

# 风云三号A星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标

胡秀清<sup>1</sup> 孙凌<sup>1</sup> 刘京晶<sup>1</sup> 丁雷<sup>2</sup> 王向华<sup>2</sup> 李元<sup>1</sup> 张勇<sup>1</sup> 徐娜<sup>1</sup> 陈林<sup>1</sup>

(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研究所, 上海 200083)

**摘要:** 中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 是搭载在我国第二代极轨气象卫星风云三号 (FY-3) 上的一个主要仪器。总结了MERSI在仪器设计、定标算法、发射前及在轨性能以及仪器性能验证等方面的信息。针对MERSI可见光星上定标器(VOC)的跟踪监测发现, 在过去两年, 它的太阳反射波段 (RSBs) 发生了显著的衰减, 特别是较短波长通道 (<500nm) 衰减量超过10%, 最大衰减发生在第8波段, 约20%。但波长较长通道的性能相对稳定, 衰减量小于5%。两个短波红外通道电子增益出现随机跃动, 导致发射后的定标系数存在频繁波动。以上结果与其他两种替代定标方法相比 (即中国遥感卫星辐射校正场定标, 简称场地定标和基于Terra/MODIS敦煌沙漠场景交叉定标), 结论一致。MERSI针对大气顶辐射亮度或反射率定标的总不确定度小于5%。定标结果为FY-3A/MERSI定标系数的更新提供了重要的参考和评估。

**关键词:** 衰减率, 仪器性能跟踪, 中分辨率光谱成像仪, 反射太阳波段定标, 替代定标

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.008

## Calibration for the Solar Reflective Bands of Medium Resolution Spectral Imager Onboard FY-3A

Hu Xiuqing<sup>1</sup>, Sun Ling<sup>1</sup>, Liu Jingjing<sup>1</sup>, Ding Lei<sup>2</sup>, Wang Xianghua<sup>2</sup>, Li Yuan<sup>1</sup>, Zhang Yong<sup>1</sup>, Xu Na<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The Medium Resolution Spectral Imager (MERSI) is a key instrument onboard Fengyun-3 (FY-3), the second generation of polar-orbiting meteorological satellites in China. This paper summarizes the knowledge of MERSI instrument in terms of sensor design, calibration algorithm, prelaunch and on-orbit characterization, and performance verification. The calibration monitoring of its reflective solar bands (RSBs) is primarily conducted using a visible onboard calibrator and found that it has a significant degradation on the order of 10% in its shorter RSB bands (< 500 nm), with the largest in band 8 of about 20% during the past two years. However, the performance at longer wavelength bands is relatively stable with a change of less than 5%. It is shown that the postlaunch calibration of the two short-wavelength infrared bands has frequent fluctuations because of random jumps in their electronic gains. These results are consistently verified by two kinds of vicarious calibration (VC) methods: China Radiometric Calibration Sites VC and intercalibration using Terra/ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer over Dunhuang desert. The overall uncertainty in the MERSI top-of-atmosphere radiance or reflectance is less than 5%. These results provide the important reference and evaluation for the update of the FY-3A/ MERSI calibration coefficients.

**Keywords:** Degradation rate, instrument monitoring, Medium Resolution Spectral Imager (MERSI), solar reflective band calibration, vicarious calibration (VC)

### 1 引言

地球表面反射的太阳辐射蕴含了地球上生态、

收稿日期: 2013年6月8日; 修回日期: 2013年7月8日

第一作者: 胡秀清 (1973—), Email: huxq@cma.gov.cn

资助信息: 973计划项目 (2010CB951600和2010CB950802);

863计划项目 (2007AA12Z145); 公益性行业 (气象)

科研专项 (GYHY200906036); 科技部国际科技

合作专项 (2010DFA21140)

水文及气象条件等重要信息<sup>[1-3]</sup>。为了从空间上探测这些信息, 美国地球观测系统 (EOS) 卫星放置了一个主要仪器——中分辨率成像光谱仪 (MODIS)。MODIS拥有36个波段, 其星下点几何瞬时视场有250m、500m和1000m<sup>[4-6]</sup>, 它是NOAA系列卫星上搭载的甚高分辨率辐射仪 (AVHRR)、高分辨率红外大气探测器 (HIRS)、雨云7号卫星上的海岸带水色扫描仪 (Nimbus-7 CZCS)、SeaStar卫星上的SeaWiFS以

及Landsat卫星上的TM等仪器的延续。国际上其他一些航天机构研发的类似传感器，包括搭载在高级地球探测卫星（ADEOS-II，2002年12月14日发射）上的全球成像仪（Global Imager）<sup>[7-10]</sup>，以及2002年3月1日欧洲发射的环境卫星（ENVISAT）上中分辨率成像光谱仪（MERIS）<sup>[11, 12]</sup>。中国从20世纪80年代开始独立开展气象卫星研制计划，最早研发了风云一号系列卫星，并陆续发射升空，其上搭载的类似AVHRR的传感器为第一代多光谱可见光红外扫描辐射计（MVISR）。风云三号（FY-3）是中国第二代极轨气象卫星，其上搭载的中分辨率光谱成像仪（MERSI）为最新一代成像仪。

MERSI和可见光红外扫描辐射计（VIRR）是FY-3最主要的两个多光谱光学成像荷载<sup>[13]</sup>。VIRR继承了我国第一代极轨气象卫星FY-1上的MVISR，仅有一个光谱通道不同。MERSI为全新设计仪器，预计在第4颗FY-3卫星上其性能还会有更大提升，将在红外波段包括更多通道，灵敏度及定标精度将会更高，并且将囊括VIRR所有功能。第4颗FY-3卫星将不再搭载VIRR。第一台MERSI搭载在FY-3A卫星上，于2008年5月27日发射入轨。该星运行于太阳同步轨道，为上午星，赤道降交点地方时为上午10:30。第二台MERSI搭载于FY-3B卫星上，于2010年11月5日发射入轨，赤道升交点地方时为下午1:30。MERSI的设计和开发立足于国内用户及科研团体的需要，提供地球系统短期及长期变化研究的全球连续数据。它的通道选取及空间分辨率设置考虑到与前代仪器（如FY-1C/D MVISR及FY-3 VIRR等）实现无缝衔接，并改进其观测质量。风云三号上午和下午星搭载的MERSI观测，共生成约20个科学数据产品，极大地提高了我国在全球环境及气候变化方面的监测能力。

为保证MERSI数据产品质量，发射前对它们作了充分的仪器定标和性能测试，包括部件级、系统级和热真空环境中的测试。发射后的定标和性能跟踪采用星上定标（onboard calibration, OBC）装置<sup>[14-16]</sup>：可见光星上定标器（VOC）、冷空观测（SV）、V形槽面黑体（BB）。另外，采用了多种在轨替代定标方法对仪器稳定性和衰减进行监测。早期业务仪器AVHRR，因没有星上定标装置，采用多种在轨替代定标方法来经常更新定标系数，如基于利比亚沙漠反射率信息、云场景<sup>[17-24]</sup>以及用EOS/MODIS交叉定标<sup>[25-26]</sup>等。沙漠场景替代定标是在没有野外观测情况下，假设场地双向反射率分布函数（BRDF）稳定。但是因场地上空的云及水汽含量变化，该假设未必真实有效<sup>[18-22]</sup>。以某自然地表做研究对象，采用星地同

步测量的场地替代定标法，由亚利桑那大学遥感组<sup>[27]</sup>在1980年代率先提出。与之类似，基于中国敦煌辐射校正场（CRCS）的场地替代定标法，为20世纪90年代末期以来风云系列气象卫星辐射校正的基线方法<sup>[28-30]</sup>。MODIS仪器包含太阳漫反射板（SD）和太阳漫板稳定监测器（SDSM）两个星上定标装置，用来对太阳反射通道定标<sup>[31, 32]</sup>。另外MODIS还定期调整观测模式，对月球进行观测，也用于对MODIS太阳反射波段定标的稳定性监测<sup>[33]</sup>。结果表明，MODIS在反射率探测的绝对定标精度达到2%<sup>[34, 35]</sup>，是国际公认用于交叉定标的标准仪器。MERSI依靠同时过星下点观测（simultaneous nadir observations, SNOs）和基于沙漠场地两种方法与MODIS开展交叉定标，用以验证敦煌辐射校正场的定标结果<sup>[25, 26]</sup>。SeaWiFS专门的月球观测可以实现可见光通道的稳定定标，卫星发射升空6年以来，通过严格的定标工作，其定标稳定性优于0.07%<sup>[36-39]</sup>。然而，对于MERSI来说，其很难实现对月球的机动观测，期待在后续卫星设计上能够实现该方法。

本文章节安排如下：第2节是MERSI仪器介绍，第3节为MERSI定标算法，第4节为MERSI发射前定标及MERSI性能测试，第5节介绍3种主要在轨定标方法，并综合分析这些方法的结果，最后为结论。

## 2 遥感器简介

MERSI由中国科学院上海技术物理研究所（SITP）研制<sup>[16]</sup>。搭载于前3颗FY-3系列卫星上的第一代MERSI传感器，共有20个通道，其中19个为太阳反射通道（0.4~2.1 $\mu\text{m}$ ）和1个红外发射通道（10~12.5 $\mu\text{m}$ ）。图1为MERSI对地场景扫描示意图。MERSI用45°扫描镜并在消旋K镜协同下观测地

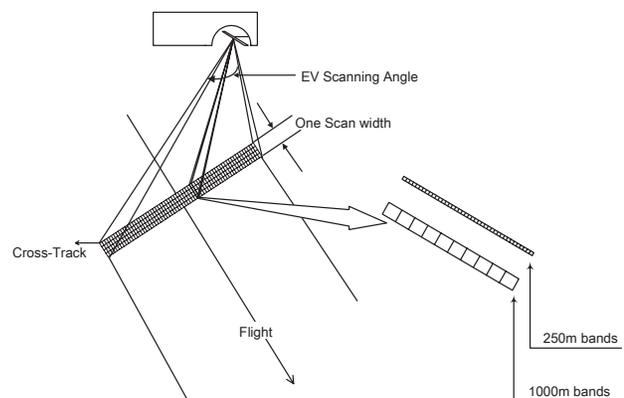


图1 MERSI扫描地球场景示意图（FY-3卫星运行于836km高的近极地太阳同步轨道上，MERSI每个扫描带垂直于地面航迹，对地扫描张角为110°（±55°），每次扫描对应不同分辨率将步进10或者40条线

表1 MERSI仪器指标需求

参数	指标
扫描宽度	$\pm 55.1^\circ (\pm 0.1)$
量化等级	12 bits
扫描镜转速	40转/min
扫描稳定度	$<0.5$ IFOV (1000 m)
每行采样像素	2048 (1000m)、8192 (250m)
扫描镜定位精度	$120 \pm 30$ 弧秒, 1 (星下 $\pm 100$ m)
衰减率	$<20\%/3a$
光谱特征精度	中心波长偏移 $<10\%$ 带宽, 带外响应 $<3\%$
通道间图像配准精度	$<0.3$ 像素
饱和和恢复	$\leq 6$ 像素 (1000m, 2km Ltyp区域内)
亮目标还原	$\leq 24$ 像素 (250m)
调制传递函数 (MTF)	$\geq 0.27$ (1000m), $\geq 0.25$ (250m)
辐射定标精度	可见光通道 $<7\%$ , 热红外通道 $<1K$ (270K)
通道内探元一致性	不一致性 $\leq 5\% \sim 7\%$

球, 每次扫描提供2900km (跨轨)  $\times$  10km (沿轨, 星下点) 刈幅带, 实现每日对全球覆盖。它采用多探元 (10或40个) 并扫, 其星下点地面瞬时视场为250m或1000m。它有5个通道星下分辨率为250m, 其余15个通道空间分辨率为1000m<sup>[14, 16]</sup>。仪器指标的详细说明见表1。

图2、图3为MERSI的两个主要模块, 一个为光机模块, 另一个为VOC星上定标器<sup>[14]</sup>。扫描镜为椭圆形镀镍镀平面, 表面镀银, 能实现宽光谱范围内具有高反射率低散射特性。扫描镜以40 转/min的转速连续旋转, 地面场景辐射能量经过其反射, 照到主镜 (入瞳) 上, 再经视场光阑进入次镜上。经次镜反射的

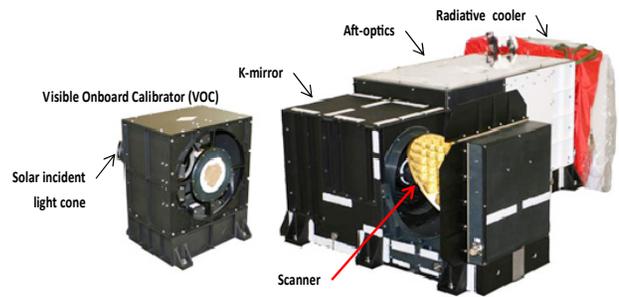


图2 MERSI两个主要模块组件实物照片 (左为可见光红外星上定标器正面照, 右为仪器主光学—机械组件)

辐射再传到K镜作图像消旋, 用以消除因扫描镜45° 旋转及多探元并扫导致的遥感图像旋转。K镜以扫描镜的一半转速旋转, 在连续对地扫描过程中会有两个镜面交替进行。与K镜具有类似功能的是SeaWiFS上的半角镜<sup>[36]</sup>。光线经过K镜后便是双色分色片组件 (由3个分色片组成), 随后通过4个折射组件经各自的带通滤光片到达4个焦平面阵列 (FPAs)。分色片的作用实现光谱分离, 将MERSI探测到的光谱域分成4个光谱区, 即可见光 (VIS, 412~565nm)、近红外 (NIR, 650~1030nm)、短波红外 (SWIR, 1640~2130nm) 以及热红外 (TIR, 12250nm)。利用被动辐射制冷器, 短波红外以及热红外焦平面组件被冷却到90K左右。

由图3b可见, 所有通道均有多个探元 (1000m 和 250m分辨率分别有10和40个探元) 组成, 多探元沿飞

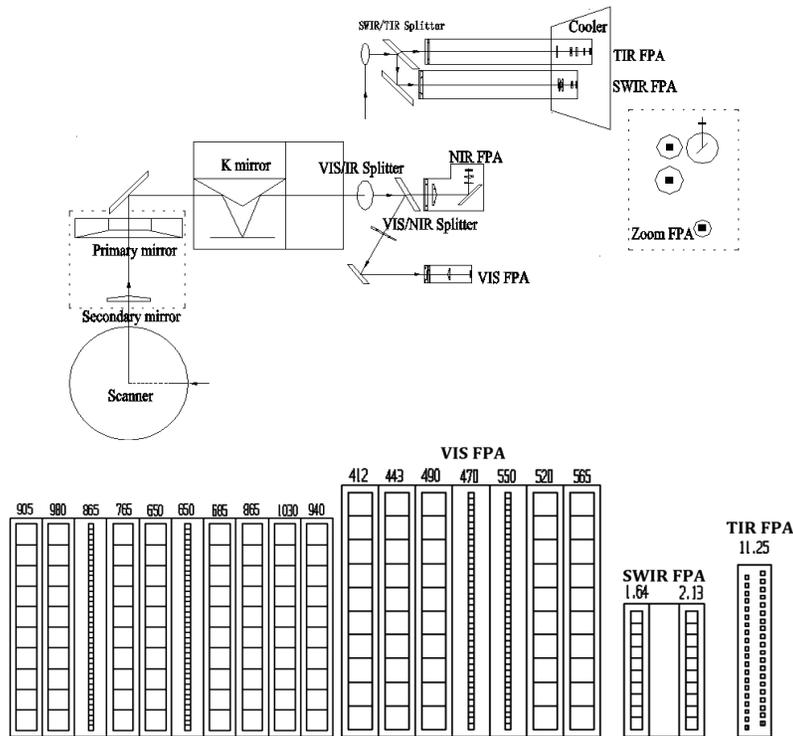


图3 MERSI主光机模块的仪器光学设计示意图: (a) MERSI内部光学构造及光路传递; (b)焦平面各通道探元排列

行方向排列在4个焦平面上。每个探元信号经放大器放大后由一个12位数模转换器进行数字化。可见光及近红外焦平面阵列采用P-I-N光伏型硅光二极管，短波红外为碲镉汞(HgCdTe)光伏探测器，长波红外波段采用碲镉汞(HgCdTe)光导探测器。

MERSI的设计包括两个可见光星上定标设备：可见红外星上定标器(VOC)和冷空观测(SV)，冷空观测得到暗信号。VOC是第一个在风云系列卫星上采用的可见光定标设备<sup>[15]</sup>。图4为VOC的结构图，它由3个主要的光学部件构成：6cm直径的小型积分球、光线扩束系统、陷阱探测器。积分球内有两个卤钨灯，太阳光可通过入射光锥收集进入积分球内。光线扩束系统包括一个平面镜和一个抛物面反射镜，后者使得从积分球出来的小光束能够充满MERSI的大口径。从积分球出射的光束经过平面镜反射到抛物镜上使其成平行光，形成一个准高斯光束，该光束即为MERSI的定标光源。陷阱探测器安装在VOC的出口边缘，它包括四个硅探测器(470, 550, 650和865nm通道)和一个无滤光片全色探测器。VOC安装在MERSI仪器主体旁边，便于扫描镜能够扫描VOC的出口部分，并在卫星经过南极时能观测太阳光源信号。

内置灯或太阳光经小积分球均一后，再由光线扩束系统准直成平行光线，平行光线充满整个MERSI口径，被每条扫描线探测到。但是，如果内部灯关闭或太阳光未进入到光锥，则VOC的辐射输出为零。VOC被用来监视MERSI响应的系统变化，这种变化由MERSI的响应衰减和VOC自身输出的变化共同引起。因此，VOC的输出必需单独监测，这由陷阱探测器来完成。陷阱探测器相对稳定，能够直接探测出VOC的辐射输出。全孔径星上黑体设计成V形槽面，黑体表面通过阳极氧化处理，具有很高的有效发射率。MERSI除扫描星上黑体外，还扫描冷空信号，从而实

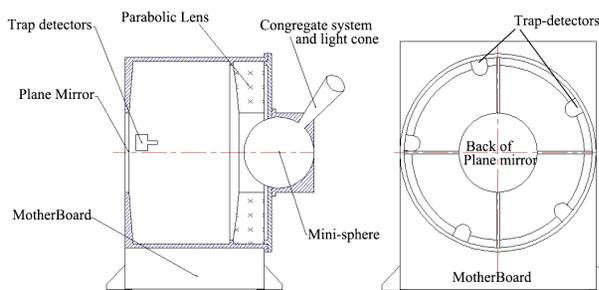


图4 MERSI可见光星上定标器原理示意图(左为纵剖面示意图,定标器由基板、太阳光锥收集系统、小积分球、平面镜、抛物面镜和陷阱探测器组成,MERSI扫描接收来自抛物面镜反射的定标器辐射;右图为正对MERSI扫描镜的前视图)

现热红外通道的两点法辐射定标。

### 3 定标算法

对于卫星观测,地球场景在大气层顶某波长的表现反射率 $\rho_{\text{toa}}$ 由下式计算:

$$\rho_{\text{toa}} = \pi \cdot L_{\text{toa}} / \left( \frac{\mu \cdot E_0}{D_{\text{ES}}^2} \right) \quad (1)$$

其中, $L_{\text{toa}}$ 为MERSI在太阳反射波段观测的辐亮度值, $\mu$ 为太阳天顶角 $\theta_s$ 的余弦值, $E_0$ 为一个天文单位的大气外界太阳辐照度, $D_{\text{ES}}$ 为日地天文距离。观测辐亮度(单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ )由下式得到:

$$L_{\text{toa}} = (DN - DN_0) \cdot k(t) \quad (2)$$

其中, DN为MERSI观测计数值, $DN_0$ 为暗背景计数值。对于MERSI的每一次扫描,望远镜观测仪器暗内部时得到 $DN_0$ 测量值。 $k(t)$ 为t时刻的辐射定标系数。有两种可能途径来应对仪器定标随时间的变化。第一种通过经常更新定标系数来实现,第二种使用多种定标方法结果来模拟定标随时间的演变。第一种方法需要用到发射前定标系数或星上辐射定标获得的瞬时增益系数。因为瞬时数据的不确定性,该方法可能导致定标系数k的波动。MERSI业务上,通过历史定标数据,模拟定标系数随时间的演变来实现定标更新。该模拟方法中,遥感器的衰减和参考增益(如以某时刻的增益为参考)被拟合成一套瞬时增益系数和增益随时间变化的数学表达式。

通常光学器件在太空环境中呈指数衰减<sup>[38]</sup>。MERSI的辐射定标模型将仪器发射前实验室或室外定标与仪器在轨后随时间的变化设计如下:

$$k(t) = k(t_0) \cdot F_d(t - t_0) = k(g) \cdot \alpha(t_0) \cdot [B_0 + B_1 \cdot (t - t_0) + B_2 \cdot (t - t_0)^2] \quad (3)$$

其中, $k(t_0)$ 为 $t_0$ 时刻的定标系数, $F_d(t - t_0)$ 为MERSI辐射响应衰减率函数, $k(g)$ 为发射前定标系数( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{DN}^{-1}$ ), $g$ 为电子增益, $\alpha(t_0)$ 为发射前定标系数在入轨初期的替代订正(无量纲),系数 $B_0$ (无量纲)、 $B_1(d^{-1})$ 、 $B_2(d^{-2})$ 用来计算通道辐射响应在轨运行若干天后( $t - t_0$ )的变化, $B$ 系数通过一段时期内(6个月以上)一序列绝对定标系数(场地定标)或者相对定标趋势(VOC或其他手段)来确定。MERSI的初始日期 $t_0$ 为获取第一幅地球影像的日期,FY-3A为2008年6月4日,FY-3B为2010年11月12日。 $k(g) \cdot \alpha(t_0)$ 为 $t_0$ 时刻的初始绝对定标系数。 $t_0$ 时刻后,定标系数由式(3)逐步地作相对调整。如果未来发现初始绝对定标系数与它在 $t_0$ 时刻的值之间发生明显偏移,则改变 $k(g) \cdot \alpha(t_0)$ 的值。初始绝对定标系数更新为一个新值后, $t_0$ 也随之变为一个新日期。替代定标订

正是根据场地定标的野外观测来确定<sup>[29, 30]</sup>。只有在一定时段内,式(3)中的 $B_0$ ,  $B_1$ 和 $B_2$ 能够较准确地模拟出仪器在轨辐射响应变化,而 $a(t_0)$ 与时段相关,因此, $a(t_0)$ 随时段不同将相应改变。严格来说,式(3)中单一的二次曲线还不足以跟踪仪器在轨各通道辐射响应变化,实际曲线为线性和二次曲线的组合。另外,由于仪器的设置变化或出现异常,该模型也不适用。MERSI星上定标与VOC小积分球老化和仪器衰减两者相关,该定标结果通过场地替代定标和MODIS交叉定标来验证。MERSI的一级数据(L1)用户并不需要关心MERSI到底采用何种定标方法,只需直接使用L1级数据文件中最终定标系数,把计数值(DNs)转换为表观反射率。

MERSI因多探元的响应差异和K镜前后两个连续镜面扫描差异,其原始图像显示出明显的各探元之间条纹和两帧之间的条带现象。为提高MERSI图像质量和简化辐射定标(即针对各通道而不是逐探元),在辐射定标前要对原始数据作条纹消除处理。通常,有3种主要的方法用以消除卫星图像上的逐探元条纹和镜面条带。第一种针对特定频率构造一个滤波器,去掉条纹噪声<sup>[40, 41]</sup>。第二种方法为小波分析法,近来被用来消除条纹噪声<sup>[42]</sup>。第三种方法,检测各探元DN值的概率分布,并调整它们的分布与参考分布相匹配<sup>[43]</sup>。前两种方法在业务上较难操作,因此,经验分布函数(empirical distribution function, EDF)匹配算法被应用到MERSI的资料预处理系统(DP<sup>2</sup>S)中。该算法假定在一幅大尺度的场景中,各探元观测到地球入射辐射的密度分布函数相同<sup>[44]</sup>,采用MERSI多天(一般10天)的全球数据进行累积分布函数离线分析。对某一通道,将各探元EDF与参考EDF直方图映射匹配,生成一个归一化查算表,将各探元的每个DNx映射到一个参考DNx'上。每天离线统计查算表并分析它的变化,当发现它的变化超过5%以及肉眼能看出图像条纹加剧,则更新查算表,通常每三个月更新一次。

探元均一化处理或相对辐射定标的目的是为了减少图像条纹效应。它将某一探元作为基准探元,然后通过改变或缩放等手段将其他探元的响应与基准探元匹配。通过图像条纹均一化处理,MERSI的辐射定标简化到通道级别。探元均一化处理后,将不再考虑多探元等复杂问题,辐射定标仅针对通道进行。上述提到的去条纹处理已在L1数据产品生成时进行,L1级产品用户不需再做该项处理。

#### 4 发射前特性及定标

上海技术物理研究所在MERSI发射前对正样仪器

进行了综合仪器性能测试分析<sup>[16]</sup>。这些测试有两个目的,一是验证仪器性能是否满足业主的使用要求,另一个更主要目的是为MERSI数据进行几何定位和辐射定标提供参数。针对仪器物理和性能参数进行测试,包括空间、光谱、辐射以及杂散光的响应特征等。真空罐及常温环境测试也分步进行,这些测试实验获得超过1TB容量的数据。下面总结了测试期间仪器性能的全面评估结果,当有更多资料或算法改进后再做更新。发射前性能测试,为在轨性能监测和在轨定标以及数据处理为基本物理量的初始函数提供初始可参考数据。

##### 4.1 光谱特性

仪器相对光谱响应是在两个不同环境下测试得到的,太阳反射波段在洁净的室内环境获取,热红外发射波段在真空测试系统下得到。图5显示了FY-3B发射前测试得到的可见光及近红外通道光谱响应函数。表2中第2和第3列分别给出了指标需求的各通道中心波长和波段宽度,它们分别指通道的波长中心点和范围。MERSI的带外响应特性是通过宽波段滤光片在各探测器响应波段外光谱区扫描双单色仪得到的。带外响应定义在响应峰值1%以外(上、下)响应与1%以内响应积分值之比。MERSI在FY-3A上的初步结果表明,除通道8外,没有较大异常,带外抑制性能较好。

##### 4.2 辐射性能

(1)灵敏度(信噪比(SNR)及噪声等效温差(NEDT))

MERSI的辐射灵敏度,在太阳反射通道以噪声等效反射率表示,红外通道以发射前真空测试时计算的噪声等效温差反映。测试时将一个直径100cm的球型积分源(spherical integrating source, SIS)放置在真空罐外,MERSI通过熔融玻璃舱口观测积分球。通过80个扫描数据,计算积分球信号与模拟冷空信号差值

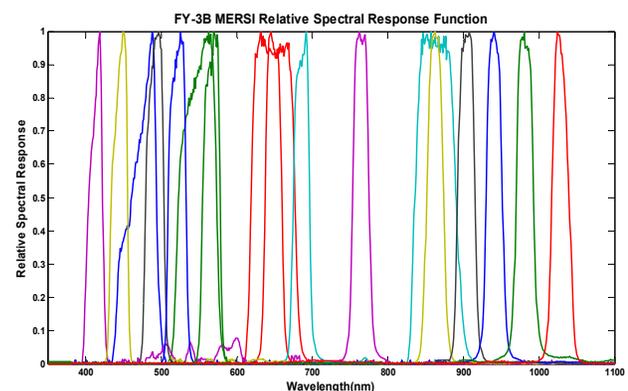


图5 FY-3B/MERSI发射前测试得到的可见光及近红外波段光谱响应

表2 MERSI光谱特征指标需求

通道序号	中心波长 (μm)	光谱带宽 (μm)	空间分辨率 (m)	噪声等效反射率A (%) /温差 (300K)	信号动态范围
1	0.470	0.05	250	0.45	100%
2	0.550	0.05	250	0.4	100%
3	0.650	0.05	250	0.4	100%
4	0.865	0.05	250	0.45	100%
5	11.25	2.5	250	0.4K	330K
6	1.640	0.05	1000	0.08	90%
7	2.130	0.05	1000	0.07	90%
8	0.412	0.02	1000	0.1	80%
9	0.443	0.02	1000	0.1	80%
10	0.490	0.02	1000	0.05	80%
11	0.520	0.02	1000	0.05	80%
12	0.565	0.02	1000	0.05	80%
13	0.650	0.02	1000	0.05	80%
14	0.685	0.02	1000	0.05	80%
15	0.765	0.02	1000	0.05	80%
16	0.865	0.02	1000	0.05	80%
17	0.905	0.02	1000	0.1	90%
18	0.940	0.02	1000	0.1	90%
19	0.980	0.02	1000	0.1	90%
20	1.030	0.02	1000	0.1	90%

的标准偏差。

### (2) 动态范围

MERSI各通道都有唯一的最大辐射值。MERSI在太阳反射波段各通道的满量程信号在实验室SIS测试和室外发射前定标时测量得到，作为指标要求的最大辐射值测量指标的一部分。

### (3) 线性度

MERSI的线性度通过实验室积分球和真空测试来表征仪器辐射响应。这些辐射源调整到几个辐射能级，并测量MERSI对它们的信号响应。仪器响应结果与辐射能级之间的关系用二次多项式拟合，进而得到仪器响应函数，并评估其非线性特征。为了评价仪器的非线性特征，根据SIS和TV测试的仪器辐射响应实验数据，评估辐射值和DN<sub>s</sub>值之间的关系，主要分析二次项部分。

## 4.3 发射前室外太阳辐射定标

由于发射前定标和入轨传递过程的不确定性，MERSI不能提供在轨星上绝对定标基准。MERSI第一个定标系数是基于室内扫描均匀积分球源的不同能级输出的测量得到。室内定标同时给出了所有通道初步动态范围，再经过室外太阳定标后进行适当调整。图6显示了在大理由MERSI研制方进行的卫星发射前太阳辐射基定标 (solar-radiation-based calibration, SRBC) 照片，该定标方法类似于SeaWiFS方法<sup>[36, 37]</sup>。SRBC定标以太阳作为辐照源，MERSI测量16个不同反射率 (5%~99%) 参考板反射的太阳辐射。联合这些

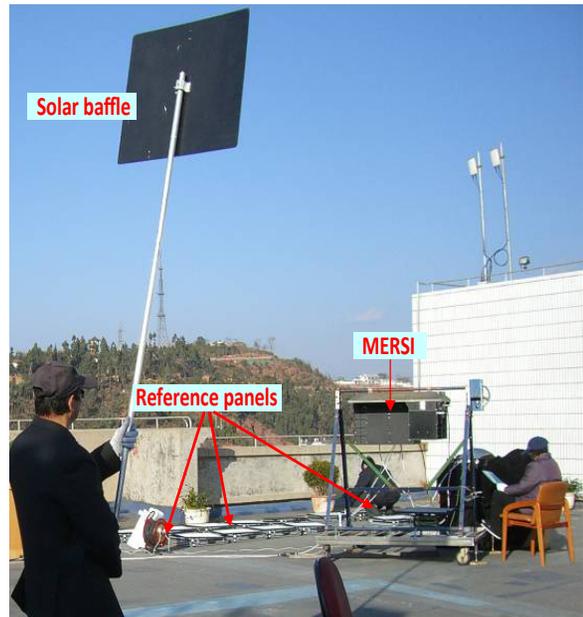


图6 2006年12月大理FY-3A/MERSI发射前室外太阳辐射定标 (SRBC) 照片

参考板的测量计数值，确定MERSI在各通道定标系数。由式 (2) 变换得到MERSI的定标系数由下式计算：

$$k(g) = \frac{\overline{L(\lambda)}}{(DN - DN_0)} \quad (4)$$

其中， $\overline{L(\lambda)}$ 为MERSI观测参考板时在各通道的平均辐亮度值，即

$$\overline{L(\lambda)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda)d\lambda} \quad (5)$$

其中， $R(\lambda)$ 为MERSI各通道的光谱响应函数， $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 分别为光谱响应函数的起止波长， $L(\lambda)$ 为参考板太阳反射光谱辐亮度：

$$L(\lambda) = \frac{1}{D^2} \cdot \frac{E_0(\lambda) \cdot \cos(\theta_i)}{\pi} \cdot F(\theta_i, \lambda) \cdot T(\lambda) \quad (6)$$

其中， $E_0(\lambda)$ 为大气层顶太阳辐照度， $D$ 为日地天文距离， $F(\theta_i, \lambda)$ 为太阳天顶角 $\theta_i$ 时参考板的二向性反射率因子， $T(\lambda)$ 为太阳直接辐射的大气透射率 (无量纲)。联合式 (4) ~ (6) 可求解 $k$ ，得到：

$$k(g) = \frac{1}{(DN - DN_0)} \cdot \frac{1}{D^2} \cdot \frac{\cos(\theta_i)}{\pi} \times \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\theta_i, \lambda) \cdot E_0(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot R(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda)d\lambda} \quad (7)$$

使用太阳光源，通过测量一组参考板为MERSI定标，其传感器和电子组件必须放到室外。MERSI的

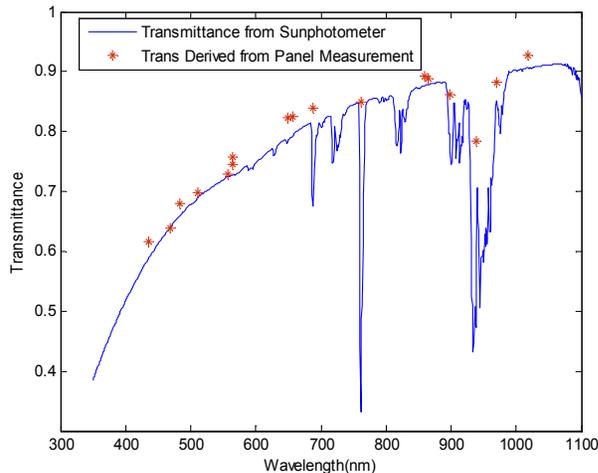


图7 2006年12月24日大理发射前室外定标试验大气透射率测试结果: 红色星形为参考板测量并兰勒(Langley)计算的通道总透过率; 蓝色曲线为大气光谱透过率, 它由太阳光度计进行的大气衰减测量并结合MODTRAN辐射传输计算得到

研制方中科院上海物理研究所经过这种真实太阳源地面测试来检验实验室内的增益设置是否适当。同时, 室外定标试验还需采用CE318太阳光度计测量主要大气成分的透过率。图7为大气透射率测试结果, 它通过太阳光度计测量气溶胶光学厚度, 通过差值并联合MODTRAN模型<sup>[45]</sup>得到每个通道透过率, 也可以使用所有参考板测量的兰勒图(Langley)<sup>[46, 47]</sup>得到。图8为FY-3A/MERSI第8通道的辐射定标系数回归曲线, SRBC太阳辐射校正定标曲线(接近直线)。室外定标的最大不确定性在于大气透射率和参考板的反射率。SRBC试验得到的定标系数 $k(g)$ 可与发射前室内积分球绝对辐射定标系数作对比。用室外太阳光源开展传感器定标的方法也有一些风险和不足, 仪器光学部件暴露室外环境容易受到污染。另外, 只有天空晴朗并且气溶胶浓度比较低的情况下大气透射率测量才会更加准确。

最后, 室外SRBC定标结果需要传递到仪器在轨条件下, 可见光星上定标器(VOC)通过以下两个步骤提供了这种传递桥梁。第一步, 定标器内部定标灯发射前打开时, 把室外SRBC定标基准转换成VOC辐射输出。第二步, 在MERSI入轨后不久再次测量VOC开灯信号, 认为此时VOC定标灯开启时辐射输出与发射前一致。发射后MERSI对VOC响应的初始变化被用来调整发射前室外SRBC试验得到的定标系数。

因此, 最重要的就是评估MERSI对VOC开灯响应在发射前和VOC第一次星上测量的相对变化。MERSI发射前的室内室外定标和特性测试为上述定标系数调整和数据预处理系统(DP<sup>2</sup>S)提供了初始输入。DP<sup>2</sup>S

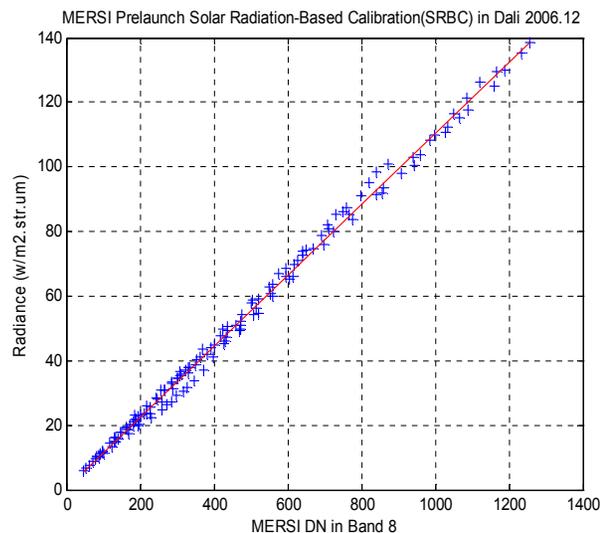


图8 FY-3A MERSI第8通道辐射输入与DN值回归图(数据来自于2006年12月发射前大理室外SRBC定标试验)

将把仪器观测计数值转换成仪器入瞳辐射值。

## 5 在轨定标性能测试

### 5.1 中国辐射场地定标

基于中国辐射校正场敦煌场的替代定标是目前风云系列卫星业务定标的基本手段<sup>[30, 48, 49]</sup>。该方法自1999年开始用于FY-1C/D业务定标, 并被后续的其他仪器继承下来<sup>[49]</sup>。CRCS场地替代定标不仅用于在轨测试阶段订正发射前部分通道定标的明显偏差, 还可用于跟踪在轨传感器辐射响应衰减。自2008年9月起, 每年都开展一次敦煌场地MERSI替代定标, 定标试验以星地面同步观测进行, 获取地面反射率和大气参数(气溶胶、水汽含量、大气廓线)。另外, CRCS替代定标也基于部分现场测量进行<sup>[29]</sup>, 这种定标方法仅有大气参数观测而没有地表反射率测量, 由于敦煌气象观测站有长期的CE318大气气溶胶观测和气象观测, 从而可实现增加定标频次。基于多次敦煌场地替代定标结果, 可以推断MERSI各通道在轨衰减情况, 在短波波段辐射响应衰减显著, 尤其在第1, 8, 9和10波段, 第一年8通道最大衰减率超过15%。这些波段的衰减率在第二年变缓, 但在这些短波波段的衰减率依旧较大。

2010年最新的场地定标结果显示, 短波波段(<500nm)通道1, 8, 9的辐射响应衰减仍然明显, 两年在轨运行后, 其最大衰减率超过20%。因此, 业务定标系数采用最新的2010年8月敦煌场地替代定标结果进行更新, 表3列出了2008年和2010年的敦煌场替代定标试验结果。

表3 2010年8月敦煌辐射校正场场地替代定标获得的定标系数（表观反射率/DN）

Band	8/13/10	8/14/10	8/18/10	8/20/10	Mean	Std	CV(%)	09/10/08	Degradation Total(%)
1	0.0339	0.0343	0.0343	0.0355	0.0345	0.0007	2.0275	0.0312	9.565
2	0.0301	0.0311	0.03	0.0314	0.0306	0.0007	2.2899	0.0295	3.595
3	0.0244	0.0252	0.0245	0.0255	0.0249	0.0005	2.0657	0.0253	-1.606
4	0.0283	0.0292	0.0287	0.0293	0.0289	0.0004	1.4844	0.0299	-3.460
6	0.0175	0.0181	0.0175	0.0181	0.0178	0.0003	1.8889	0.0229	—
7	0.0236	0.0241	0.0237	0.0251	0.0241	0.0007	2.7578	0.0241	—
8	0.0284	0.029	0.0287	0.0298	0.029	0.0006	1.9754	0.023	20.690
9	0.0275	0.0276	0.0277	0.0285	0.0278	0.0004	1.6174	0.0245	11.871
10	0.0257	0.0262	0.026	0.0269	0.0262	0.0005	2.0317	0.0247	5.725
11	0.0203	0.0209	0.0205	0.0212	0.0207	0.0004	2.0058	0.0199	3.865
12	0.0237	0.0246	0.0238	0.0247	0.0242	0.0005	2.1456	0.0237	2.066
13	0.0223	0.023	0.0224	0.0233	0.0228	0.0005	2.0734	0.023	-0.877
14	0.0212	0.022	0.0212	0.0222	0.0217	0.0005	2.4655	0.022	-1.382
15	0.029	0.0302	0.0291	0.0301	0.0296	0.0006	2.0276	0.028	5.405
16	0.0211	0.0217	0.0212	0.0217	0.0214	0.0003	1.4571	0.0219	-2.336
17	0.0253	0.0266	0.0255	0.027	0.0261	0.0008	3.1679	0.0267	-2.299
18	0.0341	0.0373	0.035	0.0409	0.0368	0.003	8.1617	0.0232	36.957
19	0.0242	0.0249	0.0244	0.0259	0.0248	0.0008	3.0274	0.0249	-0.403
20	0.0273	0.0284	0.0275	0.0291	0.0281	0.0008	2.9393	0.0265	5.694

CV: Coefficient of variation of calibration coefficient in several days; Decay Rate is the total degradation during two year from Sept 2008 and Aug 2010.

## 5.2 VOC 跟踪仪器响应

MERSI入轨后暴露在太空和无大气环境下，必须监测其在轨性能变化。除环境影响因素外，仪器还可能有短期的信号波动，如电源供应的不稳定，或者在MERSI冷却的光学元件表面上有冷凝物质逐渐聚集，因此设计一个有效的替代方法来监测仪器在轨性能显得尤为重要。当FY-3A数据预处理系统生成地球目标（Earth view, EV）文件的同时，会生成一个星上定标（OBC）数据文件，它包括了仪器在轨工程学和遥

测数据。虽然MERSI可见光星上定标器不能实现星上绝对辐射定标，但它可以作为一个辐射源用来监视MERSI的辐射响应衰减。

VOC经扩束系统后输出为平行光源，而非漫射源，其辐亮度或辐照度难以精确测量。尽管如此，但它的辐射输出在短时间内相对稳定，可由陷阱探测器监视其长期变化。因此，VOC可用作监视MERSI响应的相对变化。图9显示了MERSI从2008年7月1日到2011年7月15日3年间的辐射响应衰减。陷阱探测器检

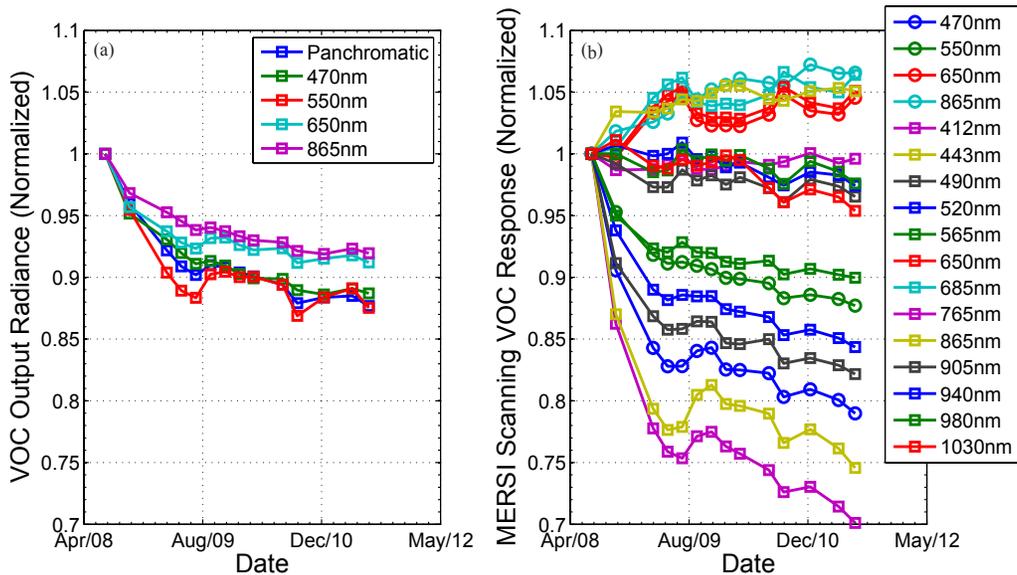


图9 VOC监测FY-3A MERSI 在2008年7月1日—2011年7月15日期间的辐射响应衰减  
(a) VOC的归一化辐射输出（内部定标灯开启时陷阱探测器信号分别在470, 550, 650和865 nm 4个全色通道）；  
(b) MERSI 17个太阳反射通道辐射响应衰减率，由不同日期MERSI扫描内部定标灯开启时VOC的输出得到

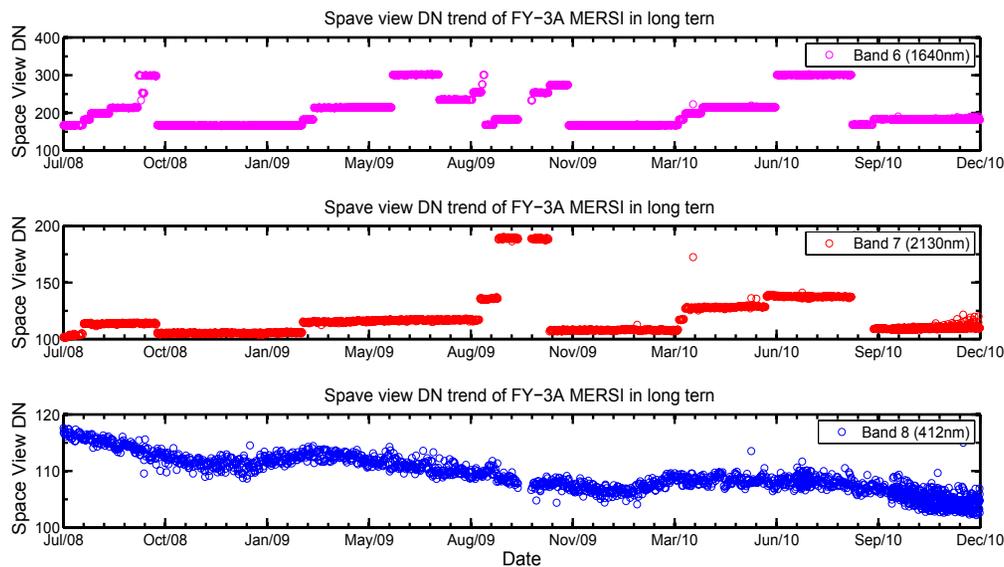


图10 2008年7月—2010年12月MERSI第6, 7, 8通道的冷空信号变化 (DN<sub>sv</sub>) 趋势

测到了内部定标灯的照度衰减。图9a为MERSI在不同日期内部定标灯开启状态VOC的辐射输出变化趋势。为了能与其他替代定标在相同起始日期进行比较, 归一化时间点定于2008年7月1日, 第一次场地替代定标在2008年9月进行。自2008年7月1日起, VOC定标灯照度输出的衰减率在所有谱段均超过5%, 而MERSI仪器小于550nm通道的衰减率超过10%。从MERSI扫描VOC的信号中扣除VOC输出源的变化, 推导出了MERSI在所有太阳反射通道的响应衰减率(图9b)。由图9b可见, 卫星发射后响应总衰减率超过10%的有第1(470nm), 8(412nm), 9(443nm), 10(490nm)和11(520nm)波段。最大衰减率在第8通道, 3年内衰减近20%。有两个绿光通道(550和565nm)和一个近红外通道(1030nm)衰减率超过5%。在650~980nm的近红外通道较稳定, 其3年间的衰减率低于5%。有趣的是在近红外区的一些通道竟有响应不到5%的轻微增加。响应衰减的速率随时间间隔不同而不同, 这意味着MERSI设备响应随时间呈非线性变化。第一年衰减率快, 一年后衰减速率变慢, 并在某些时段有小的起伏波动。

MERSI除了扫描VOC外, 还扫描冷空(SV)和星上黑体(BB), 得到信号计数值, 分别记为DN<sub>sv</sub>和DN<sub>bb</sub>。国际气象卫星协调组<sup>[50]</sup>建议遥感器观测这些信号, 用于监视在轨仪器运行状态和辐射性能的变化。图10显示MERSI在第6, 7通道因增益异常跳变, SV信号表现出异常跳变的现象。这种跳变现象也反映在地球目标原始图像亮度跳变上(图略)。热红外第5通道也表现出同样的跳变情况(图略)。由替代定标得

到的第6, 7波段定标斜率也同时表现出和DN<sub>sv</sub>随机同步跳变。仪器研制方解释这种现象是由MERSI在短波红外和热红外通道电子增益异常跳跃引起, 因为这些通道容易受到超级电子污染, 超级电子由自然环境下高能质子撞击探测器生成。红外第5通道可通过黑体和冷空观测实现实时校正, 但是通道6, 7的定标算法不能根据式(3)直接得到, 它必须用当时的遥测数据中电子增益状态对定标系数进行调整。仪器研制方提供了发射前红外通道8个台阶电子增益设置的倍数(1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.43, 1.57, 1.7和1.87), 定标系数可由DN<sub>sv</sub>与DN<sub>sv0</sub>的比值来做调整(DN<sub>sv0</sub>为电子增益等于1.0时的最低SV计数值)。

### 5.3 基于敦煌沙漠交叉定标

太阳反射波段的交叉定标方法由Liu等<sup>[51]</sup>提出, 由于MODIS仪器具备较高的定标精度<sup>[34, 35]</sup>, 并且卫星过境局地时间和FY-3A相似, 故Terra/MODIS被选作基准传感器。从2008年7月至2010年底, 同时获取了MERSI和Terra/MODIS同一天在敦煌戈壁沙漠的晴空观测资料。用6S辐射传输模型<sup>[52]</sup>, MODIS测量的大气层顶反射率被转换为地表反射率, 并用地面测量的BRDF模型将它们修正到MERSI几何观测视角上的反射率。基于敦煌沙漠具有相对平滑反射率光谱的假设<sup>[30, 51]</sup>, BRDF修正后的MODIS地表反射率数据采用样条插值方法插值成连续反射率光谱, 然后利用MERSI的光谱响应函数, 将插值后的光谱反射率卷积到MERSI通道上, 并进一步用6S辐射传输模型<sup>[52]</sup>转换成与MODIS同样大气状况的大气层顶表现反射率。利用MERSI暗太空观测或其他定标点, 用匹配数据计算

表4 FY-3A MERSI与TERRA/MODIS在太阳反射波段  
2008年7月—2010年12月的交叉定标结果

Apparent Reflectance $\times \cos(\theta_s) = \text{Slope} \times (\text{DN} - \text{DN}^0)$ (%)					
Scale = $(a + b \times \text{Days\_SinceLaunch})$ (%/DN)					
Band	a (%/DN)	b (%/DN/ Days)	Uncert. $\sigma$	$2^*\sigma$ / Mean (%)	Deg. Rate (%/a)
1	0.0301	4.157E-06	0.0012	7.45	5.04
2	0.0297	1.354E-06	0.0009	5.91	1.66
3	0.0245	-1.002E-06	0.0007	5.46	-1.49
4	0.0301	-2.065E-06	0.0007	5.14	-2.51
6	0.0280	-1.158E-05	0.0046	36.74	-15.09
7	0.0225	-2.793E-06	0.0017	15.49	-4.53
8	0.0204	7.984E-06	0.0009	7.69	14.28
9	0.0229	4.936E-06	0.0012	10.07	7.86
10	0.0239	2.498E-06	0.0008	6.25	3.82
11	0.0197	1.551E-06	0.0006	6.17	2.86
12	0.0236	6.086E-07	0.0007	5.76	0.94
13	0.0225	-8.020E-07	0.0006	5.45	-1.3
14	0.0215	-6.217E-07	0.0006	5.37	-1.06
15	0.0266	2.747E-07	0.0007	5.52	0.38
16	0.0219	-6.553E-07	0.0005	5.04	-1.09
17	0.0261	-2.076E-07	0.0016	12.47	-0.29
18	0.0365	5.687E-08	0.0071	39.45	0.06
19	0.0247	-2.145E-07	0.0014	11.67	-0.32
20	0.0276	1.797E-06	0.0007	4.79	2.37

注: \* Days\_SinceLaunch = Day Count since FY-3A Launched @ 2008-05-27

所有太阳反射通道的传感器响应增益（定标斜率）。

由表4可见，短波通道的响应增益（1/Scale）在两年中始终有明显的衰减。如果假定这种衰减近似线性的话（但VOC结果不太支持），增益的线性回归可揭示仪器的衰减率，围绕线性回归直线（标准偏差 $\sigma$ ）的波动反映出定标系数的不确定性<sup>[30]</sup>。对水汽吸收通道（第17, 18和19通道）的沙漠交叉定标方法，

其不确定性太大以至不能接受。通道8, 9与其他定标方法得到的衰减率一致，通道1, 2, 10和11有中等程度的衰减，其他通道衰减不到2%，增益近似稳定。

## 5.4 在轨验证

FY-3A MERSI主要部件自2008年6月3日开启后工作状态基本良好，扫描镜、焦平面电子线路以及前面讨论过的定标和性能测试过的装置均功能正常，辐冷罩也被打开并运转正常。不幸的是，FY-3A MERSI的消旋K镜仪器开始工作两天后便不工作，导致获取的地球图像出现旋转。根据图像旋转机制，很快在数据处理系统中开发了一套消旋处理程序。最新MERSI L1级数据产品预处理程序于2008年9月完成更新，随后MERSI L1数据基本保持稳定，用于生成其他L2数据产品，2008年底开始提供Beta版数据产品。

为了测试仪器性能指标，卫星在轨验证（in-orbit verification, IOV）阶段需要获取MERSI性能特征的一批关键参数，包括信噪比、动态范围、空间分辨率、调制传递函数、通道配准、多探元一致性、仪器稳定度及饱和和恢复等。除了通道7部分探元未满足指标要求以外，太阳反射波段（第1~4和6~20通道）的信噪比（用噪声等效反射率 $NE\Delta\rho$ 描述）在大部分通道符合指标要求（图11）。图11中实线为仪器性能指标要求。另外，还不定时检测MERSI在轨信噪比，了解性能参数是否发生变化。由于VOC不能提供太阳波段的绝对定标，星上定标和验证严重依赖于替代定标手段，但VOC能够监测MERSI太阳反射波段辐射响应的相对变化。敦煌辐射校正场的多次野外观测数据表

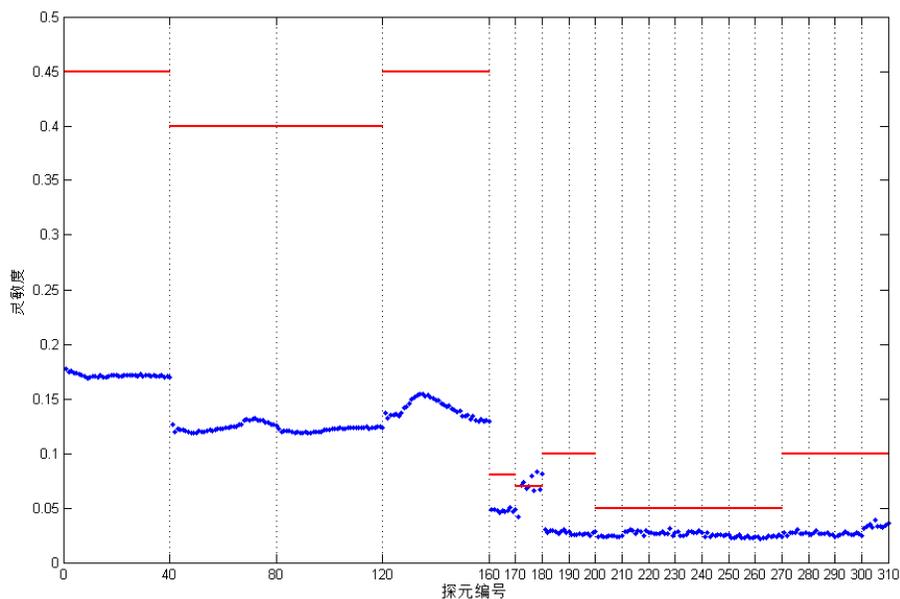


图11 FY-3A在轨测试阶段MERSI冷空观测逐探元噪声等效反射率（ $NE\Delta\rho$ ）（x轴：探元1~160为波段1~4，每波段40探元；探元161~310为波段6~20，每波段10个探元，红线为 $NE\Delta\rho$ 指标要求值，蓝色为2008年8月在轨测试结果）

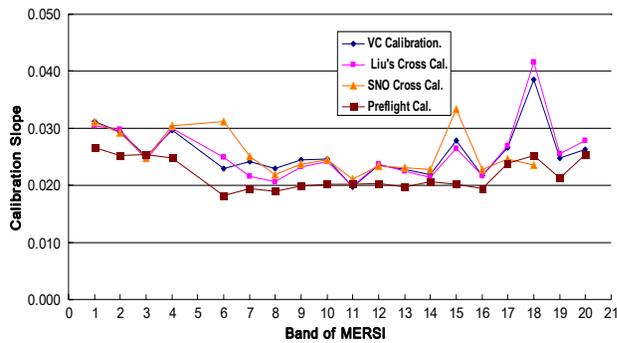


图12 2008年在轨测试阶段不同定标方法得到的定标系数斜率相互比较

明, MERSI绝对定标准准确率优于5%<sup>[28, 48]</sup>, 比指标要求的7%要好, 该替代定标方法已经成为MERSI在轨定标检验的重要手段之一。

2008年9月FY-3A/MERSI在轨测试阶段开展了第一次敦煌场地定标试验<sup>[30]</sup>, 定标试验采用卫星、地面同步测量。图12为敦煌辐射校正场替代定标结果, 并与发射前定标及2009年9月其他两种交叉定标结果进行对比。除了用文献[48]提出的方法外, 星下点同步观测(SNO)方法<sup>[26]</sup>也被用到基于Terra/MODIS相近波段的交叉定标。通过这3种方法的相互比较, 多数通道定标结果比较一致, 但是两个具有较大大气吸收的近红外通道(15和18)差别较大。短波红外波段的第6和7通道也存在不一致, 这是因为MERSI电子增益存在随机跳变。这些在轨定标结果验证了MERSI发射前定标存在较大偏差(通道3, 11和14除外)。2008年12月采用MERSI替代定标结果对其业务定标系数进行了更新, 但大气吸收通道不更新。

### 5.5 长期定标跟踪分析

FY-3A发射后, 分别用前面提到的3种定标方法对MERSI单独开展辐射定标分析, 最后将所有方法的定标结果集成到定标综合分析系统中, 用于MERSI定标系数的更新。图13显示了用3种方法得到MERSI在轨两年总衰减率(2008—2010年)。虽然不同的定标方法得到的衰减略有不同, 但它们的衰减相对趋势却非常一致, 大多数通道的衰减率低于3%。短波通道(<500nm)衰减较大, 波长较长的通道除第6, 7和20通道外, 衰减率较小, 最大衰减是第8通道, 两年的总衰减超过20%。在红色和近红外波段(600~900nm), 包括第13, 14, 15和16通道, 定标系数非常稳定, 衰减小于2%。通道3和4有轻微的辐射响应增强(定标斜率变小)。第17, 18, 19通道由于大气吸收影响, 敦煌辐射校正场替代定标和沙漠交叉定标具有较大的不确定性, VOC跟踪显示它们的

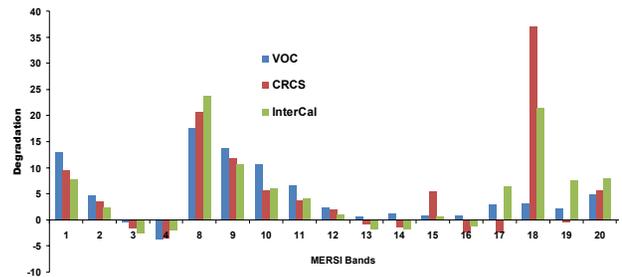


图13 2008年9月至2010年8月期间采用VOC、CRCS和交叉定标三种定标方法得到太阳反射波段衰减率( $F_d$ )比较(相对衰减以2008年9月10日为起始日期, 蓝色、红色和绿色分别为VOC、CRCS和交叉定标结果)

辐射响应稳定, 这些通道还需采用其他手段进行更多验证。另外, 也发现衰减速率在不同时段不尽相同, 随时间呈非线性特征。大多数通道在轨初期衰减率较大, 随时间推移, 其衰减速率变缓。根据这些分析和比较, 自发射以来, FY-3A MERSI的定标系数在这些衰减较大的通道(衰减率超过5%)已更新3次。

## 6 结论

FY-3A中分辨率光谱成像是我国气象卫星的最新仪器, 它采用45°扫描镜和独特的K镜消旋技术, 利用多探元跨轨扫描, 具有光谱和辐射分辨率高的特点, 并具有两种空间分辨率实现覆盖全球扫描大气、陆地和海洋对地观测。

MERSI的星上可见光定标器是第一次对可见光通道做星上定标试验, 为监视MERSI太阳反射波段辐射响应的相对衰减趋势提供了有效工具。发射前性能测试和定标试验显示, MERSI的性能符合指标设计要求, 为L1级数据产品生成和应用提供了基础参数。采用多参考板太阳光源室外定标是一种较独特的定标方法, 能够提供较高的定标精度。在中国敦煌辐射校正场进行场地定标, 自2008年开始, 每年夏天如期进行, 已经作为基线定标方法。本文还采用基于Terra/MODIS的交叉定标多次验证上述定标和跟踪结果。这些定标方法结果的相互比较显示MERSI定标精度可靠, 相互差异小于5%。3种方法的结果表明, 除大气吸收较强的通道外, MERSI大部分通道不同方法结果相对一致。超过两年的定标跟踪显示, FY-3A MERSI较短波长通道(<500nm)具有明显的响应衰减(超过10%), 最大衰减出现在第8通道, 总衰减率超过20%。太阳反射波段的19个通道中, 有7个通道(1, 2, 8, 9, 10, 11和20)有明显的超过5%的衰减。过去两年中, 所有定标方法也一致表明MERSI的红色和近红外通道(600~900nm, 包括第13, 14, 15和16通道)基本稳定, 衰减率低于2%。同时发现, 衰减速

率随时间呈非线性特征，第一年的衰减速率比第二年快。这些仪器响应衰减信息已反馈给仪器研制方，为今后进一步提升仪器性能提供支持。

MERSI的定标跟踪和验证方法，为它的产品反演和定量应用提供了重要信息，积累了仪器维护和定标系数在轨更新经验。这些方法得到的定标结果已应用到业务定标系数的3次更新，特别是发射后其衰减率已超过5%的通道。将来还将加强研究，进一步提升定标准确率，并摸清定标不确定性特征。基于这个目的，将采用更多方法来跟踪MERSI定标性能，并做进一步验证。还将采用更多的地球表面和地球外目标，如非洲沙漠<sup>[53]</sup>、格陵兰及Dome C积雪<sup>[54]</sup>、深对流云<sup>[55, 56]</sup>以及月球<sup>[57]</sup>来监测和评估MERSI定标的准确率和一致性。

### 参考文献

- [1] King M D, Greenstone R. EOS science plan: the state of science in the EOS program. NASA headquarters, Washington, DC, NASA NP-1998-12-069-GSFC, 1999.
- [2] Greenstone R, King M D. EOS science plan: executive summary. NASA headquarters, Washington, DC, NASA NP-1998-12-070-GSFC, 1999.
- [3] NASA. Earth Science Reference Handbook, A Guide to NASA's Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions, Washington, DC, 2006.
- [4] Guenther B, Barnes W, Knight E, et al. MODIS calibration: A brief review of the strategy for the at-launch calibration approach. *J Atmos Ocean Technol*, 1996, 13: 274-285.
- [5] Barnes W L, Pagano T S, Salomonson V V. Pre-launch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS AM-1. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36: 1088-1100.
- [6] Guenther B, Godden G D, Xiong X, et al. Pre-launch algorithm and data format for the level 1 calibration products for the EOS AM-1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36: 1142-1151.
- [7] Nakajima T Y, Nakajima T, Nakajima M, et al. Optimization of the Advanced Earth Observing Satellite II Global Imager channels by use of radiative transfer calculations. *Appl Opt*, 1998, 37: 3149-3163.
- [8] Kurihara S, Murakami H, Tanaka K, et al. Calibration and instrument status of ADEOS-II Global Imager. *Proc of SPIE*, 2003, 5234: 11-19.
- [9] Murakami H, Yoshida M, Tanaka K, et al. Vicarious calibration of ADEOS-2 GLI VIS to shortwave infrared bands using global datasets. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 1571-1584.
- [10] Yoshida M, Murakami H, Mitomi Y, et al. Vicarious calibration of GLI by ground observation data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 2167-2176.
- [11] Rast M, Bezy J L, Bruzzi S. The ESA medium resolution imaging spectrometer MERIS: A review of the instrument and its mission. *Int J Remote Sens*, 1999, 20: 1681-1702.
- [12] Bézy J L, Delwart S, Rast M. MERIS—A new generation of ocean-colour sensor onboard Envisat. *ESA Bull*, 2000, 103: 48-56.
- [13] Dong C, Yang J, Zhang W, et al. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2009, 90: 1531-1544.
- [14] Ding L. Flight Model Design of FY-3A Medium Resolution Spectral Imager (MERSI). Shanghai Inst Tech Phys Chin Acad Sci, Shanghai, China, 2005.
- [15] Huang X, Ding L. Calibration Plan for Visible and Near Infrared Bands of FY-3A Medium Resolution Spectral Imager (MERSI). Shanghai Inst Tech Phys Chin Acad Sci, Shanghai, China, 2003.
- [16] 丁雷. FY-3卫星中分辨率光谱成像仪正样(Z01-2)研制总结报告. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2007.
- [17] Kaufman Y J, Holben B N. Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection. *Int J Remote Sens*, 1993, 14: 21-52.
- [18] Rao C R N, Chen J. Inter-satellite calibration linkages for the visible and near-infrared channels for the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-7, -9, -11 spacecraft. *Int J Remote Sens*, 1995, 16: 1931-1942.
- [19] Rao C R N, Chen J. Post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on the NOAA-14 spacecraft t. *Int J Remote Sens*, 1996, 17: 2743-2747.
- [20] Rao C R N, Chen J. Revised post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on the NOAA-14 spacecraft t. *Int J Remote Sens*, 1999, 20: 3845-3491.
- [21] Wu X. Operational calibration of solar reflectance channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)// *Proc SPIE Earth Observ Syst IX*, Barnes W L and Butler J J, Eds, 2004.
- [22] Wu X, Sullivan J T, Heidinger A K. Operational calibration of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) visible and nearinfrared channels. *Can J Remote Sens*, 2010, 36: 602-616.
- [23] Yu F, Wu X. Removal of contaminated pixels from the desert target for AVHRR vicarious calibration. *J Atmos Ocean Technol*, 2009, 26: 1354-1366.
- [24] Heidinger K, Straka W C, Molling C C, et al. Deriving an inter-sensor consistent calibration for the AVHRR solar reflectance data record. *Int J Remote Sens*, 2010, 31: 6493-6517.
- [25] Cao C, Xiong X, Wu A, et al. Assessing the consistency of AVHRR and MODIS L1B reflectance for generating fundamental climate data records. *J Geophys Res*, 2008, 113, D09114.
- [26] K. Heidinger, C. Cao, and J. T. Sullivan, "Using Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) to calibrate Advanced Very High Resolution Radiometer reflectance channels. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107, D23.
- [27] 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. *Remote Sens Environ*, 1987, 22: 11-37.
- [28] 中国遥感卫星辐射校正场管理办公室. 中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [29] 胡秀清, 刘京晶, 邱康睦, 等. 神舟3号飞船中分辨率成像光谱仪场地替代定标新方法研究. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(5): 1153-1159.
- [30] Hu X, Liu J, Sun L, et al. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun(FY) series sensors. *Can J Remote Sens*, 2010, 36: 566-582.
- [31] Guenther B, Xiong X, Salomonson V V, et al. On-orbit performance of the Earth Observing System Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: First year of data. *Remote Sens Environ*, 2002, 83: 16-30.
- [32] Xiong J, Toller G, Chiang V, et al. MODIS Level 1B Algorithm Theoretical Basis Document. NASA MODIS Characterization Support Team, Washington, DC, 2005.
- [33] Sun J, Xiong X, Barnes W, et al. MODIS solar reflective bands on-orbit lunar calibration. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 2383-2393.
- [34] Xiong X, Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization. *Adv Atmos Sci*, 2006, 23: 69-79.
- [35] Xiong X, Sun J, Barnes W, et al. Multiyear on-orbit calibration and performance of Terra MODIS solar reflective bands. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 879-889.
- [36] Barnes R A, Eplee R E, Schmidt G M, et al. Calibration of SeaWiFS. I. Direct techniques. *Appl Opt*, 2001, 40: 6682-6700.
- [37] Eplee R E, Robinson W D, Bailey S W, et al. The calibration of SeaWiFS. II. Vicarious techniques. *Appl Opt*, 2001, 40: 6701-6718.
- [38] Eplee R, Barnes R, Patt F, et al. SeaWiFS lunar calibration methodology after six years on orbit// *Proc SPIE Earth Observ Syst IX*, Barnes W and Butler J, Eds, Bellingham, WA, 2004.

- [39] Barnes R A, Eplee R E, Patt F S, et al. Comparison of SeaWiFS measurements of the moon with the U.S. Geological Survey lunar model. *Appl Opt*, 2004, 43: 5838-5854.
- [40] Simpson J J, Gobat J I, Frouin R. Improve destriping of GOES images using finite impulse response filters. *Remote Sens Environ*, 1995, 52: 15-35.
- [41] Simpson J J, Stitt J R, Leath D M. Improved finite impulse response filters for enhanced destriping of geostationary satellite data. *Remote Sens Environ*, 1998, 66: 235-249.
- [42] Torres J, Infante S O. Wavelet analysis for the elimination of striping noise in satellite images. *Opt Eng*, 2001, 40: 1309- 1314.
- [43] Weinreb M P, Xie R, Lienesch J H, et al. Destriping GOES images by matching empirical distribution functions. *Remote Sens Environ*, 1989, 29: 185-195.
- [44] Wegener M. Destriping multiple detector imagery by improved histogram matching. *Int J Remote Sens*, 1990, 11: 859-875.
- [45] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN7. Geophys Dir Phillips Lab, Hanscom Air Force Base, MA, Tech Rep GLTR-90-0122, 1990.
- [46] Thome K J, Czapla-Myers J, Biggar S. Vicarious calibration of Aqua and Terra MODIS. *Proc SPIE-Earth Observ Syst VIII*, 2003, 5151: 395-405.
- [47] Biggar S F, Gelman D I, Slater P N. Improved evaluation of optical depth components from Langley plot data. *Remote Sens Environ*, 1990, 32: 91-101.
- [48] Zhang Y, Qiu K, Hu X. Vicarious radiometric calibration of satellite FY-1D sensors at visible and near infrared channels. *Acta Meteorol Sin*, 2004, 18: 505-516.
- [49] 李元, 戎志国, 郑照军, 等. FY-3A扫描辐射计的可见近红外通道在轨场地定标. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 2966-2974.
- [50] CGMS36—NOAA WP14 A Web-Based Interface for Near Real-Time Instrument Performance Monitoring 2009, CGMS36—NOAA WP14.
- [51] Liu J J, Li Z, Qiao Y L, et al. A new method for cross-calibration of two satellite sensors. *Int J Remote Sens*, 2004, 25: 5267-5281.
- [52] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 675- 686.
- [53] Smith L, Mutlow C T, Rao C R N. Calibration monitoring of the visible and near-infrared channels of the along-track scanning radiometer-2 by the use of stable terrestrial sites. *Appl Opt*, 2002, 41: 515-523.
- [54] Loeb N G. Inflight calibration of NOAA AVHRR visible and near-IR bands over Greenland and Antarctica. *Int J Remote Sens*, 1997, 18: 477-490.
- [55] Patrick M, Doelling D R, Nguyen L, et al. Assessment of the visible channel calibrations of the VIRS on TRMM and MODIS on Aqua and Terra. *J Atmos Ocean Technol*, 2008, 25: 385-400.
- [56] Fougnie B, Bach R. Monitoring of radiometric sensitivity changes of space sensors using deep convective clouds: Operational application to PARASOL. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 851-861.
- [57] Cao C, Vermote E, Xiong X. Using AVHRR lunar observations for NDVI long-term climate change detection. *J Geophys Res*, 2009, 114, D20.