成的：夜间，去滤波长波辐射通过全波通道观测处理得到，而在白天，长波辐射是从总辐射减去短波辐射得到，因此短波辐射的偏差可能会引入误差。

对于短波波段，ERM中去滤波辐射比CERES明显偏低，图4c已显示。CERES相较于ERM的平均值偏差大约为6.02W/（sr·m²），标准差大约为4.46W/（sr·m²），ERM与CERES的辐射之间的比值大约为0.8817±0.0021，相关系数为0.99842，表明ERM的短波通道观测辐射只有CERES的88.2%，这与长波波段不同，相对于CERES观测，ERM数据里有更大的系统偏差和噪声影响。

尽管ERM观测到的辐射与CERES辐射有较好的相关性，但是这两个仪器之间的去滤波辐射有较大系统性偏差以及较低的标准差。我们认为这些偏差的标

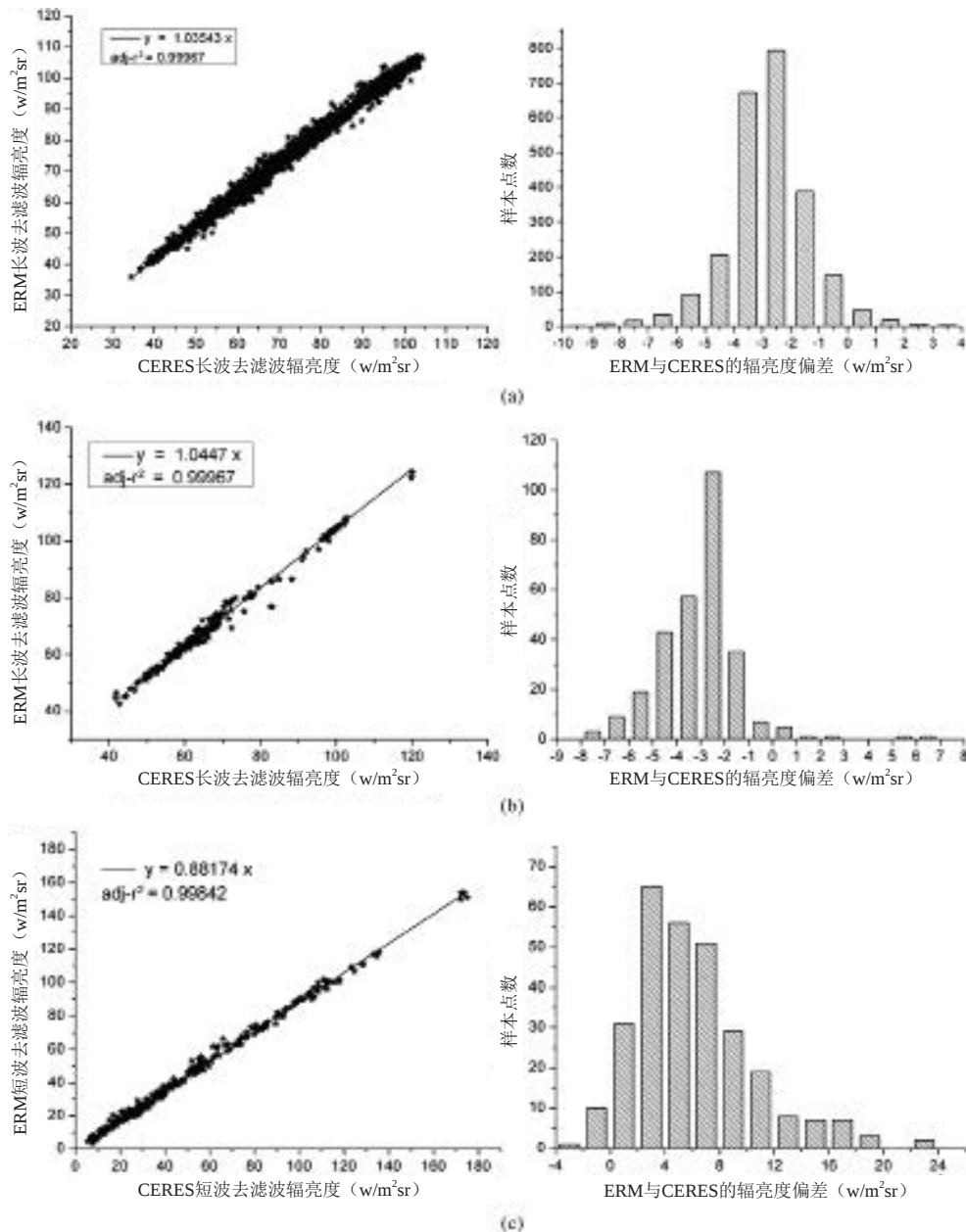


图4 FY-3B ERM与Aqua CERES观测去滤波辐亮度对比和偏差分布图(左列图是散点图,右列是偏差分布图)
(a) 夜间长波去滤波辐射; (b) 白天长波去滤波辐射; (c) 白天短波去滤波辐射
(比较是针对2011年2月25日—4月30日之间的数据)

偏差可能是由于比较过程中的噪声所造成的,例如观测时间的不同,像素大小和地球景象的不同。但是,系统偏差则可能是由发射前定标和光谱响应函数误差所引起的。因为发射前绝对定标是由宽视场黑体所决定的,即PRTs的温度和黑体的发射率来决定。较大的系统偏差也可能是由光谱响应中的误差引起的,夜晚ERM全波通道的长波辐射比CERES观测的要大。如果认为CERES中的辐射为真实值,对ERM全波通道中长波部分的光谱响应应比真实值要低,短波通道和ERM全波通道中的短波部分光谱响应要比真实值大。

4.2 ERM 到 CERES 的交叉光谱校正

图5是ERM扫描视场的光谱响应函数,在数据处理过程中用于计算将滤波辐射转换到去滤波辐射的SCCs。去滤波辐射是指没有受到光学系统和探测器影响的入瞳辐射。根据之前提到的比较可知,如果认为CERES的去滤波辐射为真值的话,ERM全波通道和短波通道的光谱校正并没有完全消除滤波的影响。ERM发射前辐射度定标是基于使用ITS-90的标准源,在轨观测可能会造成一些小误差。但是,光谱响应函数是由光学系统和探测器的响应乘积所决定的,由于国内

表3 ERM/ FY-3B与CERES/Aqua FM3交叉对比分析

波段	平均偏差 (W/m ² sr)	标准偏差 (W/m ² sr)	$L_{\text{ERM}}/L_{\text{CERES}}$ 比值
夜间长波去滤波辐射	-2.78	1.47	1.0354 ± 0.00038
白天长波去滤波辐射	-3.06	1.67	1.0445 ± 0.00138
白天短波去滤波辐射	6.02	4.46	0.8817 ± 0.0021

表4 经光谱订正后的FY-3B/ERM与Aqua/CERES FM3对比分析

波段	平均偏差 (W/m ² sr)	标准偏差 (W/m ² sr)	$L_{\text{ERM}}/L_{\text{CERES}}$ 比值
夜间长波去滤波辐射	-0.25	1.43	1.002 ± 0.00037
白天长波去滤波辐射	-0.62	1.36	1.009 ± 0.00116
白天短波去滤波辐射	4.00	4.36	0.952 ± 0.00496

测量手段局限性，各个组件光谱测量误差是不容忽视的，最后的响应函数可能存在较大的误差。

根据之前提到的比较结果，ERM中的长波辐射比CERES中的要多3.54%，ERM中的短波辐射只有大约CERES辐射的88.17%。为了评估光谱响应函数中的误差对去滤波辐射可能影响，本文将全波通道的大于5 μm 长波部分光谱响应函数长波部分响应提高3.54%，将短波通道和全波通道中的短波部分的光谱响应降低至原来的88.17%，重新建立了一组新的光谱校正系数。

图6和表4表示了经过上述光谱校正后的结果。经过新的校正后，两个传感器的夜间和白天的长波辐射的平均值偏差分别为-0.25和-0.62W/(sr·m²)。ERM和CERES长波辐射的比例很相近，两者大约为1.002和1.009。对于短波辐射，平均值偏差降至4.00W/(sr·m²)，辐射之比增大至0.952。以上结果表明了新的光谱校正方法能够在很大程度上移除ERM和CERES中长波和短波辐射辐射之间的偏差，但是标准差并没有变化。

ERM和CERES中观测辐射之间较大的标准差与可能两个原因有关。一是地球上目标，云和地表目标的空间不均一性，及其随着时间的变化等，这些因素与卫星观测时间和仪器视场大小相互作用等，这些都可能引起较大的标准差。在数据匹配中，ERM和CERES在观测时间最大为15min。这么短时间内表面目标物并不会有什么变化，但是由于云的运动大气状态会发生较大的变化。同时，两个仪器像素大小的不同也不能够忽略，ERM中的窄视场扫描仪的空间分辨率在星下点是35km，CERES则为20km。如果拟合的像素刚好处于云的边缘，覆盖了云的一部分，则ERM和CERES之间观测到的辐射就会有明显的区别。第二个误差源来自对仪器的地面定标过程中，光谱响应、空间响应及辐射响应测量中的误差将影响在轨数据处理。在ERM地面定标过程中，需要根据稳定且高精度

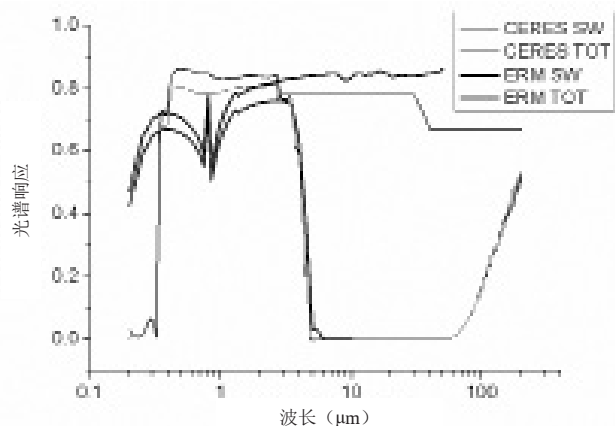


图5 FY-3B ERM与 Aqua CERES FM3光谱响应函数比较 (ERM光谱响应函数是地面定标中通过测量光学系统各个组建的反射及、透过率及探测器吸收率得到，CERES的光谱响应函数取自 CERES的 ERBE-Like产品 (ES-8))

的源、高精度辐射传递仪器以及相关测量设备，对仪器光谱响应、空间响应以及辐射响应进行高精度的评估。在FY-3系列卫星上前两个ERM仪器研制过程中，类似于CERES辐射度定标^[15]的设备还没有发展起来。

5 定标稳定性的分析

FY-3系列卫星上的ERM观测将主要用于气候监测与研究中，在轨的长期稳定性是气候数据集的需要。利用仪器在轨定标观测数据，所有ERM通道增益的变化量可以根据(8)式得到，结果显示在图7。

$$g_v = \frac{G_g - G_0}{G_g} \times 100\% \quad (8)$$

其中 g_v 是ERM通道辐射响应增益的变化量， G_g 是发射前定标中确定的通道增益， G_0 是基于在轨定标计算的通道增益。对于窄视场扫描器的全波通道，结果显示卫星在轨最初几天通道增益有较大变化，之后其在 G_0 附近波动，2011年4月后波动振幅增大。波动变化表明了这个通道对于黑体的热辐射变化和周围环境非常敏感(图7a)。窄视场的短波通道显示了卫星入轨第一个月内有明显变化，然后，在轨通道增益逐渐趋于稳定，与 G_0 相比有大约3.3%的变化量，在2011年6月中旬，短波通道增益显示一个较大的跃变，在一周之后恢复(图7b)。2010年12月—2011年6月中旬短波通道状态参数显示了光源和通道辐射器非常稳定，但是7月中旬之后开始出现急剧衰减，到2011年8月中旬对地观测已无响应，这与FY-3A/ERM很相似，后者在轨道内运行18个月后就衰减到0，衰减失效的原因正在研究中，全波通道现在处于良好状态。

对于宽视场非扫描器的全波通道，图像显示了其具有稳定趋势，与发射前定标仅有大约1%的变化。宽

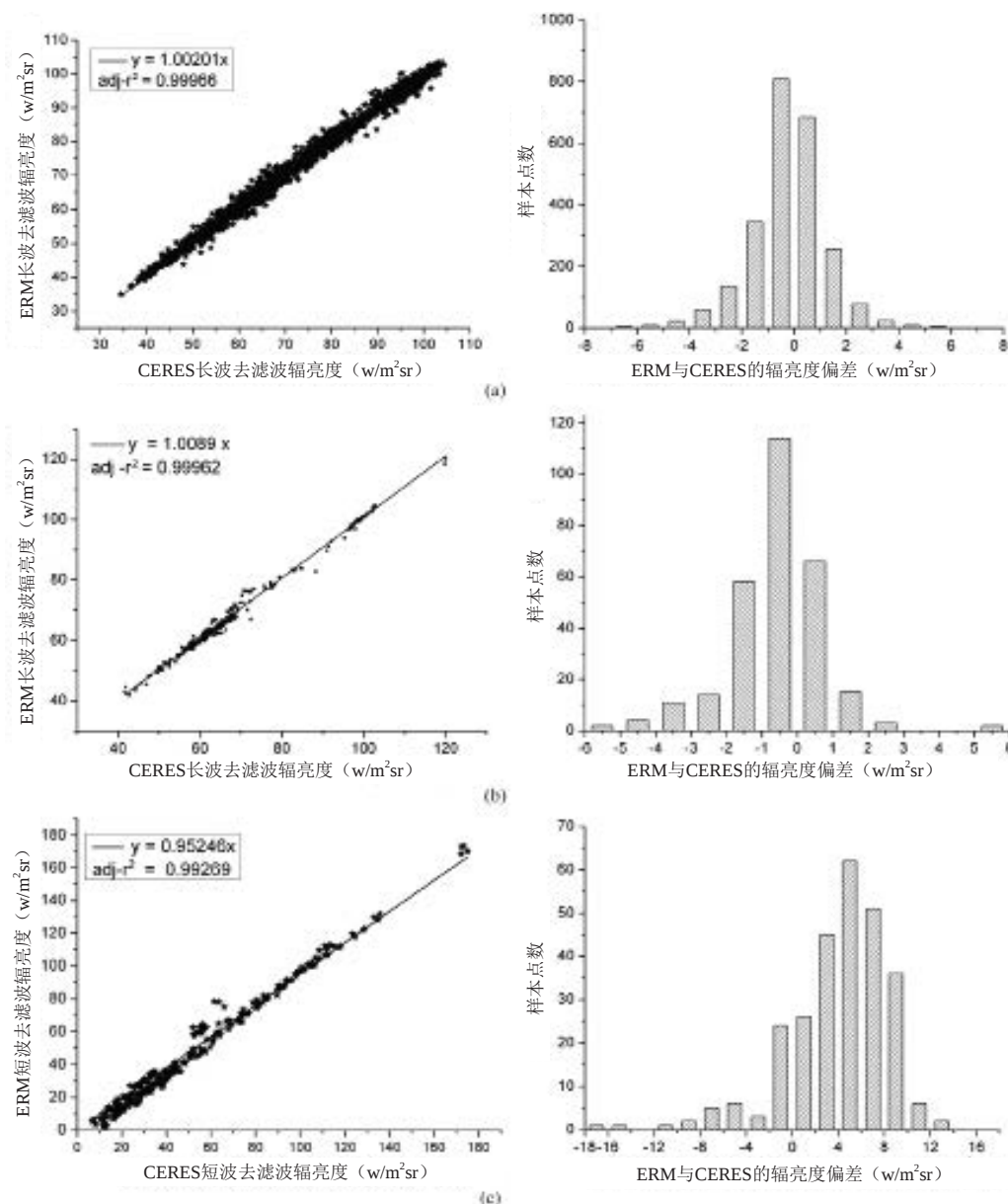


图6 FY-3B ERM与Aqua CERES观测去滤波辐亮度对比和偏差分布图
(经过交叉光谱订正, 左列图是散点图, 右列是偏差分布图) (a) 夜间长波去滤波辐射; (b) 白天长波去滤波辐射;
(c) 白天的短波去滤波辐射 (比较是针对2011年2月25日—4月30日之间的数据)

视场短波通道获得物与发射前定标相比, 在发射后的前3个月内随时间有较大的变化, 约为4%; 之后的6个月, 变化趋于缓慢, 约为2% (图7d)。尽管监测卤钨灯发射辐射的硅光二极管信号在轨丧失了监测功能, 但是宽视场非扫描器的光源是恒流控制的, 可以认为光源发射的辐射也是稳定的。分析在轨内定标数据得知, 从通道开始观测时, 宽视场短波通道的输出信号在灯开和关两个状态下的发生信号漂移, 但是两个辐射定标水平上的漂移率是不同的, 漂移率随着灯光辐射的变化可能会引起短波通道增益的变化。对于宽视

场全波通道, 在内置黑体两个温度下的通道输出信号也会随着时间而变化, 但是两个水平之间的漂移率相比较差别较小。

作为用于气候监测和气候研究的设备, ERM需要具有长期稳定性, 且其变化率在两年有效寿命中不能超过1%。当前, 4个通道中的3个已经超过这个限制, 所以需要进行更多的研究工作来修正这些对稳定性具有影响的因素。

与CERES之间的比较是建立在2011年2月25日—2011年4月30日期间的观测, 发射前定标系数用

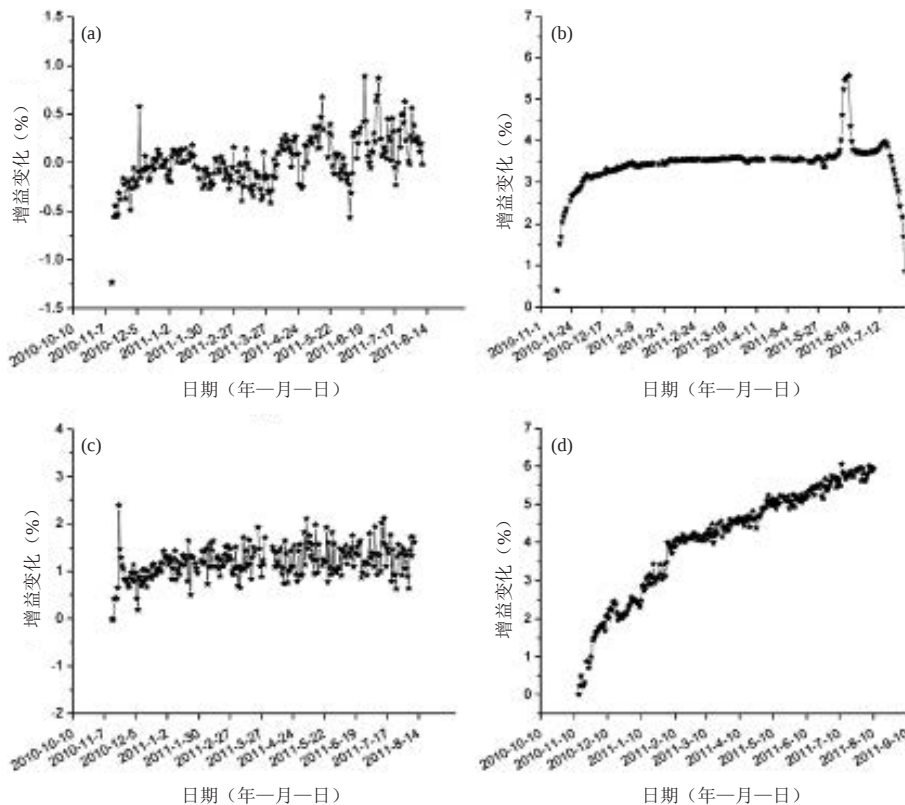


图7 FY-3B ERM各通道辐射增益在轨变化
(a) 窄视场全波通道; (b) 窄视场短波通道; (c) 宽视场全波通道; (d) 宽视场短波通道

来计算滤波辐射, 所以增益的波动可能会为大的平均值偏差带来影响。ERM观测辐射应该在其通道增益变化被修正后再进行计算。但是在本文中, 我们仅对ERM通道在轨定标辐射响应的稳定性进行初步分析, 并没有开展校正工作。

6 讨论和总结

本文首先介绍了FY-3A/B两颗卫星上ERM的仪器特性, 其在发射前和在轨的定标过程以及数据处理方法, 然后通过与CERES观测的比较对ERM观测辐射进行检验, 以及基于在轨定标对通道辐射响应的稳定性分析。ERM窄视场扫描器的去滤波辐射与EOS/Aqua卫星中CERES的FM3观测数据之间有很好的相关性。夜间ERM长波辐射比CERES的长波辐射要高出3.5%, 相应的白天ERM长波辐射比CERES的长波辐射要高出4.5%。但是, ERM短波辐射要比CERES的短波辐射值低11.8%; 这些偏差可能来自发射前定标和通道光谱响应确定中的误差, 即由光学系统与探测器光谱响应测量偏差导致。根据与CERES数据对比出现的系统误差, 利用ERM观测的辐射模拟计算而建立了一种交叉光谱校正。对于长波波段, 校正使得白天的偏差从 -3.06 减小至 $-0.62\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$, 夜晚的偏差从 -2.78 减小

至 $-0.25\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 。对于短波波段, 偏差从 6.02 减小至 $4.00\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 。辐射响应在轨稳定性分析表明了全波通道是稳定的, 但是, 短波通道增益有较大的波动性, 变化超过3%, 这种变化可能是由发射和在轨期间探测器辐射响应的漂移引起。

定标的准确性和ERM辐射收支观测的长期稳定性是在气候应用ERM数据的两个重要方面。尽管ERM在发射前已进行绝对定标, 但是仍有一些误差和偏差会带入到仪器观测中, 例如标准定标源, 即黑体和积分球的发射辐射, 在目前状态下标定得不是很准确, ERM的光谱和空间的响应评估中误差较大, 因此应该发展特殊的设备来应对这些不足。在辐亮度层面上, 地球辐射观测通常是通过交叉定标确定的, 即通过比较同一个卫星上不同的ERB观测, 例如, Aqua卫星上CERES上的FM3和FM4, 或者不同卫星上的仪器, 如FY-3B/ERM和Aqua/CERES等。通过对比, 可以得到两个仪器之间的偏差, 即相对于参照仪器的偏差, 在本文中是CERES, 偏差包括了ERM和CERES自身的观测误差, 这也是交叉定标的局限性。如果CERES的辐射经过能够很好的定标, 那么这种比较就会帮助我们发现ERM发射前定标中存在的误差。从另一方面

来说,通过交叉定标,将不同卫星上两个或两个以上仪器的观测进行交叉比较,根据一致性调整观测,能实现多颗卫星数据的联合应用。利用在轨内定标数据可以分析仪器的长期稳定性,但是由于星上内定标源的光谱范围不能全部覆盖通道的光谱响应范围,通道光谱响应在轨发生的变化也不能通过这些定标观测而被发现。在轨定标源发射的辐射可能随着时间发生变化,地球上的特定目标具有气候上的稳定性,例如热带海洋平均辐射和深厚对流云等可以作为稳定参照,可以通过对这些特定目标结合在轨内定标来分析ERM的长期稳定性。

FY-3A和FY-3B卫星是中国第二代极轨气象卫星系列中的两颗卫星,系列中还有其他四颗卫星。自2013年,另外两个ERM设备计划分别在两颗上午轨道卫星上运行,未来预计进行8年的在轨观测。FY-3B携带的ERM在运行中出现的问题,例如光谱响应误差,在轨辐射响应漂移等,都对气候研究中ERM数据应用带来很大的影响,未来的ERM仪器将改进这些因素。

参考文献

- [1] Barkstrom B R. The Earth Radiation Budget Experiment (ERBE). Bull Amer Meteorol Soc, 1984, 65(11): 1170-1185.
- [2] Suomi V. E. The radiation balance of Earth from a satellite. Ann Int Geophys Year, 1958, 1: 331-340.
- [3] Weinstein M, Suomi V E. Analysis of satellite infrared radiation measurements on a synoptic scale. Mon Weather Rev, 1971, 89(11): 419-428.
- [4] Vonder Haar, Suomi V E. Satellite observation of the Earth's radiation budget. Science, 1969, 163: 667-669.
- [5] Smith W L, Hickey J, Howell H B, et al. Nimbus-6 Earth radiation budget experiment. Appl Opt, 1977, 16(2): 306-318.
- [6] Wielicki B A, Barkstrom B R, Harrison E F, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An Earth observing system experiment. Bull Amer Meteorol Soc, 1996, 77(5): 853-868.
- [7] Thomas S, Priestley K J, Cooper D L, et al. Radiometric performance of Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) instrument sensors aboard EOS Terra and Aqua spacecraft. Proc IEEE IGARSS, Jul. 7-11, 2008, 2: II-1212-II-1215.
- [8] Priestley K J, Smith G L, Thomas S, et al. Radiometric performance of the CERES Earth radiation budget climate record sensors on the EOS Aqua and Terra spacecraft through April 2007. J Atmos Ocean Technol, 2011, 28(1): 3-21.
- [9] Priestley K J, Smith G L, Thomas S, et al. NPP Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) predicted sensor performance calibration and preliminary data product performance. Proc IEEE IGARSS, Jul. 12-17, 2009, 1: I-96-I-99.
- [10] Thomas S, Priestley K J, Shankar M, et al. Pre-launch characterization of the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) flight model 5 (FM5) instrument on NPP. Proc IEEE IGARSS, Jul. 24-29, 2011: 35-38.
- [11] Harries J E, Russell J E, Hanafin J A, et al. The Geostationary Earth Radiation Budget (GERB) project. Bull Amer Meteorol Soc, 2005, 86: 945-960.
- [12] Bertrand C, Futyant J, Ipe A, et al. Diurnal asymmetry in the GERB SW fluxes. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 44(12): 3585-3600.
- [13] Suttles J T, Green R N, Minnis P, et al. Angular radiation models for Earth-atmosphere system: Volume I—Shortwave radiation. NASA RP 1184. Washington: NASA, 1988.
- [14] Suttles J T, Green R N, Minnis P, et al. Angular radiation models for Earth-atmosphere system: Volume II—Longwave radiation. NASA RP 1184, Washington: NASA, 1989.
- [15] McCarthy J K, Bittling H, Evert T A, et al. A summary of the performance and longterm stability of the pre-launch radiometric calibration facility for the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) instruments. Proc IEEE IGARSS, Jul. 24-29, 2011: 1009-1012.