

基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器 在轨辐射定标方法

徐伟伟^{1,2}, 张黎明^{1,2}, 陈洪耀^{1,2}, 李 鑫^{1,2}, 杨宝云^{1,2}, 王戟翔^{1,2}

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 在轨绝对辐射定标是遥感信息量化应用的关键技术之一。基于反射点源的在轨定标新方法将目标反射率的场地多点测量转换为实验室高精度检测, 结合同步大气光学特性参数测量, 通过简化的辐射传输计算获取星载遥感器的入瞳辐亮度; 根据点源法在轨点扩展函数检测, 有效分离目标反射辐射与程辐射、背景辐射, 消除了对气溶胶散射特性的假设, 并突破场地替代定标易受时空及天气条件的限制, 能够在复杂环境条件下实现高分辨率光学卫星传感器高精度、高频次的移动定标。初步实验结果表明, 基于反射点源的光学卫星传感器在轨绝对辐射定标不确定度优于 3%, 与基于大面积灰阶靶标的定标结果差异为 3.02%, 简化定标流程的同时提高了定标精度与效率。

关键词 遥感; 绝对辐射定标; 反射点源; 大气透射率; 系统点扩展函数

中图分类号 TP79; O435 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0328001

In-Flight Radiometric Calibration of High Resolution Optical Satellite Sensor Using Reflected Point Sources

Xu Weiwei^{1,2}, Zhang Liming^{1,2}, Chen Hongyao^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Yang Baoyun^{1,2},
Wang Jixiang^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In-flight absolute radiometric calibration is one of critical techniques for quantified information application of remote sensing. A novel calibration approach is presented based on reflected point sources. At the same time, the reflectance measurement on site is changed to accurate determination in laboratory. The top-of-atmosphere radiance of satellite-borne remote sensors can be calculated by simplified radiometric transfer code and measurement of the atmospheric optical properties. The calibration method can also isolate the response value of remote sensing image created by the targets from the response produced by sky path radiance and background radiance through in-flight point spread function estimation by point source method, which can eliminate the assumption of aerosol scattering properties. The approach can break the limit of time, locale and weather conditions at vicarious calibration sites and achieve high precision, high frequency mobile calibration for high spatial resolution satellite sensor in complex environments. Preliminary results show that its uncertainty is less than 3%. The difference of calibration coefficient is 3.02% between the proposed method and the method based on large-area gray-scale target. Simultaneously, the method can simplify the process and improve the calibration accuracy and efficiency.

Key words remote sensing; absolute radiometric calibration; reflected point source; atmospheric transmittance; point spread function of system

OCIS codes 280.4788; 010.0280; 280.3420

收稿日期: 2016-10-12; **收到修改稿日期:** 2016-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(41301374)、中国科学院科技创新基金(CXJJ-14-S89)

作者简介: 徐伟伟(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学遥感器在轨辐射定标及成像质量分析等方面的研究。

E-mail: weilxu@aiofm.ac.cn

1 引 言

随着光学遥感技术的发展,遥感数据不仅应用于定性或半定量地描绘地物目标的基本特征,还深入地应用到定量化解译地球物理参数和地球环境系统的演变规律,从对地球形态形貌的识别发展到对地球系统多圈层物理参数的精细化定量遥感。这一由定性走向量化的技术能力提升,有赖于定标技术的支持^[1-2],并且对卫星载荷的绝对辐射定标和定量化应用提出了更高的精度要求。

遥感载荷辐射定标的任务是将遥感器以数字化方式记录的观测数据转换为地物目标的辐射量值(辐亮度/反射率等)。虽然遥感载荷在发射前进行了严格的实验室定标与性能检测,但是由于受卫星发射震动与加速度、真空环境与高能粒子轰击等在轨运行空间环境、电子元器件老化与性能衰减等因素影响,遥感器性能难免发生不同程度的衰变,因此有必要开展定期或不定期的在轨定标与性能检测工作。没有高精度的定标,同一颗卫星不同时相获取的遥感数据就不能相互比较,不同卫星获取的遥感数据更无法相互比较,高精度、高频次、常态化的在轨定标工作贯穿从卫星研制开始到卫星运行终止的全过程^[3-5]。星载遥感器在轨定标方法主要有星上定标和替代定标。星上定标无论是采用内置标准灯与积分球方法,还是太阳漫射板方法,都是将地面实验室辐射基准作为星上定标参考,尚存在向国际单位溯源的难题,而且对卫星发射过程中的冲击和加速度等影响没有有效的监测手段,在发射后将完全依赖自身的稳定性来保障其预期精度。业务化遥感卫星的辐射定标主要以场地替代定标为主,目前国内外相继发展了基于沙漠、海洋、干湖床、深对流云、冰雪等目标的定标方法,并已成功应用于 LANDSAT、SPOT、MODIS、FY、CBERS 和 ZY 等系列卫星的在轨辐射定标与检校,均取得了良好的应用效果^[6-15],但是各种算法的特点和适用性存在一定的差异,且容易受场地地理位置及天气状况等因素限制,使得遥感器定标周期长、机会少、效率低。针对近年快速发展的高分辨率卫星,国际上提出并利用光学特性优异的大面积人工靶标作为参照目标,实现了星载光学遥感器全动态范围的辐射定标,虽然突破了时间、空间及天气等因素限制,但是大批量靶标运输布设和实验等耗费大量的人力、物力、财力^[16-18]。因此,提出采用轻量小型化的反射点源作为检测参照目标,以期实现高分辨率光学卫星传感器高精度、高频次、业务化的在轨绝对辐射定标。

本文提出的基于反射点源的在轨定标方法是实现高分辨光学卫星传感器高精度、业务化定标的有效途径之一,在介绍该定标原理的基础上,利用在轨检测实验所获取的反射点源与灰阶靶标遥感影像,对其数据处理过程与定标结果及不确定度进行了分析讨论。

2 基本原理

星载光学遥感器入瞳辐亮度主要由大气程辐射、目标反射辐射及地-气耦合辐射等三部分组成。在假定平面平行大气条件下,对于非均一的检测参照目标面(反射点源),需考虑镜面反射率及其所在背景环境的影响,则光学卫星传感器入瞳辐亮度可表示为

$$L = L_a + L_{\text{sat}} + L_{\text{a-g}}, \quad (1)$$

式中 L_a 是大气程辐射亮度, L_{sat} 是镜面反射辐射亮度, $L_{\text{a-g}}$ 是地-气耦合辐射亮度。

镜面反射辐射亮度如图 1 所示,由能量守恒原理,太阳直射至反射点源上面积为 $A_i = \pi y_i^2$ 内的光通量应与经镜面反射至星载光学遥感器高度处面积为 $A_{\text{sat}} = \pi y_{\text{sat}}^2$ 内的光通量相等,即

$$E_s T_s \pi y_i^2 \rho T_v = E_{\text{sat}} \pi y_{\text{sat}}^2, \quad (2)$$

式中 E_s 是太阳常数, T_s 是太阳-目标路径大气透射率, ρ 是镜面反射率, T_v 是目标-卫星路径大气透射率, E_{sat} 是经镜面反射至遥感器高度处的光谱辐照度。

根据近轴光线通过光学元件的传播矩阵,利用矩阵方法可获得光线经空间及反射镜传输的参数变化,可知卫星高度 y_{sat} 与反射镜高度 y_i 的几何关系为

$$y_{\text{sat}} = y_i \left(\frac{d_{\text{sat}}}{f} + 1 \right), \quad (3)$$

式中 d_{sat} 是卫星轨道高度, f 是反射镜焦距。

由于 $d_{\text{sat}} \gg f$, 将(3)式代入(2)式,化简得反射镜反射至光学卫星传感器高度处的辐照度为

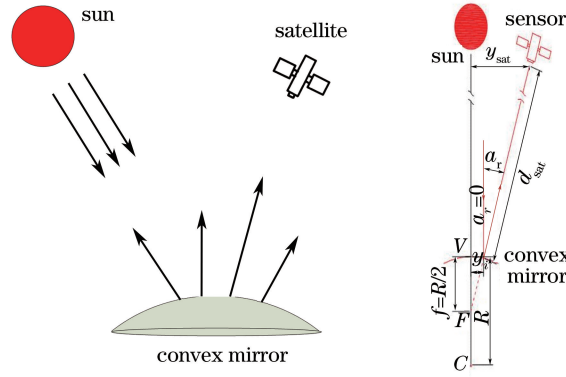


图 1 镜反射能量

Fig. 1 Reflected power of mirror

$$E_{sat} = E_s T_s \rho T_v \left(\frac{f}{d_{sat}} \right)^2 = \frac{1}{4d_{sat}^2} R^2 \rho E_s T_s T_v, \quad (4)$$

式中 $R=2f$ 是反射镜曲率半径。

经几何光线追迹分析与数值估算,光学卫星传感器接收的反射光斑仅为镜面上一小区域,且一般在厘米量级,相对米量级空间分辨率的光学载荷,反射点源可作为亚像元的点激励光源。由于辐射定标通常用于建立传感器的入瞳辐亮度与其响应值间的定量关系^[19],故基于光通量守恒可知,经反射镜反射至光学卫星传感器的等效入瞳辐亮度为

$$L_{sat} = E_s T_s \rho T_v \left(\frac{f}{t_{GSD}} \right)^2 = \frac{1}{4t_{GSD}^2} R^2 \rho E_s T_s T_v, \quad (5)$$

式中 t_{GSD} 是星载遥感器地面采样间隔。

假定实验场区的背景反射率为常数,则该区域的地面总照度保持不变,检测参照目标上空的程辐射和地-气耦合辐射在同一大气环境下为常量,将其辐亮度综合设定为 $L_{a,g}$,则光学卫星传感器的入瞳辐亮度可表示为

$$L = \frac{1}{4t_{GSD}^2} R^2 \rho E_s T_s T_v + L_{a,g}. \quad (6)$$

由此可知,光学卫星传感器入瞳辐亮度不仅与载荷地面采样间隔、参照目标反射镜曲率半径有关,而且与反射镜反射率、大气透射率也有关。其中镜面反射率的现场测量可变换为实验室的高精度测量,因此,实验现场仅需要利用太阳光度计进行大气透射率的同步获取,该定标方法可以大大简化卫星过顶时刻的现场同步数据观测。

作为参照目标的反射点源产生亚像元的类恒星辐照度源,基于 IKONOS 卫星的恒星观测等点源法在轨性能检测^[19-21]与光通量守恒定理,光学卫星传感器对反射点源目标观测成像时,镜反射辐射能量将扩散在其焦平面一定区域内。由于参照目标上空的程辐射与地-气耦合辐射为常数,将其与暗电流等合并,根据遥感器定标方程得

$$\sum f_{DN} = AL_{sat}^{eff} + \sum f_{DN0}, \quad (7)$$

式中 f_{DN} 是遥感影像响应值, A 是定标系数, f_{DN0} 是程辐射与地-气耦合辐射及暗电流等响应值, $L_{sat}^{eff} = \left[\int L_{sat}(\lambda) f_{RSR}(\lambda) \right] / \int f_{RSR}(\lambda)$, $f_{RSR}(\lambda)$ 是星载光学遥感器的光谱响应函数。

因此,根据实验室测量的镜面反射率及曲率半径,地面同步测量的大气光学厚度及气象参数等信息,结合辐射传输计算的大气透射率及卫星遥感影像可得其定标系数。若暗电流已知或通过冷空观测,可进一步求得大气程辐射与地-气耦合辐射响应值。

3 实验及数据处理

光学卫星传感器基于反射点源的在轨辐射定标,于 2011 年 7 月在新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市附近的

辐射定标场进行了外场实验,如图 2 所示,在定标场区布设了大面积多种反射率灰阶靶标、 4×4 阵列的反射点源等检测参照目标,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。

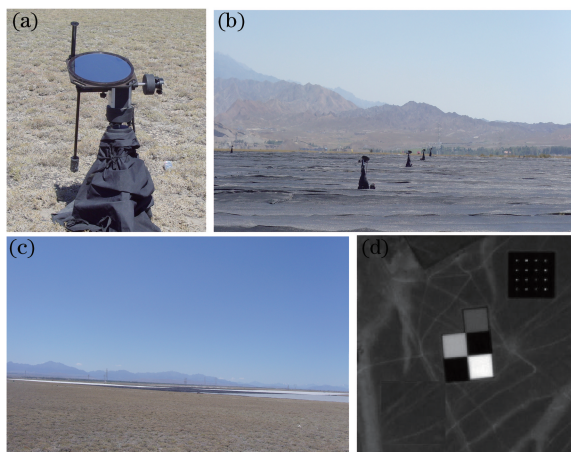


图 2 在轨检测实验及遥感影像。(a) 反射点源; (b) 布设现场; (c) 灰阶靶标; (d) 遥感影像

Fig. 2 In-flight estimation experiment and image. (a) Reflected point source;
(b) on-site deployment; (c) gray-scale target; (d) remote sensing image

3.1 镜面反射率

在保持镜面清洁的情况下,外场定标实验时镜面反射率不会发生变化,可在实验室进行高精度测量,以最小化点源参照目标镜面反射率的现场测量引入定标不确定度。利用实验室的镜反射测量装置,统计分析得到作为参照目标的反射点源的镜面反射率,如图 3 所示,为实验数据处理及星载光学遥感的在轨辐射定标精度分析提供科学依据。

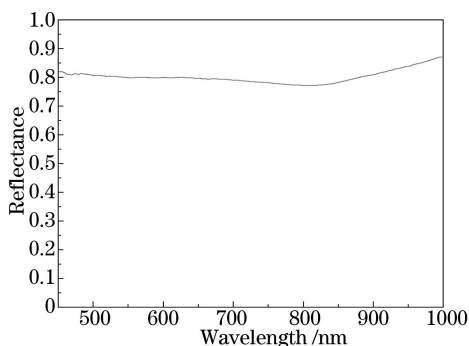


图 3 镜面反射率曲线

Fig. 3 Mirror reflectance

3.2 大气透射率

在辐射定标实验当天,在反射点源与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 进行地面太阳直射辐射测量。在大气透射率的辐射传输(MODTRAN)计算过程中,选择合适的大气模式、气溶胶模型等,使得计算的大气透射率和太阳光度计测量的通道透射率相匹配,如图 4 所示,两者的误差小于 0.01,从而得到太阳-目标路径的大气透射率,然后改变几何因子,以得到遥感观测方向的大气透射率。

3.3 系统 PSF 检测

所有光学成像系统进行影像获取时都会产生亮度模糊现象,采用系统点扩展函数(PSF)来准确描述。成像系统对点源响应直观地表现为系统本身的辐射扩散特性,点源法在轨系统 PSF 检测可有效评估星载光学遥感的扩散特性,并确定系统 PSF 的半峰全宽,该参数表征光学卫星传感器成像时的模糊宽度。根据成像系统组成分析及点源法在轨性能检测方法研究^[21-22],可近似采用高斯函数来描述光学卫星传感器成像系统的 PSF,如图 5 所示,并分离点源目标反射辐射与大气程辐射、地-气耦合辐射及暗电流等背景辐射的响

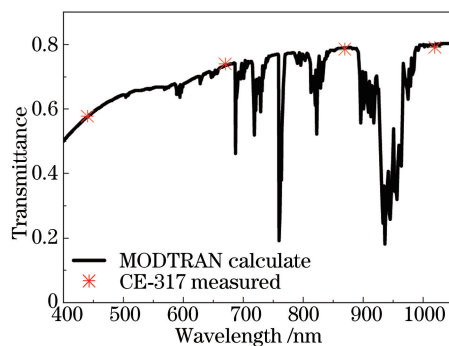


图 4 大气透射率

Fig. 4 Atmospheric transmittance

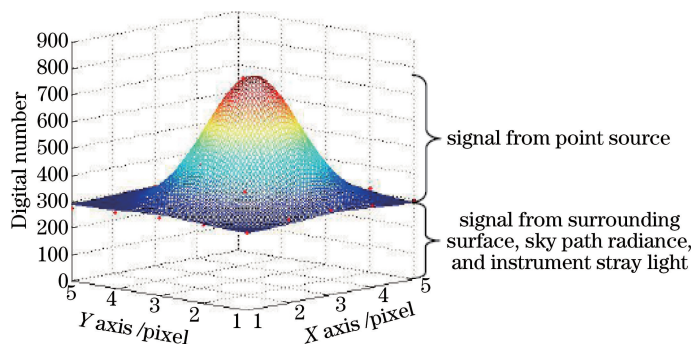


图 5 系统 PSF 检测

Fig. 5 System PSF estimation

应信号,获取与目标反射至卫星入瞳辐亮度相对应的星载遥感器的响应值。

3.4 反射镜响应值

在同一大气环境条件下,参照目标上空的程辐射及地-气耦合辐射为常量,即反射点源目标的背景辐射信号为常量,主要由大气程辐射、地-气耦合辐射、背景环境与暗电流等组成。作为亚像元的反射点源,其响应值 $\sum f_{DNS}$ 可以通过统计平均的方法获取,基于光通量守恒,点源参照目标反射的能量将辐射扩散在其焦平面一定区域内(空间辐射特性),如图 6 所示,反射点源遥感影像红框内像素统计值 $f_{DNS}(n)$ 作为星载遥感器对参照目标的响应值(含大气程辐射、地-气耦合辐射、背景环境与暗电流等背景辐射信号),绿框内(红框外)像素统计平均值 $\bar{f}_{DNS_Background}$ 作为星载光学遥感器对背景辐射的响应值,进而获取反射镜响应值。

$$\sum f_{DNS} = \sum_{n=1}^{N^2} [f_{DNS}(n) - \bar{f}_{DNS_Background}] \quad (8)$$

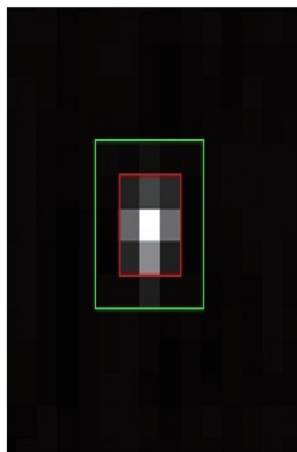


图 6 点源目标与背景辐射响应

Fig. 6 Response of point sources and background radiance

3.5 辐射定标系数

根据第2节所述的基本原理,将实验室测量的参照目标反射率、地面同步测量的大气光学厚度及气象参数等信息,结合辐射传输计算的大气透射率、反射镜曲率半径及遥感器地面采样间隔等参数,计算出经反射镜反射至传感器的等效入瞳辐亮度,将其对星载光学遥感器的光谱响应函数归一化得等效辐亮度,然后对反射点源影像进行系统PSF检测,获取光学遥感器成像系统的模糊宽度,基于光通量守恒,并由(8)式对反射点源遥感影像数据统计分析得到反射镜响应值,进而将等效辐亮度与图像的反射镜响应值相比较,获取星载光学遥感器的在轨绝对辐射定标系数。

4 分析讨论

光学卫星传感器基于反射点源的在轨绝对辐射定标方法,是反射率基法与恒星定标法的有机结合,以反射点源作为检测参照目标并产生类似恒星源的辐照度点光源。通过实验室高精度的镜面反射率、地面同步(准同步)的大气光学特性与气象参数等信息测量,消除了参照目标反射率的现场测量与气溶胶散射特性的假设,将目标反射辐射响应与背景辐射(大气程辐射、地-气耦合辐射、背景环境及暗电流等)响应相分离,降低了对实验场区背景环境的应用要求,简化了在轨辐射定标流程。将光学卫星传感器基于反射点源的在轨辐射定标结果与基于大面积灰阶靶标的定标结果相比较,以验证该定标方法的可行性与有效性,并对其进行定标不确定度分析。

4.1 定标系数比较

基于大面积灰阶靶标的在轨辐射定标方法,通过地面同步测量靶标反射率、大气光学特性、气象参数等信息,利用辐射传输软件计算星载光学遥感器的入瞳辐亮度,进而与参照靶标的卫星图像计数值相比较得出定标系数。高分辨光学卫星传感器基于反射点源的在轨辐射定标结果为3.525,基于灰阶靶标的定标结果为3.635,全色通道定标系数差异为3.02%^[23],具有较好的一致性,验证了基于反射点源的光学卫星传感器的在轨绝对辐射定标方法的可行性与有效性。作为检测参照目标的反射点源,具有轻量小型化的特点,不仅能够突破时空及天气条件的限制,还能够在复杂背景环境条件下实现光学卫星传感器的高频次移动定标。

4.2 不确定度分析

基于反射点源的光学卫星传感器在轨辐射定标方法的不确定度主要来源于镜面反射率、大气光学特性、点扩展因子等,另外太阳常数、大气模式等因素也会引入定标误差。反射点源目标镜面反射率的实验室测量误差优于2%,大气光学厚度测量误差约1%。大气吸收透射率主要受水汽、氧气等特征吸收气体影响,需根据实验场区海拔高度、气象及环境等因素,选择合适的大气模式计算,可见近红外波段误差约1%。基于反射点源的光学卫星传感器的在轨绝对辐射定标不确定度分析,如表1所示,综合不确定度优于3%。为进一步提高基于反射点源的在轨定标精度,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实验条件,以降低大气吸收及程辐射等因素影响,并尽可能保证实验设备操作及数据获取的规范性,减小主观因素引入的测量误差。

表1 不确定度分析

Table 1 Uncertainty analysis

Uncertainty sources	Uncertainty contribution /%
Reflectance of mirror	2.0
Atmospheric optical depth	1.0
Transmittance calculation	1.0
Radius of curvature	0.5
Ground sample distance	0.5
Solar irradiance	1.0
Point spread factor	0.5
On site measurement error	0.5
Total uncertainty	3.0

4.3 反射镜响应值

背景辐射响应主要是大气程辐射、地-气耦合辐射、背景环境与暗电流等信号的综合响应值,在同一大气环境条件下假定为常量。作为参照目标的反射点源通过镜面反射太阳直射光来对光学卫星传感器进行在轨辐射定标,与大面积辐射校正场或灰阶靶标等辐亮度参照源不同,点源目标产生类恒星辐照度源。根据光通量守恒与成像系统 PSF 的物理内涵及基于反射点源的在轨 PSF 检测结果,获取成像系统的模糊宽度,并统计分析得点源遥感影像响应值与背景辐射(大气程辐射、地-气耦合辐射、背景环境与暗电流等背景辐射信号)响应值,将点源目标反射辐射与背景辐射相分离,进而求得与镜反射至卫星入瞳辐亮度相对应的传感器响应值。因此,反射镜响应值与背景均匀性、采样效应、点扩展因子等因素相关,为提高反射镜响应值的提取精度,需要在均匀的、反射率较低的大面积暗背景上布设多组多级反射点源,如图 2 所示。进行系统 PSF 检测的同时,通过统计平均与线性拟合来降低背景均匀性、采样效应、点扩展效应等因素的影响,提高反射镜响应值的提取精度,进而提高基于反射点源的光学卫星传感器在轨绝对辐射定标精度。

5 结 论

基于反射点源的光学卫星传感器在轨辐射定标新方法将参照目标的场地多点测量转换为实验室高精度测量,结合地面同步测量的大气光学特性及气象参数等,通过简化的辐射传输计算(主要是大气透射率)获取星载传感器入瞳辐亮度;根据光通量守恒与成像系统基于反射点源的在轨 PSF 检测结果及遥感影像,将反射点源目标的反射辐射响应与背景辐射(大气程辐射、地-气耦合辐射、背景环境及暗电流等)响应有效分离,经统计分析得目标反射辐射响应值,进而获取在轨绝对辐射定标系数。实验结果表明,基于反射点源的光学卫星传感器在轨绝对辐射定标不确定度优于 3%,与基于大面积灰阶靶标的定标结果差异为 3.02%,简化定标流程的同时提高了定标精度与效率。作为检测参照目标的反射点源,与大面积的辐射校正场或人工靶标等相比较,具有轻量、小型化的特点,易于在任何位置布设。镜面反射率的方向变化相对漫射目标很小,大大降低入瞳辐亮度的不确定度,且点源响应的辐射扩散特性可有效降低背景辐射等因素影响。因此,光学卫星传感器基于反射点源的在轨绝对辐射定标方法,不仅能突破时空及天气限制,还能够在复杂环境条件下实现光学卫星传感器高精度、高频次的移动定标。

参 考 文 献

- [1] Zheng Xiaobing. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellite [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 2-8.
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(1): 2-8.
- [2] Liang Shunlin. Quantitative remote sensing of land surfaces[M]. Fan Wenjie, Transl. Beijing: Science Press, 2009.
梁顺林. 定量遥感[M]. 范闻捷, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] Han Qijin, Pan Zhiqiang, Wang Aichun. In-orbit radiometric calibration and quantitative application for civil remote sensing satellite payloads[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(2): 57-65.
韩启金, 潘志强, 王爱春. 民用遥感卫星载荷在轨辐射定标与定量应用[J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(2): 57-65.
- [4] Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, et al. Whole process radiometric calibration of optical remote sensors[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 616-623.
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 616-623.
- [5] Biggar S F. In-flight methods for satellite sensor absolute radiometric calibration[D]. Tucson: University of Arizona, 1990.
- [6] 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.
- [7] Philippe M T, Kurtis J T, Nigel F, et al. Earthobservation sensor calibration using a global instrumented and automated network of test sites (GIANTS)[C]. SPIE, 2001, 4540: 246-254.
- [8] Chander G, Helder D L, Markham B L, et al. Landsat-5 TM reflective-band absolute radiometric calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2747-2760.
- [9] Yoshida M, Murakami H M, Mitomi Y, et al. Vicarious calibration of GLI by ground observation data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10): 2167-2176.

- [10] Gaoh L, Gu X F, Yu T, *et al.* HJ-1A HSI on-orbit radiometric calibration and validation research[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(11): 3119-3128.
- [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.
张玉香, 张广顺, 黄意玢, 等. FY-1C 遥感器可见-近红外各通道在轨辐射定标[J]. 气象学报, 2002, 60(6): 740-747.
- [12] 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.
傅俏燕, 闵祥军, 李杏朝, 等. 敦煌场地 CBERS-02 CCD 传感器在轨绝对辐射定标研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 433-439.
- [13] 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.
张学文, 傅俏燕, 韩启金, 等. 资源三号多光谱传感器场地辐射定标与验证[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2476-2480.
- [14] Huang Wenxin, Zhang Liming, Si Xiaolong, *et al.* Theory and precision maintenance method of on-orbit reflectance calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0623001.
黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 等. 星上反射率定标原理及其精度保持方法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0623001.
- [15] Qiu Ganggang, Li Xin, Wei Wei, *et al.* Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0701001.
邱刚刚, 李 新, 韦 玮, 等. 基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标试验与分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0701001.
- [16] Holekamp K. Radiometric characterization of the IKONOS, QuickBird, and OrbView-3 sensors[C]. Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop, 2006.
- [17] Pagnutti M. Atmospheric correction of high spatial resolution commercial satellite imagery products using MODIS atmospheric products[C]. 3th International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images, 2005: 115-119.
- [18] Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.* On-orbit radiometric calibration based on gray scale tarps[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0212007.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0212007.
- [19] Bowen H S. Absolute radiometric calibration of the IKONOS sensor using radio-metrically characterized stellar sources [C]. Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings, 2002: 1-7.
- [20] Bowen H S, Dial G. IKONOS calculation of MTF using stellar images[R/OL]. [2015-12-12]. <http://calval.cr.usgs.gov/wordpress/wp-content/uploads/21Bowen.pdf>.
- [21] Xu Weiwei, Zhang Liming, Shen Zhengguo, *et al.* On-orbit MTF estimation of high resolution satellite optical sensor [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(2): 97-111.
徐伟伟, 张黎明, 沈政国, 等. 高分辨光学卫星传感器在轨 MTF 检测[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(2): 97-111.
- [22] Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.* On-orbit MTF measurement of high resolution satellite optical camera using periodic targets[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0711001.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于周期靶标的高分辨光学卫星相机在轨 MTF 检测方法[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0711001.
- [23] Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli, *et al.* On orbit radiometric calibration for Mapping Satellite-1 sensor[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(S1): 22-27.
黄红莲, 易维宁, 乔延利, 等. “天绘一号”卫星在轨辐射定标方法[J]. 遥感学报, 2012, 16(S1): 22-27.