

# FY-4A 多通道扫描辐射成像仪评价与图像合成

陈博洋, 吴琼, 冯绚, 郭强, 魏彩英\*

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 风云四号卫星发射后, 开展了卫星在轨评价工作. 采用刃边法对太阳反射通道进行在轨 *MTF* 评价, 结果表明, 多通道扫描辐射成像仪各反射通道在轨 *MTF* 分别达到了 0.14、0.17 和 0.22 以上, 符合仪器指标要求; 利用面源黑体对红外通道噪声进行评价, 结果表明多通道扫描辐射成像仪性能稳定, 噪声大小只与辐冷温度有关, 目标温度 300 K 时主要红外通道噪声优于 0.2 K, 最优通道达到了 0.06 K; 为准确检验红外定标精度, 采用 *GSICS* 方法对红外通道业务定标结果进行检验, *GSICS* 检验显示定标精度优于 1 K, 最优通道达到了 0.3 K@290 K. 为充分发挥多通道扫描辐射成像仪多通道联合应用效能, 根据多通道扫描辐射成像仪反射通道的响应特点, 在没有符合人眼红绿蓝响应通道的情况下, 提出了新的真彩色图像合成方法, 生成了符合人眼效果的真彩色图像.

**关键词:** 静止轨道成像仪; 在轨评价; 调制传递函数; 定标与检验; 真彩色图像

中图分类号: TP702 文献标识码: A

## On-orbit test to FY-4A AGRI and generating RGB image

CHEN Bo-Yang, WU Qiong, FENG Xuan, GUO Qiang, WEI Cai-Ying\*

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

**Abstract:** After launching FengYun-4(FY-4), the on-orbit test to the satellite is done, the *MTF* of the solar reflectance bands is better than 0.14, 0.17 and 0.22, that is better than the designed capability. The noise test is based on the black-body on the apparatus, the noise for all the infrared bands is less than 0.2 K@300 K, the noise of the best band is about 0.06 K@300 K. The calibration precession of infrared band is validated by the *GSICS* algorithm, the bias of all the infrared bands are less than 1K comparing to *IASI*, the bias of the best band is about 0.3 K@290 K. The RGB image carries more information than the gray image, although the AGRI has 6 solar reflectance bands, there are no real red, green and blue bands of human beings, a new algorithm generating RGB image for AGRI is suggested, based on the character of 0.82 band, a very beautiful RGB image which is good to human beings is generated, that improves the multi band use for AGRI.

**Key words:** geostationary imager, on-orbit test, modulation transform function, calibration and validation, RGB image

**PACS:** 42.68.-w

## 引言

风云四号(FY-4)是我国第二代静止轨道气象卫星, 与国际同类仪器相同, 采用三轴稳定平台, FY-4A 星于 2016 年 12 月 11 日成功发射, 发射重量大约 5 300 kg, 姿态确定精度 3", 星上采用了 1553B

+ Spacewire 数据总线技术, 保证了多个有效载荷的大数据量数据传输, 整星输出功率 > 3 200 W. 卫星搭载了 3 台光学载荷, 分别是多通道扫描辐射成像仪(Advanced Geostationary Radiation Imager, AGRI)、静止轨道干涉式红外垂直探测仪(Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS)和闪电成像仪

收稿日期: 2017-11-28, 修回日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(41375023)

**Foundation items:** Supported by National Natural Science Foundation of China(41375023)

**作者简介 (Biography):** 陈博洋(1980-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副研究员, 主要从事空间遥感仪器顶层设计、遥感资料预处理和图像处理与评价. E-mail: chenby@cma.gov.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: 278998861@qq.com

**Received date:** 2017-11-28, **revised date:** 2018-04-12

(Lightning Mapping Imager, LMI), AGRI 是 14 通道成像仪,用来接替风云二号(FY-2)可见光红外扫描辐射计(Visible and Infrared Spin Scan Radiometer, VISSR),表 1 是 AGRI 与 VISSR、美国同期仪器 ABI 和欧洲同期仪器 FCI 的设计指标对比,整体性能接近。

FY-4A 发射以后,为充分发挥 AGRI 在地球同步轨道的高频次、定量化观测数据的作用,对 FY-4A 进行在轨评价,围绕 AGRI 开展了反射通道 MTF 评价、红外通道灵敏度评价、定标精度评价等工作,准确评价得到了 AGRI 的在轨定量化指标,以 GSICS 方法为辐射基准对红外通道进行定标精度检验,得到了目标 290K 时的定标精度评价结果,为开展数据定量应用工作打下了基础。AGRI 具有多通道的特点,但是通道设置没有人眼特征的红绿蓝通道,不能充分发挥人眼对真彩色图像的高灵敏分析能力,针对 AGRI 通道的物理特性,开发了 FY-4A AGRI 的真彩色合成算法,拓展了真彩色图像应用,提高了仪器的宣传效果,是 AGRI 典型应用之一。

## 1 MTF 评价

MTF 从成像仪器的全部空间频率范围来描述系统再现物体的能力,比仅凭某一个数字量(分辨率、清晰度等)对成像系统进行质量评价更全面也更具权威性<sup>[1]</sup>。理想的成像系统要求 100% 再现成像物体细节,但实际的成像系统存在不同程度的衰减,经过成像系统获得的图像不同程度地损失了图像的对比度,说明成像系统不能把输入空间频率全部再现出来。MTF 曲线在全部空间频率范围内评价仪器空间分辨率,其值越大,成像系统再现成像物体的细节能力越强、灰度对比越明显<sup>[2]</sup>。

比较常用的获取遥感图像 MTF 值的方法是刃

边法<sup>[3-5]</sup>,刃边法的特点在于:可以得到图像 MTF 关于空间频率的一条曲线,Nyquist 频率点所对应的 MTF 值代表遥感图像的 MTF 值,该方法符合卫星在轨的特性<sup>[6]</sup>,MTF 的计算方法如下:

(1) 选取刃边图像并求边缘扩展函数(Edge Spread Function, ESF)

从图像中选取刃边图像,要求刃边两侧区域的灰度值有一定差异,如一边较黑,一边较白,还要求每个区域的灰度比较均匀。在理想情况下,黑白区域的分界线应该是一条直线。选取好刃边图像后,垂直于分界线读取刃边图像的灰度值,用直线将相邻灰度值连接起来,得到边缘扩展曲线。在遥感图像中,一般海陆边界的灰度值差异较大,选作刃边图像比较合适。

(2) 对 ESF 进行三次样条插值

由于采样点的数量较少,由这些点连接而成的 ESF 不平滑,无法准确反映实际的 ESF 曲线。对 ESF 曲线进行三次样条插值,可以使曲线更加平滑,更接近实际的曲线,从而提高 MTF 的计算精度。

(3) 对插值后的 ESF 曲线进行微分得到线扩展函数(Line Spread Function, LSF) 曲线,并进行归一化处理

取包括峰值及足够宽度的区间进行 LSF 曲线的离散傅里叶变换,得到图像关于频率的 MTF 曲线,再进行归一化处理。文中图像质量评价所采用的 MTF 值为 Nyquist 频率点所对应的 MTF 值。Nyquist 频率的确定需要通过刃边采样点数量以及插值间隔设定的数值来确定: Nyquist 频率 = 插值数据数量 \* 间隔量 / 2 + 1。

如图 1,在轨测试时以澳大利亚西部锐利的海陆边界作为刃边目标,得到的各波段 MTF 曲线见图 2,各波段 MTF 在奈奎斯特频率处的值见表 2。

表 1 静止轨道气象卫星成像仪比较

Table 1 Comparison of imagers on geostationary meteorological satellite

	VISSR	AGRI	ABI	FCI
Bands Number	5	14	16	16
Spatial Resolution	Vis 1.25 km	0.5 ~ 1 km	0.5 ~ 1 km	0.5 ~ 1 km
	Near Infrared	2 km	1 km	1 km
	Infrared	5 km	4 km	2 km
Temporal Resolution	30 min	15 min	5 min	10 min
Sensitivity	Vis	SNR = 200@ ρ = 100%	SNR = 200@ ρ = 100%	SNR = 300@ ρ = 100%
	Infrared	NEDT = 0.2 k@ 300 k	NEDT = 0.2 k@ 300 k	NEDT = 0.1 k@ 300 k
Calibration		1 k	0.7 k	0.5 k
MTF		>0.2	>0.2	>0.2
FOV	21°N/S × 23°E/W	21°N/S × 23°E/W	21°N/S × 23°E/W	21°N/S × 23°E/W

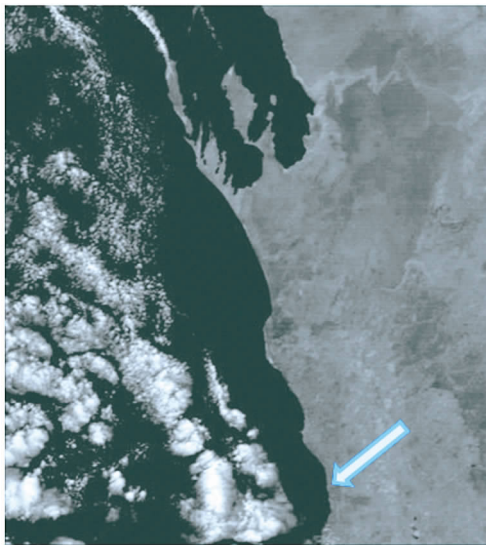


图1 2017年3月15日5:15 澳大利亚云图  
Fig.1 Australia image at AM 5:15 (UTC) on March 15<sup>th</sup> in 2017

表2 奈奎斯特频率处的 MTF

Table 2 MTFs @ Nyquist Frequency

NO.	Wave Length/ $\mu\text{m}$	IFOV	MTF@ Nyquist
1	0.55	0.5 km	0.1428
2	0.75	1 km	0.1798
3	1.58	2 km	0.2252
4	2.1	2 km	0.2124

## 2 红外灵敏度评价

灵敏度是遥感仪器的关键指标之一<sup>[7]</sup>,尤其是气象卫星成像仪,对遥感数据定量应用要求极高,AGRI 在轨评价结果显示,仪器灵敏度超过了国外同类仪器的设计指标,为产品反演奠定了很好的基础.灵敏度评价需要对稳定的目标进行观测,AGRI 携带了星上黑体作为红外通道辐射基准,通过黑体控温使其保持在稳定的状态,因此使用黑体进行红外通道灵敏度评价. AGRI 黑体位于仪器南北扫描镜后面,需要定标时,南北镜转过  $90^\circ$  朝向仪器箱体内部来观测黑体,同时,仪器观测冷空间以获取自身的辐射噪声<sup>[8]</sup>,为了获取精确的仪器自身辐射噪声变化,在观测黑体前后都进行了冷空观测,用来分析仪器噪声随时间的变化规律.

在图3是  $10.3 \mu\text{m}$  通道4个探元的黑体和冷空观测值,横坐标是观测点数,纵坐标是响应  $DN$ ,曲线左侧和右侧的高  $DN$  值是观测冷空的数据,冷空观测值体现了仪器自身辐射噪声. 实际情况下为消除仪器自身响应随时间的变化,采用公式1对黑体观测值进行订正,黑体观测序列值  $DN_{i\_black-body}$  订

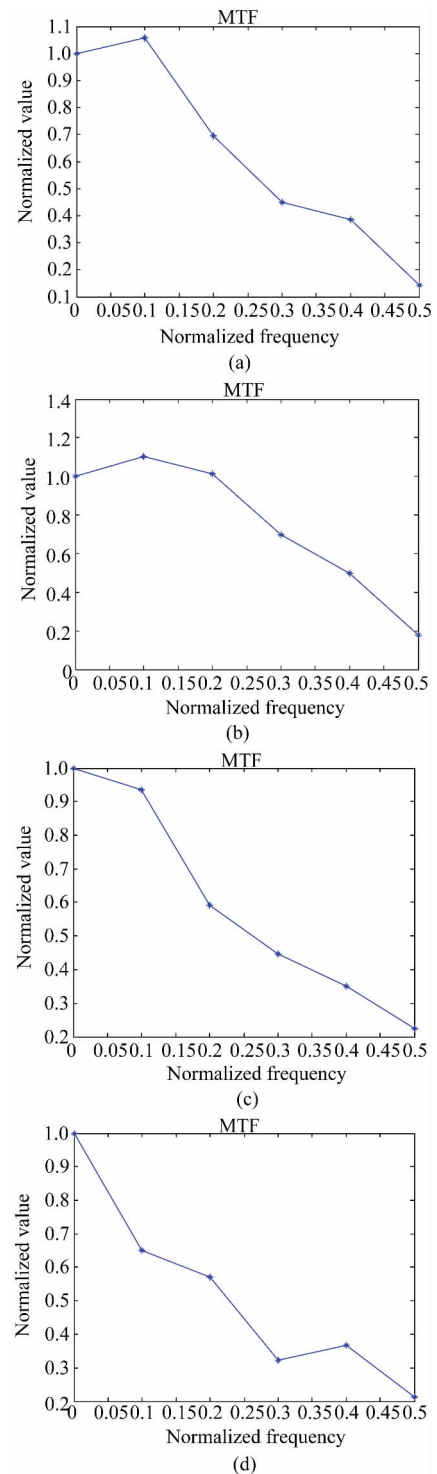


图2 (a) 0.45 通道 MTF, (b) 0.55 通道 MTF, (c) 1.58 通道 MTF, (d) 2.1 通道 MTF

Fig.2 (a) MTF of  $0.45 \mu\text{m}$  band, (b) MTF of  $0.55 \mu\text{m}$  band, (c) MTF of  $1.58 \mu\text{m}$  band, (d) MTF of  $2.1 \mu\text{m}$  band

正为  $DN_i$ ,消除了仪器的响应漂移;为了降低随机噪声的影响,用左右冷空观测值的均值  $DN_{\text{mean\_left-top}}$  和  $DN_{\text{mean\_right-top}}$  作为为噪声真实值;仪器噪声表现为黑

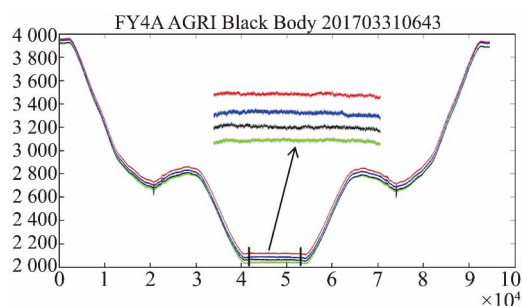


图3 黑体观测数据  
Fig. 3 Black-body data

体观测值的标准差,即黑体观测序列  $DN_i$  的标准差  $DN_v$ .

$$DN_i = 0.5 * DN_{\text{mean\_left-top}} + 0.5 * DN_{\text{mean\_right-top}} - DN_{\text{i\_black-body}}, \quad (1)$$

气象卫星灵敏度测试参考温度点一般设置在 300 K,首先由公式 2 计算仪器在 300 k 时的响应亮温变化率  $Cof_{\text{sensitivity}}$ ,再由式(3)计算仪器灵敏度.

$$Cof_{\text{sensitivity}} = \frac{T_{300+dt} - T_{300-dt}}{DN_{300+dt} - DN_{300-dt}}, \quad (2)$$

$$Sens = Cof_{\text{sensitivity}} * DN_v. \quad (3)$$

AGRI 红外通道的灵敏度计算结果见表 3,实测灵敏度均优于国际同类仪器 ABI 的设计指标,其中 10.3  $\mu\text{m}$  通道灵敏度达到了 0.06 K@300 K,性能优异.

表 3 红外通道灵敏度

Table 3 Sensitivity of infrared bands

NO.	Wave Length/ $\mu\text{m}$	Sensitivity
1	3.5L	0.1 K@300 K
2	5.8	0.09 K@300 K
3	6.9	0.12 K@300 K
4	8.0	0.06 K@300 K
5	10.3	0.07 K@300 K
6	11.5	0.14 K@300 K
7	13.2	0.6 K@300 K

### 3 红外定标检验

静止轨道气象卫星可以高频次观测视场内的地气目标,红外通道观测目标温度对气象应用极其重要,AGRI 携带了面源黑体作为红外通道在轨辐射定标基准,通过南北扫描镜转动指向黑体,得到红外各通道黑体观测数据. AGRI 星上黑体是我国静止轨道光学遥感仪器上的首套全光路、全口径黑体定标装置,目前业务模式下,每 15 分钟进行一次红外定标.为了准确检验 AGRI 红外定标精度,采用了

GSICS 组织推荐的方法与 IASI 进行交叉定标检验<sup>[9]</sup>.如图 4,经与 IASI 比较,在静止轨道复杂热环境下,AGRI 所有红外通道日均定标偏差优于 1 K, 10.3  $\mu\text{m}$  通道日均定标偏差优于 0.3 K@290 K.

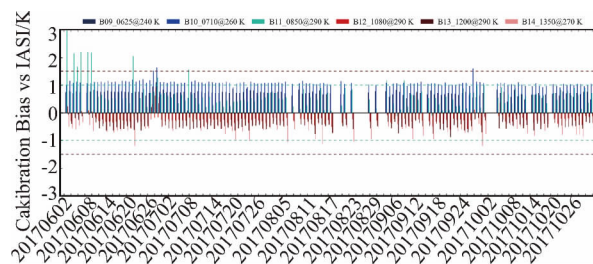


图4 交叉定标检验序列  
Fig. 4 Long term validation using GSICS algorithm

### 4 真彩色图像合成

真彩色(RGB)图像是非常好的观察目标的方式,符合人眼观察自然世界的规律<sup>[11]</sup>,AGRI 虽然有 5 个反射通道,但是通道设置没有符合人眼响应谱段的红绿蓝三个通道,因此没有办法直接生成真彩色图像,图 5(a)是把 AGRI 的前 3 个反射通道图像合成的结果,中心波长分别为 0.47  $\mu\text{m}$ 、0.65  $\mu\text{m}$  和 0.82  $\mu\text{m}$ ,合成图像偏红,从地表目标的类型看,对典型植被区域(赤道和东南亚地区)和裸土区域区分不明显.

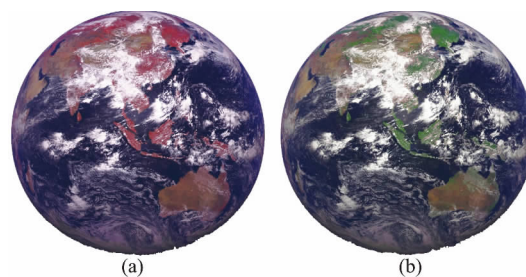


图5 (a) 三通道直接合成的真彩色图, (b) 算法调整的真彩色图

Fig. 5 (a) RGB image generated directly by 3 visible bands, (b) RGB image generated by algorithm

为充分发挥 AGRI 的多通道性能,设计了符合 AGRI 通道特点的真彩色图像合成算法,首先分析图 5(a) 中红颜色深区域的主要目标,都是植被茂盛的区域,再分析 0.45  $\mu\text{m}$ 、0.65  $\mu\text{m}$  和 0.82  $\mu\text{m}$  各通道的特点,0.45  $\mu\text{m}$  比较接近人眼蓝色光谱响应、0.65  $\mu\text{m}$  比较接近人眼绿色光谱响应,但是 0.82  $\mu\text{m}$  通道远离人眼的红色光谱响应,却对植被很敏感. AGRI 真彩色图像合成算法利用 0.82

$0.82 \mu\text{m}$  通道对植被敏感的特性,当目标地区在  $0.82 \mu\text{m}$  通道能量倾向植被丰富时,直接交换原始真彩色合成图像的红绿通道计数值,获得目视上的真彩色效果,见图 5(b),利用不符合人眼红绿蓝视觉特性的 3 个反射通道合成得到了符合人眼视觉效果的真彩色合成图像,AGRI 真彩色合成算法不同于其他基于复杂产品算法的合成算法<sup>[12]</sup>,直接利用观测计数值,保证了图像的观测定量化。具体流程见图 6,  $T$  是调节图像显示效果的关键参数,不同的仪器取值也不同。

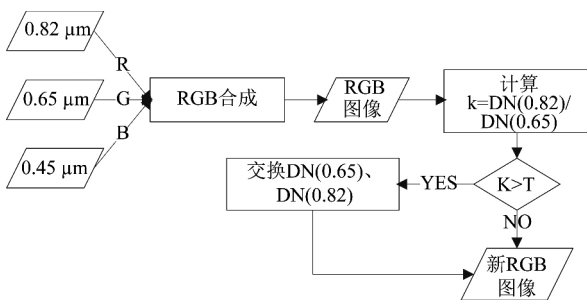


图 6 FY-4A AGRI 真彩色合成流程图  
Fig. 6 The algorithm flow of FY-4A AGRI

## 5 结论

FY-4A 发射以后,对 AGRI 进行了多维度的定量化评价,保证了仪器评价结果的全面与客观,综合评价结果显示,多通道扫描辐射成像仪在静止轨道三轴稳定平台上实现了可见光  $0.5 \sim 1 \text{ km}$ 、红外  $2 \sim 4 \text{ km}$  的 24 小时连续观测能力,利用澳大利亚西海岸的锐利海陆边缘对反射通道 MTF 进行在轨评价,均优于设计指标;基于星上黑体的稳定观测数据对红外通道灵敏度进行评价,所有通道都符合使用要求,尤其是  $10.8 \mu\text{m}$  通道灵敏度优于  $0.06 \text{ K}@300 \text{ K}$ ,性能优异。利用 GSICS 方法为基准对红外定标结果进行评价,所有通道高温端误差均优于  $1 \text{ K}$ , $10.8 \mu\text{m}$  通道评价结果优于  $0.3 \text{ K}@290 \text{ K}$ ,性能优异。基于反射通道  $0.82 \mu\text{m}$  通道对植被敏感的特性,利用 3 个不符合人眼红绿蓝响应光谱的通道合成了符合人眼特征的真彩色合成图像,是 AGRI 典型应用之一。

## References

- [1] WANG Yang, LIU Da-Fu, XU Qing-Fei, et al. MTF of infrared detector modules with different structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(汪洋,刘大福,徐勤飞,等.不同结构长波红外探测器组件的 MTF 分析. *红外与毫米波学报*), 2016, **35**(3): 294-299.
- [2] LI Hang, YAN Chang-Xiang, YU Ping, et al. Measurement of modulation transfer function for IR imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*(李航,颜昌翔,于平,等.红外成像系统的调制传递函数测试. *光学精密工程*), 2016, **24**(4): 698-708.
- [3] GUO Qiang, LI Xin-Yao, CHEN Gui-Lin. On-orbit MTF evaluation for thermal infrared band of FY-2 satellite and its application in image quality improvements [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(郭强,李欣耀,陈桂林. FY-2 卫星热红外通道 MTF 在轨评价及其在改进图像质量中的应用. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(5): 335-341.
- [4] CHEN Bo-Yang. Evaluation of MTF for FY-2G middle infrared band based on moon observation and image restoration [J]. *Optics and Precision Engineering*(陈博洋.基于月球观测的 FY-2G 中波红外通道在轨调制传递函数评价与图像复原. *光学精密工程*), 2016, **24**(2): 430-437.
- [5] XU Miao-Zhong, CONG Ming, FU Xiao-Mei, et al. Research and evaluation of on-orbit MTF measurement for Chinese satellite sensors [J]. *Science of Surveying and Mapping*(许妙忠,丛铭,付晓梅,等.国产卫星传感器在轨 MTF 检测方法的评价与研究. *测绘科学*), 2014, **39**(4): 8-12.
- [6] XU Wei-Wei, ZHANG Li-Ming, SHEN Zheng-Guo, et al. On-orbit MTF Estimation of high resolution satellite optical sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*(徐伟伟,张黎明,沈政国等.高分辨率光学卫星传感器在轨 MTF 检测. *大气与环境光学学报*), 2014, **9**(2): 97-111.
- [7] SU Hong-Yu, ZHANG Xian-Liang, CHEN Yu. Characteristics evaluation of infrared thermal imaging system [J]. *CHINA MEASUREMENT & TEST*(苏红宇,张宪亮,陈宇.红外热像仪性能参数的评价. *中国测试*), 2010, **36**(1): 14-19.
- [8] TIAN Qi-Jie, CHANG Song-Tao, QIAO Yan-Feng, et al. Radiometric calibration based on Low-temperature Area Blackbody for Infrared Systems with high dynamic range [J]. *Acta Photonica Sinica*(田棋杰,常松涛,乔彦峰,等.采用低温面源黑体实现红外系统宽动态范围定标. *光子学报*), 2017, **46**(4): 2017:0412003.
- [9] Wu X Q, Tim H, Yoshihiko T. GSICS GEO-LEO intercalibration: Baseline algorithm and early results [J]. *Article in proceedings of SPIE - The international society for optical engineering*, 2009, DOI: 10.1117/12.825460.
- [10] SU Yu, GAO Shao-Shu, JIN Wei-Qi, et al. Color-quality subjective evaluation for color fusion images of typical scenes based on color harmony [J]. *Infrared and Laser Engineering*(苏宇,高绍姝,金伟其等.典型场景彩色融合图像彩色协调性的主观评价. *红外与激光工程*), 2014, **44**(4): 1198-1202.
- [11] ZHANG Wei, ZHENG Xu-Xia. A method of true color synthesis of multi-spectral images based on vegetation index [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*(张伟,郑旭霞.基于植被指数的多光谱影响真彩色合成方法. *测绘与空间地理信息*), 2010, **33**(6): 110-113.
- [12] CHEN Bo-Yang, GUO Qiang, CHANG Xiang, et al. Moon's remote sensing using FY-2 and moon image registration [J]. *Chinese Journal of sensors and actuators*(陈博洋,郭强,常翔,等. FY-2 自旋稳定气象卫星动态月球观测与图像配准. *传感技术学报*), 2017, **30**(5): 703-707.