

FY-3A MERSI 短波红外通道图像 增益突跳自动识别和归一

樊阿馨¹, 徐娜^{2,3*}, 许廷发^{1**}, 胡秀清^{2,3}, 王吉晖¹, 何玉青¹, 张继洲¹, 吴荣华^{2,3}, 徐寒列^{2,3}

¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

²中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

³中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要 搭载于我国第二代极轨气象卫星风云三号 A 星(FY-3A)上的中分辨率光谱成像仪(MERSI), 肩负着获取全球图像和辐射资料的作用。然而, 太空环境影响等因素, 导致短波红外通道发生在轨增益突跳现象, 大大限制了数据的定量应用。通过对冷空、星上定标器和黑体等 MERSI 星上观测目标的分析, 选择冷空作为增益突跳识别的指征目标。提出自动识别、增益归档和档位归一化方法, 采用日识别和天内精检测的方法获取增益突跳时空信息, 采用分类统计突跳数据的方法获取突跳的在轨增益档位, 并利用星上定标源目标和对地观测图像进行归一化效果验证, 实现了对 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道整个生命周期 91 次和 18 次突跳事件的精确定位, 获得了 8 个在轨增益档位和全部突跳事件的档位信息, 并得到了理想的归一化效果验证。研究结果同样显示, 增益突跳事件大多发生在对地目标扫描过程, 而且每个探元增益突跳的时间不尽相同。由于地球目标的复杂性, 基于物理方法很难实现对突跳帧图像的归一。该研究成果不仅有助于 FY-3A MERSI 图像质量的提升, 而且对历史数据再处理也有重要支撑作用。

关键词 成像系统; 短波红外通道; 增益突跳; 自动识别; 增益归档; 归一化

中图分类号 TP722; V474.1+4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1111001

Identification and Normalization of Image Gain of FY-3A MERSI Shortwave Infrared Bands

Fan Axin¹, Xu Na^{2,3*}, Xu Tingfa^{1**}, Hu Xiuqing^{2,3}, Wang Jihui¹,
He Yuqing¹, Zhang Jizhou¹, Wu Ronghua^{2,3}, Xu Hanlie^{2,3}

¹Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System of Ministry of Education,
School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

³Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,
China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Medium-resolution spectral imager (MERSI) obtains global image and radiation data from the second generation polar-orbiting meteorological satellite, FY-3A, launched by China. However, the on-orbit gain levels of imager in shortwave infrared bands occasionally jump due to the unpredictability of space environment and other factors. Such phenomena limit the quantitative application of the data. The space view is selected to identify gain jumps based on the analysis of MERSI observation targets, such as space view, visible onboard calibrator, and blackbody. Automatic identification, gain classification, and level normalization are proposed as methods. The daily identification and intraday precision detection methods are combined to obtain the time and space of gain jumps, and the classified statistical method contraposing the data of gain jumps is used to obtain the on-orbit gain levels. In addition, the onboard calibration source targets and Earth view images are used to verify the normalized effect. The 91 gain jumps of 1.64 μm and 18 gain jumps of 2.13 μm are accurately positioned during the lifetime. In addition, the eight on-orbit gain levels and the levels of all gain jumps are obtained. The results revealed that the normalized

收稿日期: 2018-04-26; **修回日期:** 2018-05-19; **录用日期:** 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(41471304)、国家重点研发计划(2018YFB0504800, 2018YFB0504802, 2018YFB0504900)

* **E-mail:** xuna@cma.gov.cn; ** **E-mail:** ciom_xtf1@bit.edu.cn

effect is ideal. Further, the most gain jumps occur during the Earth view scanning process and the gain jump time varied between the detectors. Because of the complexity of the Earth view targets, it is difficult to realize the normalization of the image of the jumping frame based on the physical methods. These results contribute to the improvement of FY-3A MERSI image quality and play an important role in reprocessing historical data.

Key words imaging systems; shortwave infrared bands; gain jump; automatic identification; gain classification; normalization

OCIS codes 110.3080; 040.3060; 280.4788; 100.2960

1 引 言

极轨气象卫星和静止气象卫星在覆盖范围和分辨率上相辅相成,是获取全球资料与满足区域灾害性天气和环境监测、气象服务、地球系统科学研究的重要工具^[1]。风云三号(FY-3)气象卫星是我国第二代极轨气象卫星^[2],功能和技术在FY-1的基础上都有质的变化。风云三号A星(FY-3A)作为2008年首发试验试用卫星,大致沿地球子午线,围绕地球南北两极运行。其轨道在地球上空836 km处,每天覆盖地球一次,可以获得空间分辨率较高的全球气象资料。中分辨率光谱成像仪(MERSI)作为搭载在FY-3A上的主要仪器,由中国科学院上海技术物理研究所研制^[3],采用45°扫描镜和消旋K镜的跨轨多探元并扫方式进行观测^[4]。对地观测范围为±55.4°,扫描星下点地面分辨率为0.25~1 km^[5-6],在观测波段范围0.40~12.5 μm中共有20个通道^[7]。

FY-3A MERSI短波红外波段包含1.64 μm和2.13 μm两个通道。探测器采用光伏碲镉汞焦平面器件,工作在大约130 K低温条件下。为了降低探测器衰变的影响,实现对不同亮度目标的精细化探测,设置了8档增益(1、1.1、1.2、1.3、1.43、1.57、1.7、1.87),通过地面发指令的方式可以实现增益的在轨调整。但受外太空电离等影响产生脉冲干扰,MERSI电路误触发指令,导致短波红外通道出现增益档位随机突跳的现象。

由于卫星数据的应用以量化的资料为基础,且空间辐射基准存在不确定性^[8],MERSI设计了多种星上定标源^[9]。搭载的星上定标装置(OBC)包括冷空观测(SV)、可见光星上定标器(VOC)和星上黑体(BB)。FY-3A MERSI的星上定标器由小型积分球、光线扩束系统和监视探测器组成,具备卤钨灯和太阳光两种光源定标模式^[10-11]。由于定标光源绝对辐射能量测量难度大,星上定标装置在发射过程和运行期间,光学、结构和电子学部件的性能会发生变化,因此,难以建立定标光源绝对辐射能量与MERSI数字化输出之间的对应关系^[9],星上定标设

备因而无法实现在轨绝对定标。

FY-3A业务定标现主要采用场地替代定标法。亚利桑那大学遥感组率先提出场地替代定标法^[12],以某自然地表作为研究对象,采用星地同步测量。这种方法对于人员、仪器依赖度高,且对测量时的气象条件和过顶时间都有严格要求,因而定标频次低。基于同步现场测量的中国遥感卫星敦煌辐射校正场的场地替代定标法,作为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^[5],每年夏天都会例行开展一次野外实验。尽管相关研究已提出自动化辐射定标方法^[13],但一年一次的有限定标次数远不能满足在轨定标系数更新的需求^[4],更加难以修正增益突跳引起的MERSI数字化输出问题,严重影响图像质量和定标精度^[14],进而制约卫星数据的定量应用。

为了修正增益突跳导致的MERSI历史数据问题,改善图像质量,针对长时间序列观测资料,基于星上观测目标,本文提出自动识别无时空规律增益突跳的新方法,并对于整个生命期的数据使用在轨增益档位进行归一化,为历史再定标奠定基础。

2 星上观测现象分析

2.1 星上观测模式介绍

为了识别无时空规律的FY-3A MERSI短波红外通道图像增益突跳,需要依据长期稳定不变的观测目标,但是地球目标较为复杂,且存在大气影响。相对于广泛应用的极地冰雪目标^[15],星上目标相对单一,且处于太空环境,不存在大气影响,因此选择星上目标作为识别长时间增益突跳的依据。MERSI的OBC装置由SV、VOC和BB组成。SV观测深冷空间暗目标,为星上可见光定标提供稳定的零辐射偏移^[16]。VOC的积分球内有两个卤钨灯,通过控制开关状态实现单灯和双灯两种工作模式,为星上可见光定标提供稳定的辐射输入^[10]。BB有效辐射面形状为同心V型深环槽,通过控制黑体温度为星上红外定标提供稳定的辐射输入^[17]。图1所示为MERSI的扫描模式^[18],由图1可知,在

每次扫描期间, MERSI 依次从 SV、地球观测(EV)、VOC、BB 和传感器温度测量仪中获取数据^[19], 扫描周期约为 1.5 s。

使用 FY-3A MERSI 星上定标数据工程文件(OBC)作为分析依据, 该文件包括原始的 SV、VOC、BB 观测信息和其他工程数据。使用时间覆盖整个生命期(2008 年—2015 年)。

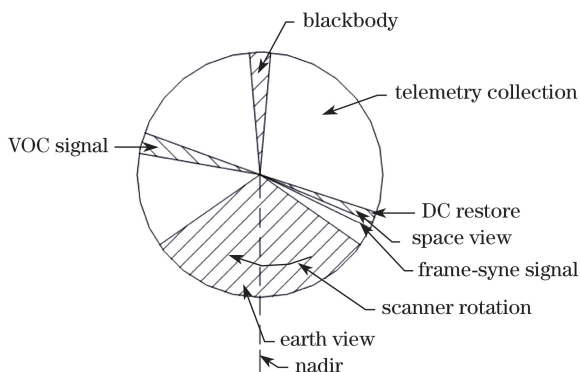


图 1 MERSI 扫描模式
Fig. 1 MERSI scan pattern

2.2 现象分析

以 2012 年 8 月 24 日 $2.13 \mu\text{m}$ 通道为例, 图 2 所示为星上定标源目标日变化与纬度和太阳天顶角的关系。红色曲线代表星上定标源目标, 图 2(a)~(c)分别为 SV、VOC 和 BB 的行平均数据, 对应左侧红色坐标轴。星上定标源目标是像元的响应计数值(DN), 无单位, 量纲为 1。绿色曲线和蓝色曲线分别代表纬度和太阳天顶角, 对应右侧坐标轴。所有曲线的横轴共用, 代表扫描时间。由于 FY-3A 夜晚不下传 MERSI 的扫描数据, 因此基于白天的扫描数据进行现象分析。由图 2 可知, 这一天数据发生了显著的增益突跳: SV 从 150 突跳至 208, 变化了 39%; VOC 从 160 突跳至 220, 变化了 38%; BB 从 145 突跳至 200, 变化了 38%。由预设增益档位与 SV 的数值对应关系可知, 增益档位从 1.3 突跳至 1.87。结合长时间的扫描数据来看, 这种类似的增益突跳还有很多, 且无时空规律可循。为了实现自动识别, 需要选择一种较稳定的星上目标。

由图 2 可知, 星上观测 SV、VOC 和 BB 目标同时发生增益突跳, 而增益不变时的现象也类似。所有星上定标源目标都有显著的轨道变化现象, 每天 14 轨均存在污染数据。污染数据主要出现在北半球中高纬度、太阳天顶角在 $80^\circ \sim 120^\circ$ 由大变小的过程中。这主要是由极轨卫星在高纬昼夜交替时, 太阳光进入遥感器内部导致的^[20]。污染数据的变化幅度极大, 非污染数据也存在一定的波动。VOC 和

BB 非污染数据分别有 18% 和 9% 的波动幅度, 而 SV 相对较稳定, 波动幅度仅为 4%。Ignatov 等^[21]通过分析冷空对提高超高分辨率辐射计(AVHRR)太阳反射波段定标的作用, 指明了稳定 SV 目标的重要性及污染问题。为了自动识别长时间的增益突跳, 选择更稳定的 SV 目标作为研究对象。同时, 注意到太阳污染问题, 在后续识别过程中须借助太阳天顶角避开污染区。

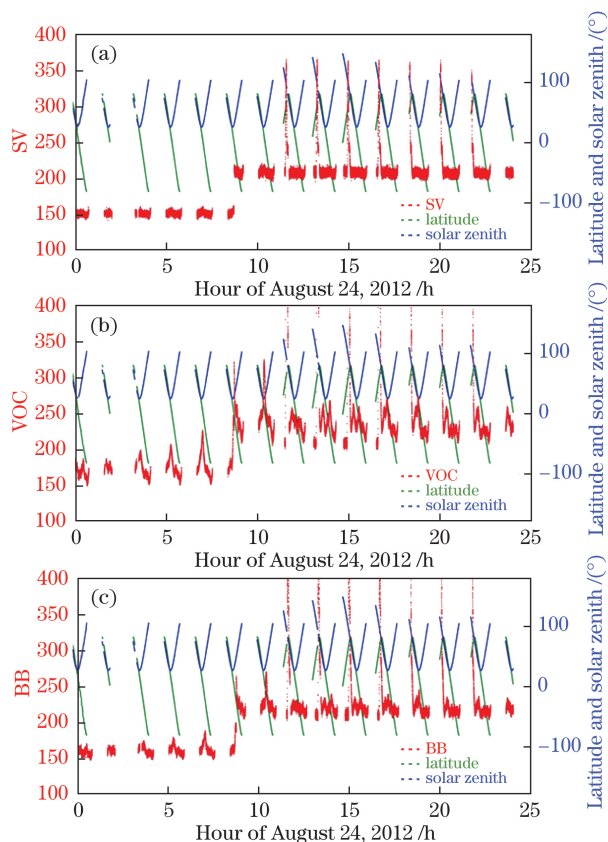


图 2 $2.13 \mu\text{m}$ 星上定标源目标日变化与纬度和太阳天顶角的关系。(a) SV; (b) VOC; (c) BB

Fig. 2 Relation between daily variations of onboard calibration source targets and latitude and solar zenith angle at $2.13 \mu\text{m}$. (a) SV; (b) VOC; (c) BB

3 研究方法

增益突跳自动识别和档位归一化分为两步骤, 一是增益突跳自动识别和精检测, 二是增益归档和档位归一化, 前者是后者的基础与依据。其中, 增益突跳自动识别和精检测是为了识别整个生命期无时空规律的增益突跳事件, 并精确定位到事件发生的具体时刻, 获取详细时空和信号变化信息。增益归档和档位归一化是基于增益突跳检测结果统计获得突跳的在轨增益档位, 旨在对星上定标源目标及对地观测图像进行归一化。

3.1 增益突跳自动识别和精检测

基于稳定的冷空目标,采用日识别和天内精检测的方法获取增益突跳时空信息。日识别用于识别发生突跳的日期,精检测用于识别发生突跳的时刻。因此,日识别基于日平均数据进行,精检测基于天内变化数据进行。

以 2012 年 2.13 μm 通道为例,图 3 所示为冷空目标的年变化,红色曲线代表日平均冷空值。由图 3 可知,4 月 11 日、5 月 22 日、6 月 20 日、6 月 24 日和 8 月 24 日均存在显著的增益突跳。增益突跳数据变化有如下特征:1)发生增益突跳时的日平均数据与众不同,大小处于相邻的两个数据之间,这是由于突跳当天的日平均统计了突跳前、后的数据;2)突跳

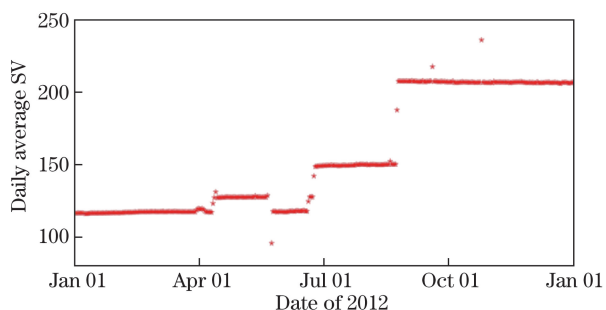


图 3 2012 年 2.13 μm 冷空目标的年变化
Fig. 3 SV variation of 2.13 μm in 2012

表 1 自动识别和增益归档的阈值及依据

Table 1 Threshold value and basis of automatic identification and gain classification

Threshold value	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	α
Value	0.06	0.09	1.5	0.03	0.002
δ basis	The minimum variation of eight preset gain levels (1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.43, 1.57, 1.7, and 1.87) is 0.076 and the maximum is 0.87.				
α basis	The average variation of non-polluted SV values of 2.13 μm is 0.002 from October 1, 2010 to December 31, 2010.				

以图 2(a)显示的冷空目标天内变化为例,08 时 42 分发生显著的增益突跳。增益突跳的天内数据变化有如下特征:1)发生增益突跳的数据与突跳前的数据不同,变化幅度基本位于预设 8 个档位的最邻近和最大比值之间,且远小于污染数据与非污染数据的变化幅度;2)不发生增益突跳的数据虽然存在波动,但变化幅度基本小于预设 8 个档位的最邻近比值。

针对增益突跳的天内数据变化特征,基于滑动比值法进行增益突跳天内精检测:

$$\delta_2 < \left| \frac{S_j}{A_{0,j-1}} - 1 \right| < \delta_3, \quad (4)$$

$$\left| \frac{S_j}{S_{j+1}} - 1 \right| < \delta_2, \quad (5)$$

日期前后相邻的两个数据分别处于不同的增益档位,变化幅度大于预设 8 个档位的最邻近档位比值;3)发生突跳时的数据与相邻两个数据之间也都有一定的变化幅度,均大于不发生增益突跳的数据变化幅度。

基于增益突跳的日平均数据上述变化特征,设置合理的阈值,利用变率法进行增益突跳日识别:

$$\left| \frac{A_{i-1}}{A_{i+1}} - 1 \right| > \delta_1, \quad (1)$$

$$\left| \frac{A_i}{A_{i-1}} - 1 \right| > \alpha, \quad (2)$$

$$\left| \frac{A_i}{A_{i+1}} - 1 \right| > \alpha, \quad (3)$$

式中: i 为待判断是否发生增益突跳的日期; A_{i-1} 、 A_i 、 A_{i+1} 指连续三天的冷空非污染数据日平均值; δ_1 、 α 为检测阈值,取值详见表 1。(1)式用于识别不同增益档位的冷空值,以排除类似于图 3 中 2012 年 10 月 25 日数据异于其他数据、但未发生增益突跳的干扰。(2)、(3)式同时使用,以排除识别到增益突跳前后的某一天,但又与相邻的某一日数据相同,并未发生增益突跳的可能。(1)~(3)式共同使用实现日识别,缺一不可。

式中: j 为待判断是否发生增益突跳的时刻; S_j 、 S_{j+1} 指相邻时刻的冷空值; $A_{0,j-1}$ 指天内 j 时刻之前的冷空平均值,取平均用于消除冷空正常值的波动干扰; δ_2 、 δ_3 代表预设增益档位变化幅度的阈值,取值详见表 1。(4)式用于检测增益突跳,并排除污染数据的干扰。(5)式通过限制增益突跳后相邻数据之间的变化幅度,进一步排除污染数据。

3.2 增益归档和归一化

太空环境影响等因素会改变预设增益档位,虽然识别了增益突跳事件,但由于所属增益档位未知,无法进行突跳数据的档位归一化。因此,获取突跳的档位信息十分关键。由于预设的 SV 值在轨发生变化,而且整个生命期内 SV 也会发生衰变,

因此,无法使用具体 SV 值判断增益档位。本文基于突跳的 SV 值,采用比值排序法进行在轨增益自动归档。

以 1.64 μm 通道增益突跳的冷空目标为例,将原始冷空值从小到大排序、分类并通过比值进行增益归档。图 4 所示为 1.64 μm 通道增益归档过程和结果。图 4(a)中横轴代表增益突跳事件的原始序号,即按照 1.64 μm 通道全部 91 次突跳事件发生的

时间顺序排序后的自然序号,图 4(b)~(d)中横轴代表冷空值相关参数排序后的序号,无实际物理意义。图 4(a)、(b)中纵轴代表冷空值。图 4(a)中红色与蓝色用于区分增益突跳前后的冷空值,图 4(c)中红色代表各个突跳冷空值与分类后的最小平均值之间的比值,图 4(d)中红色代表各个突跳冷空值的增益档位。图 4(c)、(d)中蓝色代表在轨增益档位。

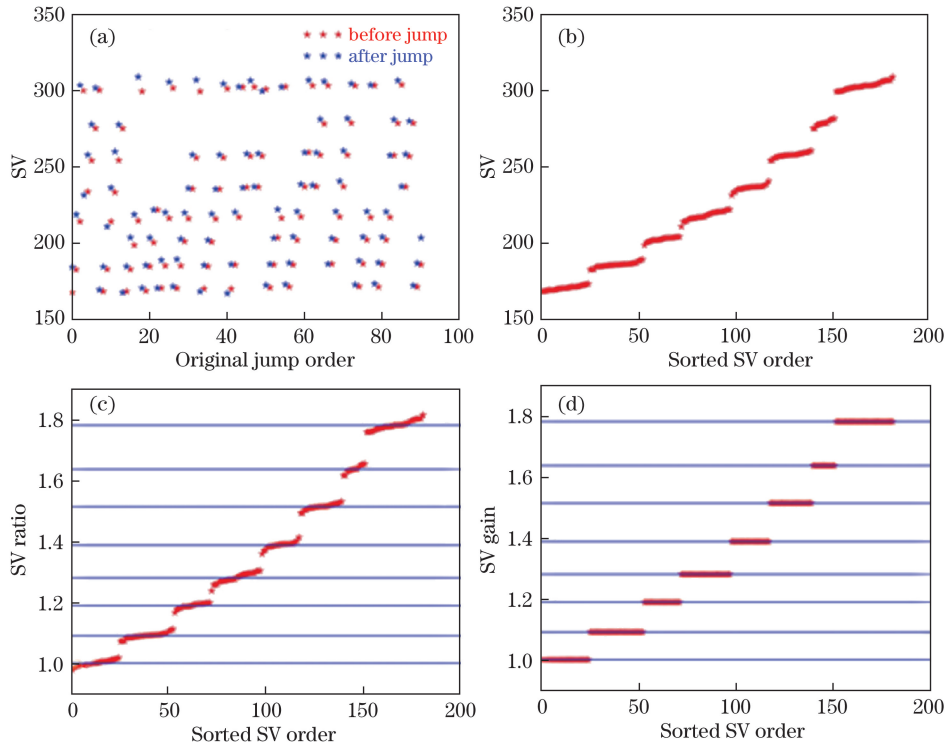


图 4 1.64 μm 增益归档过程和结果。(a)原始值;(b)排序;(c) SV 比值;(d) SV 比值归档

Fig. 4 Gain classification process and results at 1.64 μm . (a) Original jump SV; (b) sorted jump SV; (c) sorted SV ratio; (d) SV ratio classification

由图 4(a)可知,增益突跳的冷空值无序排列,但每一次增益突跳前后的冷空值都近似相等,成对出现。由图 4(b)可知,从小到大排序后的冷空值明显有 8 类,并且每一类冷空值都呈递增趋势,由冷空值的分布即可预测 8 个在轨增益档位。由图 4(c)可知,每个冷空值都有最邻近的在轨增益档位。

由于在轨实际冷空值与预设增益档位对应的理论冷空值有所偏差,根据在轨冷空值的分类统计特征计算在轨实际工作档位。基于增益突跳的冷空值分布特征,采用比值法进行分类。采用均值法和比值法计算在轨增益档位,将冷空值逐类求平均,再将各类平均值与最小平均值求比值,便可得到 8 个在轨实际工作档位。采用最邻近法将冷空值一一归档,所有冷空值逐一与最小平均值求比值,根据最邻近原则便可得到在轨增益档位。

$$\left| \frac{S_k}{S_{k+1}} - 1 \right| > \delta_4, \quad (6)$$

$$g_l = \frac{\bar{S}_l}{\bar{S}_{\min}}, \quad (7)$$

$$d_l = \left| \frac{S}{\bar{S}_{\min}} - g_l \right|, \quad (8)$$

式中: k 为待区分排序后相邻冷空值是否属于同一增益档位的序号; S_k 、 S_{k+1} 指排序后相邻的冷空值; l 为在轨增益档位序号, $l=1,2,3,4,5,6,7,8$; \bar{S}_l 指属于同一增益档位的冷空平均值; \bar{S}_{\min} 指最小平均值; g_l 指在轨增益档位; S 指任一冷空值; d_l 指冷空比值与增益档位的绝对差值; δ_4 代表预设增益档位变化幅度的阈值,取值详见表 1。(6)式用于冷空值分类,(7)式用于统计在轨增益档位,(8)式用于确定任一冷空值的增益档位。

为了验证增益突跳识别与增益归档结果的可靠性,基于星上定标源目标和对地观测图像,采用比值法进行增益档位归一化。为了保证图像的对比度,将目标增益档位都化为 1.0。

$$Y = \frac{X}{G}, \quad (9)$$

式中: X 为观测目标的原始 DN 值; G 为在轨增益档位; Y 为档位归一化 DN 值。

4 结果与验证

4.1 增益突跳事件识别结果

基于稳定的冷空目标识别增益突跳, FY-3A MERSI 从 2008 年发射到 2015 年初停止工作, 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道分别发生了 91 次和 18 次增益突跳。表 2 和表 3 分别统计了 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道所有增益突跳事件的日期与突跳前后的理论

表 2 1.64 μm 所有增益突跳事件详细信息

Table 2 Detailed information of all gain jumps at 1.64 μm

Date	Theoretical level		Actual level		Date	Theoretical level		Actual level	
	Before jump	After jump	Before jump	After jump		Before jump	After jump	Before jump	After jump
2009-03-02	1.0	1.1	1.00	1.09	2013-07-23	1.57	1.87	1.51	1.78
2009-03-13	1.1	1.3	1.09	1.28	2013-07-29	1.87	1.43	1.78	1.39
2009-05-29	1.3	1.87	1.28	1.78	2013-08-01	1.43	1.57	1.39	1.51
2009-07-14	1.87	1.43	1.78	1.39	2013-08-02	1.57	1.87	1.51	1.78
2009-08-17	1.43	1.57	1.39	1.51	2013-10-14	1.87	1.0	1.78	1.00
2009-08-25	1.57	1.7	1.51	1.64	2014-02-24	1.0	1.1	1.00	1.09
2009-08-26	1.7	1.87	1.64	1.78	2014-02-24	1.1	1.2	1.09	1.19
2009-08-29	1.87	1.0	1.78	1.00	2014-02-25	1.2	1.3	1.19	1.28
2009-09-06	1.0	1.1	1.00	1.09	2014-02-28	1.3	1.87	1.28	1.78
2009-10-04	1.1	1.3	1.09	1.28	2014-02-28	1.87	1.0	1.78	1.00
2009-10-09	1.3	1.43	1.28	1.39	2014-04-26	1.0	1.1	1.00	1.09
2009-10-14	1.43	1.57	1.39	1.51	2014-04-27	1.1	1.2	1.09	1.19
2009-10-30	1.57	1.7	1.51	1.64	2014-05-16	1.2	1.3	1.19	1.28
2009-11-18	1.7	1.0	1.64	1.00	2014-05-21	1.3	1.43	1.28	1.39
2010-03-06	1.0	1.1	1.00	1.09	2014-05-23	1.43	1.57	1.39	1.51
2010-03-12	1.1	1.2	1.09	1.19	2014-05-23	1.57	1.87	1.51	1.78
2010-03-29	1.2	1.3	1.19	1.28	2014-05-25	1.87	1.43	1.78	1.39
2010-06-10	1.3	1.87	1.28	1.78	2014-05-26	1.43	1.57	1.39	1.51
2010-08-24	1.87	1.0	1.78	1.00	2014-05-27	1.57	1.7	1.51	1.64
2010-09-13	1.0	1.1	1.00	1.09	2014-05-29	1.7	1.87	1.64	1.78
2012-03-18	1.1	1.2	1.09	1.19	2014-05-30	1.87	1.1	1.78	1.09
2012-04-11	1.2	1.3	1.19	1.28	2014-05-31	1.1	1.2	1.09	1.19
2012-05-22	1.3	1.0	1.28	1.00	2014-06-02	1.2	1.3	1.19	1.28
2012-05-30	1.0	1.1	1.00	1.09	2014-06-05	1.3	1.43	1.28	1.39
2012-06-24	1.1	1.3	1.09	1.28	2014-06-06	1.43	1.57	1.39	1.51
2012-07-02	1.3	1.87	1.28	1.78	2014-06-06	1.57	1.7	1.51	1.64
2012-07-04	1.87	1.0	1.78	1.00	2014-06-06	1.7	1.87	1.64	1.78
2012-07-08	1.0	1.1	1.00	1.09	2014-06-10	1.87	1.0	1.78	1.00
2012-08-22	1.1	1.2	1.09	1.19	2014-06-16	1.0	1.1	1.00	1.09
2012-08-23	1.2	1.3	1.19	1.28	2014-06-28	1.1	1.2	1.09	1.19
2012-08-24	1.3	1.43	1.28	1.39	2014-07-03	1.2	1.3	1.19	1.28
2012-09-04	1.43	1.57	1.39	1.51	2014-07-03	1.3	1.87	1.28	1.78
2012-09-09	1.57	1.87	1.51	1.78	2014-07-04	1.87	1.0	1.78	1.00
2012-09-10	1.87	1.0	1.78	1.00	2014-07-06	1.0	1.1	1.00	1.09
2012-10-29	1.0	1.1	1.00	1.09	2014-07-07	1.1	1.2	1.09	1.19
2012-11-14	1.1	1.2	1.09	1.19	2014-07-12	1.2	1.3	1.19	1.28
2012-12-31	1.2	1.3	1.19	1.28	2014-07-14	1.3	1.57	1.28	1.51
2013-01-03	1.3	1.43	1.28	1.39	2014-07-15	1.57	1.7	1.51	1.64
2013-01-05	1.43	1.57	1.39	1.51	2014-07-23	1.7	1.87	1.64	1.78
2013-01-08	1.57	1.87	1.51	1.78	2014-07-24	1.87	1.43	1.78	1.39
2013-01-15	1.87	1.0	1.78	1.00	2014-07-24	1.43	1.57	1.39	1.51
2013-03-07	1.0	1.1	1.00	1.09	2014-07-24	1.57	1.7	1.51	1.64
2013-06-14	1.1	1.3	1.09	1.28	2014-07-27	1.7	1.0	1.64	1.00
2013-07-06	1.3	1.87	1.28	1.78	2014-07-29	1.0	1.1	1.00	1.09
2013-07-20	1.87	1.43	1.78	1.39	2014-07-30	1.1	1.2	1.09	1.19
2013-07-23	1.43	1.57	1.39	1.51					

表 3 2.13 μm 所有增益突跳事件详细信息
Table 3 Detailed information of all gain jumps at 2.13 μm

Date	Theoretical level		Actual level		Date	Theoretical level		Actual level	
	Before jump	After jump	Before jump	After jump		Before jump	After jump	Before jump	After jump
2009-03-02	1.0	1.1	1.00	1.09	2012-04-11	1.0	1.1	1.00	1.09
2009-08-24	1.1	1.3	1.09	1.26	2012-05-22	1.1	1.0	1.09	1.00
2009-09-10	1.3	1.7	1.26	1.77	2012-06-20	1.0	1.1	1.00	1.09
2009-10-30	1.7	1.0	1.77	1.00	2012-06-24	1.1	1.3	1.09	1.26
2010-03-06	1.0	1.1	1.00	1.09	2012-08-24	1.3	1.87	1.26	1.77
2010-03-12	1.1	1.2	1.09	1.16	2013-06-21	1.87	1.7	1.77	1.66
2010-05-31	1.2	1.3	1.16	1.26	2013-07-29	1.7	1.87	1.66	1.77
2010-08-24	1.3	1.7	1.26	1.77	2014-02-28	1.87	1.43	1.77	1.42
2010-09-13	1.7	1.0	1.77	1.00	2014-04-26	1.43	1.57	1.42	1.56

档位和实际档位等信息。表 4 统计了 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道理论档位与实际档位的偏差情况。由表 4 可知,实际档位与理论档位的偏差不容忽视: 1.64 μm 通道最大偏差达 5.06%, 平均偏差为 2.36%,

方差较小, 仅为 2.80×10^{-4} ; 2.13 μm 通道最大偏差达 5.65%, 平均偏差为 2.12%, 方差较小, 仅为 3.19×10^{-4} 。此外, 整体上偏差随着档位的增大而变大, 1.64 μm 通道较为显著。

表 4 1.64 μm 和 2.13 μm 理论档位与实际档位的偏差情况
Table 4 Deviation between theoretical and actual levels at 1.64 μm and 2.13 μm

Level	Index	1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1.64 μm	Theoretical	1.0	1.1	1.2	1.3	1.43	1.57	1.7	1.87	
	Actual	1.00	1.09	1.19	1.28	1.39	1.51	1.64	1.78	
	Deviation / %	0	0.92	0.84	1.56	2.88	3.97	3.66	5.06	2.36
2.13 μm	Theoretical	1.0	1.1	1.2	1.3	1.43	1.57	1.7	1.87	
	Actual	1.00	1.09	1.16	1.26	1.42	1.56	1.66	1.77	
	Deviation / %	0	0.92	3.45	3.17	0.70	0.64	2.41	5.65	2.12

4.2 归一化效果验证

基于增益突跳识别和归档结果, 分别利用星上定标源目标和对地观测图像进行归一化效果验证。

图 5 所示为 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道冷空目标整个生命期内的归一化效果。图 5(a)、(d) 中标注的绿色竖线代表增益突跳日期检测结果。图 5(a)~(c) 和图 5(d)~(f) 分别是 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道冷空目标归一化前、理论档位和实际档位归一化后的效果。由增益突跳事件识别结果可知, 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道理论档位是 1、1.1、1.2、1.3、1.43、1.57、1.7、1.87, 而实际档位分别是 1.00、1.09、1.19、1.28、1.39、1.51、1.64、1.78 和 1.00、1.09、1.16、1.26、1.42、1.56、1.66、1.77。由图 5 可知, 实际档位较理论档位的归一化效果更好, 故此使用实际档位进行归一化效果验证。归一化后存在个别异常数据, 根据原始数据可知, 异常数

据并非增益突跳数据, 而是由参与天平均的异常数据引起的。

以 2012 年 8 月 24 日 2.13 μm 通道为例, 图 6 所示为增益突跳的星上定标源目标天内归一化效果。图 6(a)~(f) 依次是 SV、VOC、BB 实际档位归一化前后的日变化。由增益突跳识别与归档结果可知, 08:42:24 时增益档位从 1.26 突跳至 1.77。由图 6 可知, 星上定标源目标天内归一化效果良好。

以 2010 年 8 月 24 日 1.64 μm 通道和 2012 年 6 月 24 日 2.13 μm 通道为例, 图 7 所示为增益突跳的对地观测图像归一化效果。图 7(a)~(d) 依次是 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道归一化前后的对地观测图像。由增益突跳识别与归档结果可知, 2010 年 8 月 24 日 01:10:33, 1.64 μm 通道增益档位从 1.78 突跳至 1.0, 2012 年 6 月 24 日 07:32:48, 2.13 μm

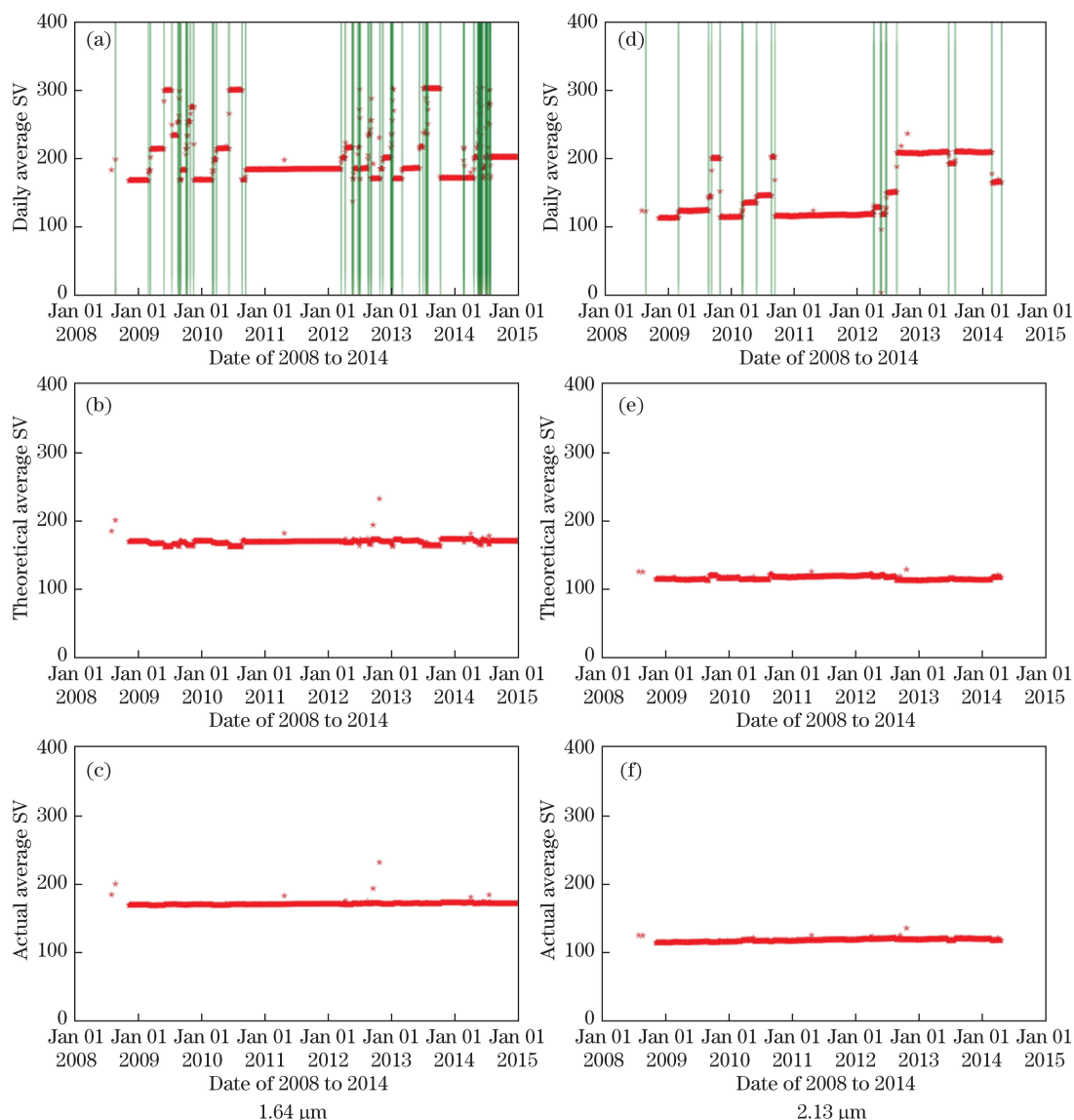


图 5 1.64 μm 和 2.13 μm 冷空目标整个生命周期内的归一化效果。(a)(d)冷空目标归一化前；
(b)(e)理论档位归一化后；(c)(f)实际档位归一化后

Fig. 5 Normalized effect of SV at 1.64 and 2.13 μm during the lifetime. (a)(d) Daily average SV;
(b)(e) normalized results using theoretical levels; (c)(f) normalized results using actual levels

通道增益档位从 1.09 突跳至 1.26。由图 7 可知,对地观测图像归一化效果良好。此外,增益突跳交界处存在归一不理想的条带,这是由于突跳事件大多发生在对地目标扫描过程中,而归一化基于冷空目标的突跳时间,加之多个探元突跳时间不同且对地目标较复杂,所以很难实现突跳帧图像的归一。

5 结 论

为了实现 FY-3A MERSI 历史数据的再利用,本文精确识别了短波红外通道整个生命期的增益突跳事件,获得了可靠的在轨实际工作增益档位,且通过了归一化效果验证。分析了 FY-3A MERSI 星上

观测 SV、VOC 和 BB 目标的现象。基于稳定的 SV 目标,进一步分析了短波红外通道长时间的增益突跳现象,提出了增益突跳自动识别和增益归档的新方法:1)采用日识别和天内精检测的方法,自动识别 FY-3A MERSI 短波红外通道整个生命期无时空规律的增益突跳事件;2)由于太空环境导致预设增益档位发生变化,采用排序法获得了 1.64 μm 和 2.13 μm 两通道的在轨实际增益档位。基于增益突跳识别和归档结果,分别利用星上定标源目标和对地观测图像进行归一化效果验证:采用比值法进行增益档位归一化,得到了增益档位为 1 的无突跳图像。

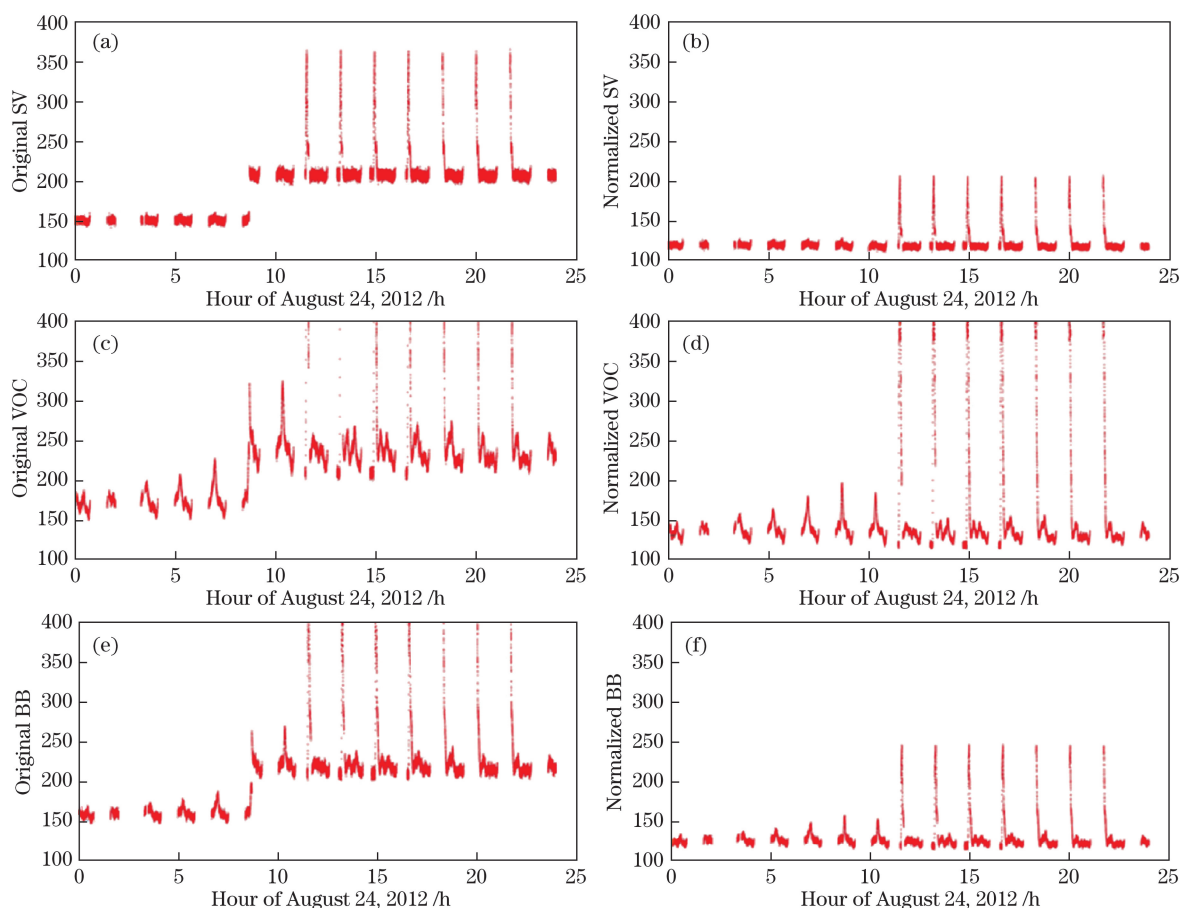


图 6 2012 年 8 月 24 日 2.13 μm 增益突跳的星上定标源目标天内归一化效果。

(a)(c)(e) 实际档位归一化前的 SV、VOC、BB; (b)(d)(f) 实际档位归一化后的 SV、VOC、BB

Fig. 6 Normalized effect of onboard calibration source targets at 2.13 μm on August 24, 2012. Panels (a)(c)(e) SV, VOC, BB before normalization using actual levels; (b)(d)(f) SV, VOC, BB after normalization using actual levels

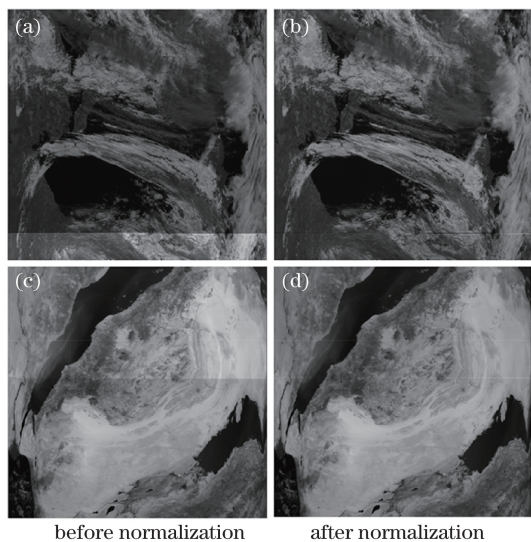


图 7 (a)(b)2010 年 8 月 24 日 1.64 μm 和(c)(d)2012 年 6 月 24 日 2.13 μm 增益突跳的对地观测图像归一化效果
Fig. 7 Normalized effect of EV images (a) (b) at 1.64 μm on August 24, 2010 and (c) (d) at 2.13 μm on June 24, 2012

通过星上观测目标分析发现:1)星上观测 SV、VOC 和 BB 目标同时发生增益突跳,且增益不变时的现象也类似;2)所有星上定标源目标都有显著轨道变化现象,每天 14 轨均存在污染数据,且污染数据主要出现在北半球中高纬度、太阳天顶角在 $80^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 由大变小的过程中;3)SV 目标非污染数据的波动幅度较 VOC 和 BB 更小,更适于作为识别增益突跳的稳定目标。

自动识别 FY-3A MERSI 短波红外通道整个生命期的增益突跳,并进行增益归档,结果表明:1)1.64 μm 通道相对于 2.13 μm 通道发生增益突跳更频繁,2008 年—2015 年,1.64 μm 通道发生了 91 次增益突跳,而 2.13 μm 通道发生了 18 次增益突跳;2)1.64 μm 和 2.13 μm 两通道预设增益档位相同,但在轨增益档位稍有差异,且均不同于预设增益档位,1.64 μm 通道在轨实际工作档位分别是 1.00、1.09、1.19、1.28、1.39、1.51、1.64、1.78,而 2.13 μm 通道在轨实际工作档位分别是 1.00、1.09、

1.16、1.26、1.42、1.56、1.66、1.77。两通道理论和实际增益档位的偏差较大,最大为 5.65%。

归一化效果验证的结果表明:基于在轨增益档位,对星上定标源目标和对地观测图像进行归一化,能够得到理想的增益档位为 1 的图像,证明了增益突跳自动识别和归档结果的可靠性。

综上所述,本文提出的自动识别和归档方法可以有效地定位增益突跳事件。基于本文研究成果,可以改善卫星图像质量,对 FY-3A MERSI 历史数据再处理和高精度定量应用有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang P, Yang H, Qiu H, *et al.* Quantitative remote sensing from the current Fengyun 3 satellites[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, 2(4): 6-11.
张鹏, 杨虎, 邱红, 等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力[J]. *气象科技进展*, 2012, 2(4): 6-11.
- [2] Sun L, Guo M H, Xu N, *et al.* On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1869-1877.
孙凌, 郭茂华, 徐娜, 等. 基于敦煌场地定标的 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1869-1877.
- [3] Ding L. Flight model (Z01-2) development review of FY-3A medium resolution spectral imager (MERSI)[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, 2007.
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[R]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2007.
- [4] Sun L, Hu X Q, Guo M H, *et al.* Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 84-96.
孙凌, 胡秀清, 郭茂华, 等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段的多场地定标跟踪[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(4): 84-96.
- [5] Hu X Q, Sun L, Liu J J, *et al.* Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 71-83.
胡秀清, 孙凌, 刘京晶, 等. 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[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(4): 71-83.
- [6] Yang J, Dong C H, Lu N M, *et al.* FY-3A: the new generation polar-orbiting meteorological satellite of China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4): 501-509.
杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星: 风云三号[J]. *气象学报*, 2009, 67(4): 501-509.
- [7] Xu N, Hu X Q, Chen L, *et al.* On-orbit radiometric calibration accuracy of FY-3A MERSI thermal infrared channel[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(12): 3429-3434.
徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. FY-3A/MERSI 热红外通道在轨辐射定标精度评估[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(12): 3429-3434.
- [8] Chen S W, Xu N, Dai T, *et al.* Sensitivity of intercalibration uncertainty on spectral sampling of space-based radiance standard[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0128004.
陈申玮, 徐娜, 戴铁, 等. 空间辐射基准传递不确定性的光谱敏感性分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0128004.
- [9] Li X H, Yan C X. Onboard calibration technologies for hyper-spectral imager[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(4): 309-315.
李晓晖, 颜昌翔. 成像光谱仪星上定标技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(4): 309-315.
- [10] Shi J M, Hu X Q, Xu W B, *et al.* Analysis on response degradation of medium resolution spectral imager on FY-3B[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(5): 376-383.
史剑民, 胡秀清, 徐文斌, 等. 风云三号 B 星中分辨率光谱成像仪响应衰变分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(5): 376-383.
- [11] Xu N, Wu R H, Hu X Q, *et al.* Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1228001.
徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1228001.
- [12] 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.
- [13] Lü J Y, He M Y, Chen L, *et al.* Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0801003.
吕佳彦, 何明元, 陈林, 等. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0801003.
- [14] Dash P, Ignatov A. Validation of clear-sky radiances over oceans simulated with MODTRAN4.2 and global NCEP GDAS fields against nighttime NOAA15-18 and

- MetOp-A AVHRR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6): 3012-3029.
- [15] Wang L, Hu X Q, Zheng Z J, *et al.* Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in south and north poles[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0212003.
王玲, 胡秀清, 郑照军, 等. 联合南北极冰雪目标的FY-3A/MERSI辐射定标跟踪监测[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0212003.
- [16] Sun L, Hu X, Chen L. Long-term calibration monitoring of medium resolution spectral imager (MERSI) solar bands onboard FY-3[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8528: 852808.
- [17] Niu X H, Zhou J G, Chen S S, *et al.* Simulation and suppression of solar on-orbit pollution of FY-3/MERSI onboard blackbody[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1822-1828.
钮新华, 周巨广, 陈帅帅, 等. FY-3/中分辨率光谱成像仪星上黑体的在轨太阳污染模拟与抑制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1822-1828.
- [18] Hu X, Xu N, Wu R, *et al.* Performance assessment of FY-3C/MERSI on early orbit[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9264: 92640Y.
- [19] Sun L. On-orbit gain level identification and normalization of FY-3A mersi shortwave infrared bands based on space view observation[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016: 2955-2958.
- [20] Xu H L, Hu X Q, Xu N, *et al.* Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1874-1879.
徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 等. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的识别和修正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1874-1879.
- [21] Ignatov A, Cao C Y, Sullivan J, *et al.* The usefulness of in-flight measurements of space count to improve calibration of the AVHRR solar reflectance bands[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(2): 180-200.