

## 基于灰阶靶标的高分辨光学卫星传感器在轨绝对辐射定标

徐伟伟<sup>1,2</sup>, 张黎明<sup>1,2</sup>, 李鑫<sup>1,2</sup>, 杨宝云<sup>1,2</sup>, 王戟翔<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 辐射定标是光学卫星传感器遥感信息量化的关键技术之一。基于多灰阶靶标的星载多光谱相机在轨绝对辐射定标方法, 以地面漫射辐射/总辐射比、大气光学厚度等参数的实际测量代替气溶胶散射特性假设, 通过参照目标反射辐射与大气程辐射及地气耦合辐射的分离, 简化定标流程, 并突破大面积辐射校正场受时空条件的限制, 实现高分辨率多光谱传感器全动态范围内的高精度、高频次、业务化定标。试验结果表明: 基于灰阶靶标的高分辨光学卫星传感器在轨绝对辐射定标不确定度优于 3.5%, 与反射率基法定标结果的差异优于 5%, 且适应于复杂环境条件下在轨定标的应用需求。

**关键词:** 遥感; 辐射定标; 灰阶靶标; 大气透过率; 漫射辐射/总辐射比

**中图分类号:** TP79; TP722.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0417005

## On-orbit absolute radiometric calibration of high resolution satellite optical sensor based on gray-scale targets

Xu Weiwei<sup>1,2</sup>, Zhang Liming<sup>1,2</sup>, Li Xin<sup>1,2</sup>, Yang Baoyun<sup>1,2</sup>, Wang Jixiang<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Radiometric calibration in-flight is one of critical techniques for information quantification of optical satellite sensor. A calibration approach based on gray-scale targets has been presented. It substitutes the measured ratio of diffusion to global irradiance and atmospheric optical depth to the assumption of aerosol scatter. And the method could isolate the DN signal created by the targets from the response produced by background radiance sources, which simplify the calibration process. It can break the time and locale conditions limit of radiometric sites and achieve high precision, high frequency and normalizable calibration application for high spatial resolution multi-spectral sensor with full dynamic range. The results show that the calibration approach's uncertainty is less than 3.5%. And the difference of calibration coefficient is less than 5% compared with the reflectance-based method. Simultaneously, this approach can also satisfy the application to the complex environment.

**Key words:** remote sensing; radiometric calibration; gray-scale targets; atmospheric transmittance; diffuse-to-global ratio

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(41301374, 41601388)

作者简介: 徐伟伟(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光学传感器辐射定标及成像质量分析等方面的研究。

Email: weilxu@aiofm.ac.cn

## 0 引言

高分辨卫星遥感以一种非常精细的方式来观测地面,所获取的遥感影像可以更加清楚地表达地物目标的空间结构与表层纹理特征,为有效的解译分析提供条件和基础,在国土资源调查、测绘制图、城市规划建设及军事侦察与制图等领域有着非常广阔的应用前景。然而,高分辨卫星遥感所观测地物目标的生物物理参数等遥感数据产品和传感器辐射响应有着直接关系,因此传感器在轨运行期间的绝对辐射定标精度直接影响其遥感数据应用的广度和深度,极大地限制卫星遥感数据的定量化应用水平<sup>[1]</sup>。

在轨辐射定标的反射率基法及辐照度基法都是一种单点(辐亮度)定标方法,都需要大面积辐射校正场和传感器暗电流测量(或冷空测量)相配合,唯一不同的是辐照度基法增加了漫射辐射与总辐射比的测量,从而减小了反射率基法中对气溶胶散射特性的假设所带来的不确定度<sup>[2-7]</sup>。基于大面积均匀场的替代定标法对场地反射率要求较高,当反射率较低时,需通过外推来得到高于均匀场反射率的辐亮度,当反射率较高时,则需通过内插来得到未知辐射量,因此基于大面积均匀场的辐射定标对其精度的影响很大。例如国内的敦煌辐射校正场,地表反射率较低是影响我国辐射定标水平的重要因素,目前在轨定标精度约为5%~8%,且难以实现光学卫星传感器全动态范围内的高精度、高频次、常态化定标<sup>[8-13]</sup>。针对近年来日益快速发展的高空间分辨率光学卫星,美国航空航天局(NASA)与亚利桑那大学等科研机构采用多种反射率的人工靶标分别对IKONOS、Quickbird等高分辨率相机进行辐射定标等在轨性能检测,国内的资源卫星应用中心与安徽光学精密机械研究所等科研机构采用多反射率灰阶靶标对资源系列等高分辨卫星进行在轨辐射定标与质评等性能检测与真实性检验<sup>[14-16]</sup>,这些基于多种反射率人工靶标的辐射定标方法均是传统的反射率基法,以辐射传输计算为核心,仅是由于空间分辨率的提高而将大面积自然均匀场替换为光学特性优异的人工靶标,仍需要假设场区气溶胶散射特性及周边背景环境反射率等,特别是在复杂背景条件下,难以与实际情况相符。因此提出采用少量的包括高反

射率在内的多种反射率灰阶靶标作为检测参照目标,以期提高高分辨光学卫星传感器的在轨绝对辐射定标精度。

基于大面积多反射率灰阶靶标的在轨绝对辐射定标方法是实现高分辨光学卫星传感器高精度定标的有效途径之一,在介绍该定标原理的基础上,利用在轨检测试验所获取的资源三号高分辨率灰阶靶标影像,对其数据处理方法与定标结果及不确定度进行了分析讨论。

## 1 基本原理

对地观测航天光学遥感中,光学卫星传感器都需要透过地球周围的大气层来观测地物目标,大气对电磁辐射的吸收、散射、反射以及大气自身的辐射都会对航天光学传感器所接收的辐射能量产生影响,其入瞳辐亮度是太阳辐射、大气及地物目标相互作用的结果,如图1所示。光学卫星传感器在太阳反射波段的人瞳辐射能量主要由大气程辐射、目标反射辐射和地-气耦合辐射三部分构成。

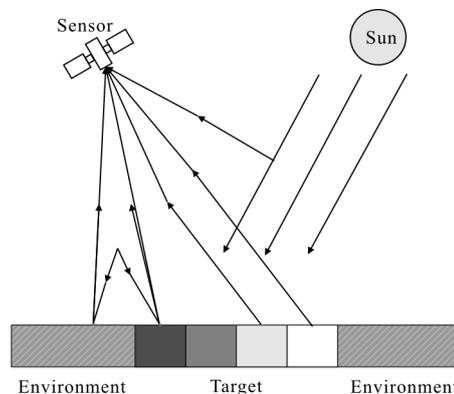


图1 太阳、目标及传感器相互作用示意图

Fig.1 Schematic diagram of sun, target and sensor's reciprocity

根据辐射传输理论,在假定平面平行大气条件下,对于非均一的地面目标(多反射率灰阶靶标),需要考虑靶标反射率及其所在复杂背景反射率,故光学卫星传感器入瞳辐亮度可表示为:

$$L=L_a+\frac{E_s\mu_s T_{gas}}{\pi} \frac{e^{-\tau\mu_s}+t_d(\theta_s)}{1-S\rho_e} (\rho_t e^{-\tau\mu_s}+\rho_e t'_d(\theta_v)) \quad (1)$$

式中: $L_a$ 为大气程辐射; $E_s$ 为太阳常数; $\mu_s$ 为太阳天顶角 $\theta_s$ 的余弦因子; $T_{gas}$ 为大气吸收透过率; $\tau$ 为大气光学厚度; $t_d(\theta_s)$ 为大气散射透过率; $S$ 为大气球面

反照率;  $\rho_e$  为背景反射率;  $\rho_t$  为灰阶靶标反射率;  $\mu_v$  为卫星观测天顶角的余弦因子;  $\theta_v$  为卫星观测天顶角;  $t'_d(\theta_v)$  为散射透过率。

假定多反射率灰阶靶标布设区域的背景反射率为常数, 则该定标场区的地面总照度保持不变, 检测参照靶标上空的大气程辐射和地-气耦合辐射是相同的, 其辐亮度可综合设定为  $L_{a,a-g}$ 。对于大气散射, 可通过引入卫星过顶时刻的试验场区地面的漫射辐射/总辐射比  $\alpha(\theta_s)=E_{sky}/E_{total}$ , 有:

$$\frac{E_s \mu_s (e^{-\tau \mu_s} + t'_d(\theta_s))}{1 - S \rho_e} \frac{E_s \mu_s e^{-\tau \mu_s}}{1 - \alpha(\theta_s)} \quad (2)$$

将公式(2)代入公式(1), 化简得光学卫星传感器入瞳辐亮度:

$$L = \frac{E_s \mu_s T_{gas}(\theta_s, \theta_v)}{\pi} \frac{e^{-\tau \mu_s - \tau \mu_v}}{1 - \alpha(\theta_s)} \rho_t + L_{a,a-g} \quad (3)$$

由此可知, 遥感器入瞳辐亮度与靶标反射率成正比, 根据在轨检测试验地面同步测量的大面积多灰阶靶标反射率、大气光学厚度、漫射辐射/总辐射比, 结合气象参数及太阳-卫星观测几何, 经简化的辐射传输计算, 可得灰阶靶标参照目标的入瞳辐亮度。

光学卫星传感器对大面积灰阶靶标成像观测时, 由于参照目标上空的大气程辐射及地-气耦合辐射在同一大气环境下为常量, 将其与暗电流等合并, 并根据遥感器定标方程得:

$$DN = AL_t + DN_0 \quad (4)$$

式中:  $L_t = \rho_t \mu_s \int \frac{E_s T_{gas}(\theta_s, \theta_v) e^{-\tau(1/\mu_s + 1/\mu_v)} R(\lambda) d\lambda}{\pi [1 - \alpha(\theta_s)]} / \int R(\lambda) d\lambda$ ,  $R$

( $\lambda$ ) 为遥感器的光谱响应函数,  $A$  定标系数,  $DN_0$  为程辐射与地气耦合辐射及暗电流响应值。

因此, 根据公式(4), 代入地面同步测量数据和简化的辐射传输计算结果, 结合光学卫星传感器对大面积多反射率灰阶靶标的观测计数值(DN 值), 以最小二乘法计算得到光学卫星传感器的辐射定标系数。若暗电流已知, 可进一步得大气程辐射与地-气耦合辐射响应值。

## 2 试验与数据处理

高分辨率光学卫星传感器基于多种反射率灰阶靶标的在轨辐射定标与性能检测试验, 如图 2 所示, 在定

标场区布设了大面积的检测参照靶标, 并于卫星过顶时同步采集了靶标反射率与大气特性参数等信息。



(a) 灰阶靶标

(a) Gray-scale targets



(b) 遥感影像

(b) Remote sensing image

图 2 2013 年在轨检测试验与遥感影像

Fig.2 On-orbit estimation experience and remote sensing image in 2013

### 2.1 靶标反射率

基于轨道预报参数, 在卫星过顶前后半小时采用野外光谱辐射计 ASD, 对灰阶靶标及布设场区背景环境的光谱反射率进行准同步测量, 通过对比法及多点统计平均的方法获取目标反射率数据, 如图 3 所示, 以降低随机噪声并反映大面积参照靶标的整体光学特性。从图中可以看出, 灰阶靶标具有良好的光谱平坦性和均匀一致性, 有利于提高在轨绝对辐射定标精度。

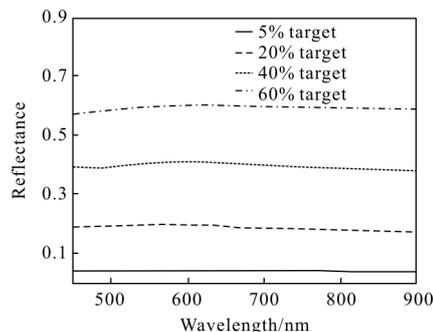


图 3 靶标光谱反射率

Fig.3 Spectral reflectance of targets

### 2.2 大气光学特性

同步测量当天在靶标布设区选择可代表卫星过顶区域大气光学特性的地点, 架设太阳光度计 CE-317 与光谱照度计 VIF981, 进行太阳直射辐射和地面漫射辐射/总辐射比测量。大气中臭氧与水汽等吸收气体的透过率可以根据场区海拔高度、气象信息及背景环境等因素, 选择合适的大气模式, 通过辐射传输计算得到, 如图 4 所示, 太阳光度计测量的通道透过率与辐射传输计算的大气透过率, 两者差异小于 0.01, 改变几何因子即可得遥感器观测方向的大气透过率。

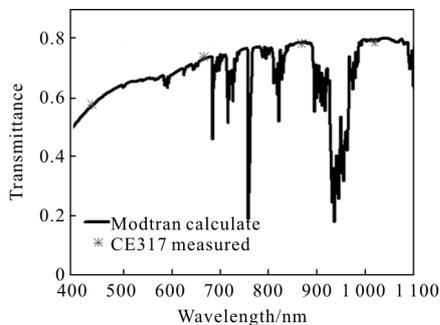


图 4 大气透过率

Fig.4 Atmospheric transmittance

### 2.3 目标-背景辐射分离

利用星载遥感器的光谱响应函数对靶标光谱反射率归一化得灰阶靶标等效反射率, 将其与遥感影像计数值(DN 值)进行线性拟合, 如图 5 所示, 得遥感器响应值与灰阶靶标反射率的关系曲线。若已知传感器暗电流或者通过冷空观测, 可进一步求得遥感器对大气程辐射及地气耦合辐射的响应值, 即截距值减去暗电流, 同时遥感影像计数值扣除截距后即得多反射率灰阶靶标响应值。

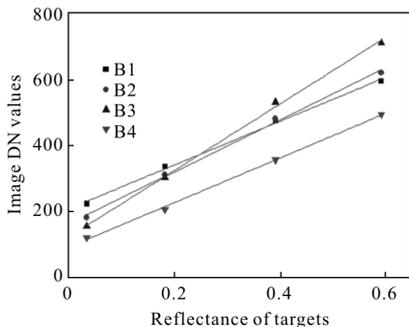


图 5 传感器响应与靶标反射率关系

Fig.5 Relationship of sensor's response and target reflectance

### 2.4 辐射定标系数

灰阶靶标布设区域的背景环境反射率为常数, 故试验场区的地面总照度保持不变, 结合地面同步测量及大气外太阳常数, 可得过顶时刻经大气直射至地面的总辐照度, 进而求得遥感器入瞳辐亮度, 将其对光学遥感器光谱响应函数归一化得等效辐亮度。根据光学卫星传感器的定标方程, 采用最小二乘法对灰阶靶标响应值与计算的遥感器入瞳辐亮度进行拟合, 如图 6 所示, 以获得星载光学传感器的在轨辐射定标系数。相对辐射校正场(如白沙场、敦煌场等), 多反射率灰阶靶标能够在高分辨光学卫星传感器的全动态范围内进行在轨绝对辐射定标, 更能真实地反映其响应特性。

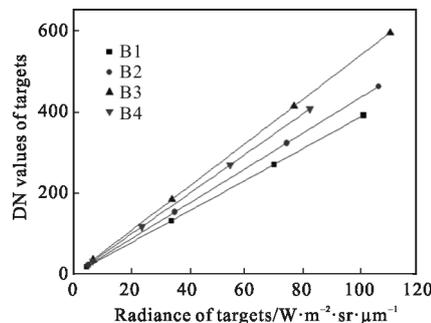


图 6 辐射定标系数

Fig.6 Radiometric calibration coefficient

## 3 分析讨论

高分辨光学卫星传感器基于多种反射率灰阶靶标的在轨绝对辐射定标方法, 在(半程)辐照度基法的基础上, 以少量的包括高反射率灰阶靶标(60%与 40%反射率)为检测参照目标, 以地面漫射辐射/总辐射比与大气光学特性等参数的同步(准同步)测量代替辐射传输计算中对气溶胶散射特性的假设, 将参照目标反射信号与程辐射及地气耦合辐射等背景信号分离, 降低对试验场区的背景环境要求, 并且简化了绝对辐射定标流程。通过对基于多灰阶靶标的高分辨光学卫星传感器的在轨定标不确定度分析, 并将其定标结果与常用的反射率基法定标结果相比较, 以验证该定标方法的可行性与有效性。

### 3.1 不确定度分析

基于多灰阶靶标的高分辨率光学卫星传感器在轨绝对辐射定标的不确定度主要来源于靶标反射

率、漫射辐射/总辐射比、大气光学特性测量等,另外大气外太阳常数、大气模式等因素也会引入定标误差。灰阶靶标反射率测量误差主要由漫射板的定标精度、天空漫射修正等组成;大气吸收透过率主要受水汽、氧气等特征吸收气体影响,需根据试验场区海波高度、气象资料及环境等因素,选择合适的大气模式计算得到,在可见近红外波段其误差约为 1%;基于多种反射率灰阶靶标的在轨绝对定标不确定度分析,如表 1 所示,综合不确定度优于 3.5%。为进一步提高在轨定标精度,可通过选择大气干洁、海拔较高、背景反射率低的大面积均匀场等外场试验条件,以有效降低大气吸收、程辐射等因素影响,同时借助更加先进的定标技术来提高漫射板定标精度<sup>[17-19]</sup>。

表 1 不确定度分析

Tab.1 Uncertainty analysis

Uncertainty sources		Uncertainty contribution
Reflectance of targets	Diffuser panel calibration	2%
	Sky diffuse correction	1%
	Diffuse-to-global ratio	2%
	Atmospheric optical depth	1%
	Transmittance calculation	1%
	Solar irradiance	1%
	Field measurement error	0.5%
Total uncertainty		3.5%

### 3.2 定标系数比较

基于大面积辐射校正场的反射率基法,通过地面同步(准同步)测量,利用辐射传输计算星载传感器的入瞳辐亮度,进而与卫星图像计数值相比较得出定标系数。高分辨率光学卫星传感器基于反射率基法的定标结果<sup>[20]</sup>与基于多灰阶靶标的在轨定标结果,如表 2 所示,多光谱传感器的各通道定标系数差异均优于 5%,其中第三通道差异最大达到 4.89%,进一步验证基于多灰阶靶标的高分辨率光学卫星传感器在轨辐射定标方法的可行性与有效性。该定标方法不仅能够突破时空限制,还能够在复杂背景环境条件下,实现传感器全动态范围内高精度、高频次、常态化的移动定标;以地面实际测量代替气溶胶模型假定,并通过辐射传输计算(主要是大气吸收透

过率部分),获得溯源于太阳常数的入瞳辐亮度,简化了在轨绝对辐射定标流程。

表 2 定标系数比较

Tab.2 Comparison of calibration coefficient

Sensor band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
Calibration coefficient	3.869 1	4.350 6	5.395 6	4.951 8
Calibration coefficient in 2013	3.920 0	4.249 9	5.144 0	4.746 1
Relative error	-1.302%	2.372%	4.892%	4.342%

## 4 结 论

高分辨光学卫星传感器基于多种反射率灰阶靶标的在轨绝对辐射定标方法,在(半程)辐照度基法的基础上,以地面实际测量代替辐射传输计算中气溶胶散射;通过多灰阶靶标反射率与遥感器响应值的线性拟合,扣除程辐射及地气耦合辐射影响;降低在轨定标试验对场区背景环境要求,简化辐射定标流程的同时,提高在轨绝对辐射定标精度。在轨定标试验结果表明:基于多反射率灰阶靶标的高分辨率光学卫星传感器定标不确定度优于 3.5%,与反射率基法定标结果差异优于 5%,验证了该定标方法的有效性与其可行性。相对大面积辐射校正场,基于多种灰阶靶标的在轨定标方法,不仅能够突破时空等条件限制,还能够在复杂背景环境条件下,实现星载光学遥感器全动态范围内的高精度、高频次、常态化移动定标;相对基于人工靶标的反射率基法,该方法以地面同步的实际测量代替气溶胶散射特性假设,并通过参照目标及其遥感响应的线性拟合,简化定标流程的同时提高精度,对提高国内光学遥感卫星的在轨定标水平及遥感影像的量化应用具有重要意义。

### 参考文献:

[1] Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, et al. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 606-623. (in Chinese)

[2] Biggar S F. In-flight methods for satellite sensor absolute radiometric calibration [D]. Tucson: University of Arizona, 1990.

- [3] 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.
- [4] Thome K J. Absolute radiometric calibration of Landsat-7 ETM+ using the reflectance-based method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(2): 27-38.
- [5] Biggar S F, Slater P N, Gellman D I. Uncertainties in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4 to 1.1 $\mu\text{m}$  range [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 245-252.
- [6] Slater P N, Biggar S F, Thome K J, et al. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, 13(2): 349-359.
- [7] Thome K J. Validation plan for MODIS level 1 at-sensor radiance[R]. <http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS>.
- [8] Han Qijin, Fu Qiaoyan, Pan Zhiqiang, et al. Absolute radiometric calibration and validation analysis of ZY-3 using artificial targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 167-173. (in Chinese)
- [9] Zheng Xiaobing, Zhang Liming, Wu Haoyu, et al. Advanced radiometric calibration techniques for optical remote sensing [J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(21): 16-22. (in Chinese)
- [10] Fu Qiaoyan, Min Xiangjun, Li Xingchao, et al. In-flight absolute calibration of the CBERS-02 CCD sensor at the Dunhuang test site[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(4): 433-439. (in Chinese)
- [11] Zhang Yuxiang, Zhang Guangshun, Huang Yibin, et al. In-flight vicarious radiometric calibration for VIS-NIR channels of FY-1C satellite sensor at Dunhuang site [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(6): 740-747. (in Chinese)
- [12] Hu Xiuqing, Zhang Yuxiang, Qiu Kangmu. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(6): 458-464. (in Chinese)
- [13] Han Qijin, Fu Qiaoyan, Zhang Xuewen, et al. High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1707-1714. (in Chinese)
- [14] Denis N, Andreas B, Jeff C M, et al. Absolute radiometric calibration of the RapidEye multispectral imager using the reflectance-based vicarious calibration method [J]. *Appl Remote Sensing*, 2011(5): 053-54.
- [15] Holekamp K. Radiometric characterization of the IKONOS, QuickBird, and OrbView-3 sensors [C]//2006 Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop, 2006: SSTI-2220-0076.
- [16] Pagnutti M. Atmospheric correction of high spatial resolution commercial satellite imagery products using MODIS atmospheric products [C]//3rd International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images, 2005: SSTI-2220-0036.
- [17] Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei, et al. Advanced calibration method for sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1337-1342. (in Chinese)
- [18] Chen Hongyao, Zhang Liming, Shi Jiading, et al. High accuracy gonireflectometer for solar diffuser spectral BRDF measurement[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 72-80. (in Chinese)
- [19] Huang Honglian, Yi Weining, Du Lili, et al. Multi-spectral remote sensing image true color synthesis technique based on artificial target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 11260021. (in Chinese)
- [20] Zhang Xuewen, Fu Qiaoyan, Han Qijin, et al. The field radiometric calibration and validation of ZY-3 multispectral sensor [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(9): 2476-2480. (in Chinese)