

基于亚像元目标的高分辨率光学遥感卫星 在轨辐射定标方法

徐伟伟^{1,2*}, 张黎明^{1,2}, 李鑫^{1,2}, 司孝龙^{1,2}, 许永平^{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 辐射定标是光学遥感卫星数据量化应用的关键技术之一。提出了基于亚像元目标的高分辨率光学遥感卫星在轨辐射定标方法,以反射点源作为参照目标,并以地面同步测量为主,通过简化辐射传输的计算过程获取大气透过率与传感器入瞳辐亮度;根据多能量等级的亚像元目标设置与系统点扩展函数检测结果,将亚像元目标辐射与程辐射、地气耦合辐射及背景辐射有效分离;突破时空及天气条件限制,在复杂环境条件下实现光学遥感卫星全动态范围的高精度定标。实验结果表明,基于亚像元目标的高分辨率光学遥感卫星在轨辐射定标不确定度优于 3.2%,与基于大面积多反射率灰阶靶标的定标结果相差 3%;这种轻小型的亚像元目标适应于光学遥感卫星的高频次定标应用需求。

关键词 大气光学; 辐射定标; 亚像元目标; 大气透过率; 点扩展函数; 全动态范围定标

中图分类号 TP79; O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1001001

On-Orbit Radiometric Calibration of High-Resolution Optical Remote Sensing Satellite Based on Sub-Pixel Targets

Xu Weiwei^{1,2*}, Zhang Liming^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Si Xiaolong^{1,2}, Xu Yongping^{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 Radiometric calibration is one of the key technologies for quantitative application of optical remote sensing satellite data. This study proposes an on-orbit radiometric calibration approach for a high-resolution optical remote sensing satellite based on sub-pixel targets. The detection reference is the reflected point source, and the ground synchronization measurement is mainly used. Atmospheric transmittance and incident pupil radiance are obtained by simplifying radiometric transfer calculation. The method can also effectively isolate the response of a remote sensing image created by sub-pixel targets from the response produced by sky path radiance, ground-atmospheric coupled radiance, and background radiance, according to multi-energy sub-pixel target setting and on-orbit point spread function detection results. The approach can break the limit of time, locale, and weather conditions and achieve high precision calibration for the optical remote sensing satellite with a full dynamic range in complex environments. Results show that calibration uncertainty for the high-resolution optical remote sensing satellite based on sub-pixel targets is lower than 3.2%. Moreover, the calibration result of the proposed method is different from that of the gray-scale target method by 3%. A small and light sub-pixel target can satisfy the high frequency on-orbit calibration application of the optical sensing satellite.

Key words atmospheric optics; radiometric calibration; sub-pixel target; atmospheric transmittance; point spread function; full dynamic range calibration

OCIS codes 010.0280; 280.4788

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-05-02; 录用日期: 2019-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(41601388)、十三五航天预研基金(GFZX0401430407)

* E-mail: weilxu@aiofm.ac.cn

1 引 言

卫星遥感在自然资源、生态环境、应急管理、国民经济建设与国防安全领域发挥着至关重要的作用。遥感信息的定量化应用是空间遥感载荷研究的重点,定量化遥感应用的深度与广度取决于光学遥感卫星的辐射定标精度。辐射定标是将遥感器的输出数据转换为被观测目标辐射量值的过程,进而定量化解读地物目标的物理特征及演变规律^[1-3]。

光学遥感卫星发射前的实验室定标是最全面、最精确的辐射定标,然而发射时平台震动、宇宙粒子辐射与轰击、传感器应力释放、探测器元件老化与衰变等因素都会使卫星载荷性能衰减,因此光学遥感卫星必须在运行期间进行辐射定标^[4-7],光学遥感卫星全寿命期定标体系中的在轨辐射定标主要有星上太阳定标与场地替代定标。太阳反射波段的星上定标无论采用标准灯与积分球辐射源,还是朗伯性优异的漫反射板,都是以地面实验室基准作为参考,难以溯源至国际单位。光学遥感卫星载荷的业务化定标主要以替代定标为主,国际上发展了基于戈壁、盐湖等伪不变目标的定标方法^[8-13],例如我国敦煌辐射校正场在风云、资源、海洋等系列卫星的在轨定标方面起到了关键性作用,但是随着遥感定量化应用的深入,地表反射率偏低影响了在轨辐射定标水平的提高,定标精度约为 5%~8%,且难以实现光学遥感卫星全动态范围定标^[14-16]。针对高空间分辨率的光学遥感卫星,国内外开展的基于人工靶标的在轨辐射定标方法,均以传统的辐射传输计算为核心,并且以人工靶标替代自然校正场,且均需假设定标场气溶胶模型及背景等,这些在相对复杂的环境下与实际情况很难符合^[17-20]。因此,亟需提出一种基于亚像元目标(空间尺度远小于传感器分辨率)的高分辨率光学遥感卫星在轨辐射定标方法,以期提高高分辨率光学遥感卫星在轨定标精度。

基于亚像元目标的在轨定标方法是以空间尺度足够小,辐射亮度足够亮的反射点源作为亚像元参照目标,并以地面同步测量为主,辅以简化的辐射传输计算,实现高分辨率光学遥感卫星全动态范围的高精度定标。在介绍亚像元目标定标原理的基础上,利用实验获取亚像元目标与灰阶靶标影像,最后对其处理方法与结果进行了分析讨论。

2 基本原理

光学遥感卫星都是透过大气层进行对地观测,

根据辐射传输理论,在假定平面平行大气条件下,传感器入瞳辐亮度是太阳辐射、大气和亚像元目标及周边地表相互作用的结果,如图 1 所示,由程辐射、亚像元检测参照目标反射和地-气耦合背景辐射等组成。根据几何光线追迹分析,并由反射点源量级的曲率半径与太阳约 0.53° 的发散角估算可得,光学遥感卫星接收的反射光斑仅为点源目标镜面上尺度为厘米量级的一小区域,相对米量级分辨率的光学遥感卫星传感器可作为亚像元目标。

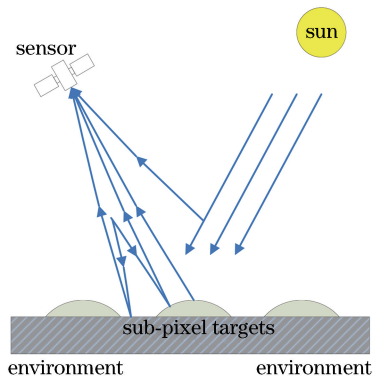


图 1 太阳辐射、大气和目标相互作用示意图

Fig. 1 Diagram of solar radiation and interaction of atmosphere and sub-pixel targets

对于非均一地物参照(亚像元目标检测参照),光学遥感卫星入瞳辐亮度可表示为

$$L = L_a + L_m + \frac{E_s \mu_s T_{\text{gas}} \exp(-\tau/\mu_s) + t_d(\theta_s)}{\pi} \rho_e t'_d(\theta_v), \quad (1)$$

式中: L_a 是程辐射; L_m 是亚像元目标反射辐亮度; E_s 是大气外太阳常数; μ_s 是太阳入射天顶角 θ_s 的余弦因子; T_{gas} 是大气吸收气体透过率; τ 是大气光学厚度参数; $t_d(\theta_s)$ 是太阳入射方向的大气散射透过率; S 是大气球面反照率; ρ_e 是定标场背景环境反射率; θ_v 是卫星对地观测天顶角; $t'_d(\theta_v)$ 是卫星观测方向的大气散射透过率。

根据能量守恒原理,太阳入射至地面亚像元参照目标的光通量应与其反射至光学遥感卫星入瞳的光通量相等^[21],并结合辐射传输理论可得亚像元目标反射至卫星入瞳的等效辐亮度为

$$L_m = I_m / D_{\text{GSD}}^2 = \frac{1}{4D_{\text{GSD}}^2} R^2 \rho E_s T_s T_v, \quad (2)$$

式中: I_m 是亚像元目标反射光强; D_{GSD} 是光学遥感卫星地面采样间隔; R 是亚像元目标的曲率半径; ρ 是亚像元目标反射率; T_s 是太阳入射-亚像元目标路径大气透过率; T_v 是亚像元目标-卫星观测路径大气透过率。

亚像元目标布设场区范围内背景均匀且反射率为常数,则认为定标场地地面总照度恒定,程辐射与地-气耦合背景辐射在同一大气环境条件下是常量且可合并为 $L_{a,a-g}$,因此光学遥感卫星入瞳辐亮度可改写为

$$L = \frac{1}{4D_{GSD}^2} R^2 \rho E_s T_s T_v + L_{a,a-g} \quad (3)$$

由此可知,光学遥感卫星入瞳辐亮度与地面采样间隔、亚像元目标参数及大气透过率等因素有关,或者说是与目标反射率呈线性关系,因此可在传感器动态范围内设置不同反射率或不同反射能量梯度的亚像元目标,以便在卫星遥感影像上获取不同的目标响应值。亚像元目标反射率的现场跑点测量可转换为实验室测量,地面同步测试仅需要进行大气光学参数的测量,基于亚像元目标的高分辨率光学遥感卫星定标方法大大简化了定标场区的同步测试,有望实现无人值守的在轨定标。

太阳入射至亚像元目标(反射点源)产生“类恒星”辐射源,基于光学遥感卫星的恒星观测^[22-24],结合光电遥感器的系统组成分析,发现传感器对亚像元目标的辐射响应将扩散在其探测器焦平面的一定区域(点扩散效应)。根据光通量守恒定理,光学遥感卫星基于亚像元目标的在轨绝对辐射定标方程可表示为

$$\sum \sum N_{DN} = AL_{eff} + \sum \sum N_{DN_0} \quad (4)$$

式中: N_{DN} 是亚像元目标遥感响应值; A 是定标系数; N_{DN_0} 是传感器对程辐射与地-气耦合辐射及暗电流等背景辐射的响应值; $L_{eff} = \frac{\int L_m(\lambda) R_{SR}(\lambda)}{\int R_{SR}(\lambda)}$, λ 是波长, $R_{SR}(\lambda)$ 是光学遥感器光谱响应函数。

因此,将定标场同步观测的数据和辐射传输计算的结果代入(4)式,结合多反射能量梯度的亚像元目标所组成的宽动态参照及其遥感影像,再经点扩展函数(PSF)检测,将不同能级的亚像元目标与其

遥感影响应统计值进行线性回归得到光学遥感卫星传感器对亚像元目标的响应值,进而与反射点源亚像元目标反射至光学遥感卫星的入瞳辐亮度相结合,得到遥感器的辐射定标系数。

3 实验数据处理

2016年7月在敦煌辐射校正场开展了高分二号光学遥感卫星基于亚像元目标的在轨定标实验,如图2所示,分别布设了用于检测高分辨率光学遥感器点扩展函数(或调制传递函数)的 3×3 阵列的亚像元参照目标、在轨绝对辐射定标的 3×2 阵列的多能级梯度(3个、4个与7个反射镜)的亚像元目标,以及用来验证亚像元目标定标方法的大面积多反射率灰阶靶标。亚像元目标主要由反射镜组件、高精度电动经纬仪及辅助设备等组成;反射镜组件是由不同数量的反射镜组成,能够反射不同能量梯度的太阳光,以适应遥感器的动态范围内;电动经纬仪能够根据卫星轨道预报参数实现过顶时刻太阳光-亚像元目标-卫星三者间的光路自动配准,将太阳光反射至卫星传感器入瞳,以便于观测成像。灰阶靶标是由光谱平坦性、面均匀性、朗伯性优异的大面积漫射材料拼接而成的人工参照目标,反射率分别为5%、20%、40%与60%。在卫星过目标区域(反射点源亚像元目标与大面积灰阶靶标的布设区域)时采集定标场区的背景环境反射率、多反射率灰阶靶标的反射率与大气光学特性及气象参数等信息。

3.1 PSF 检测

高分辨率光学遥感卫星基于亚像元目标的在轨PSF检测是根据点扩展函数的物理定义进行直接检测的方法^[23-25],采用参数化点扩散模型对每个亚像元目标响应数据进行曲面拟合,以确定每个目标响应的峰值位置,进而通过对非整数像素间隔的 3×3 阵列的亚像元目标响应值或计数值(DN)进行位置配准来获取亚像素插值的点扩散响应,以降低

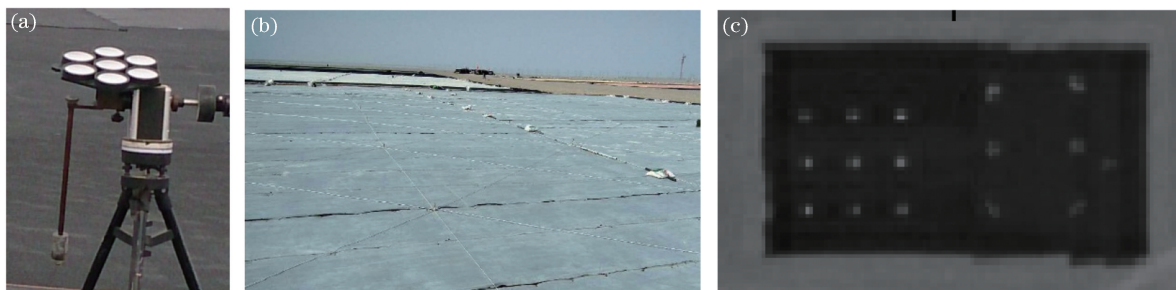


图2 在轨实验。(a)亚像元目标;(b)灰阶靶标;(c)遥感影像

Fig. 2 On-orbit experiment. (a) Sub-pixel target; (b) gray-scale target; (c) remote sensing image

系统采样效应与随机噪声的影响,如图 3 所示, X 与 Y 表示亚像元目标遥感影像的横纵向坐标轴,通过参数化高斯模型拟合求得光学遥感卫星成像系统的点扩展函数,将亚像元目标反射与程辐射、地-气耦合辐射及暗电流等背景辐射的响应信号相分离,以此来统计分析光学遥感卫星对亚像元目标的辐射响应。若对获取的系统点扩展函数进行离散傅里叶变换,取模并作归一化处理可得光学遥感卫星成像系统的调制传递函数(MTF),用来评估光学遥感卫星成像系统的成像质量。

3.2 辐射定标

3.2.1 地面测试数据

在卫星过顶亚像元目标定标场区前后 0.5 h,采用地物光谱仪(ASD)对布设的大面积灰阶靶标及场区的背景反射率进行准同步测量,如图 4 所示,靶标

反射率具有良好的光谱平坦性及线性,有利于提高定标精度,而作为亚像元目标的反射点源的镜面反射率在包装防护良好的情况下,可在实验室进行高精度测量。实验当天选择可代表卫星过顶参照目标布设区域大气光学特性的地点,架设太阳光度计(CE318)进行定标场区的太阳直射辐射测量。以辐射传输计算的高光谱大气透过率逼近太阳光度计(CE318)现场测量得到的通道透过率,二者差异小于 0.01,由图 4 可获取太阳-亚像元目标路径的大气透过率,进而通过改变几何因子,并利用辐射传输计算获取光学遥感卫星观测亚像元目标方向的大气透过率。臭氧、水汽等吸收气体透过率根据亚像元目标定标场区海拔与现场收集的气象参数等因素,并通过选择合适的大气模式与气溶胶模型再经简单的辐射传输计算得到。

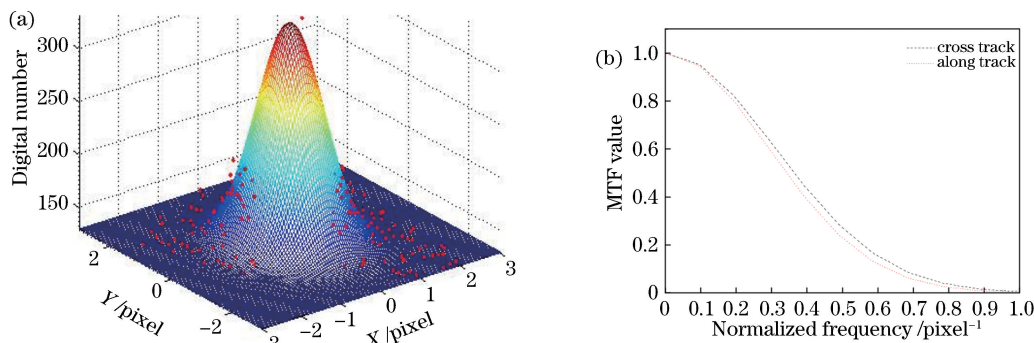


图 3 系统性能检测。(a)点扩展函数;(b)调制传递函数

Fig. 3 System performance detection. (a) PSF; (b) MTF

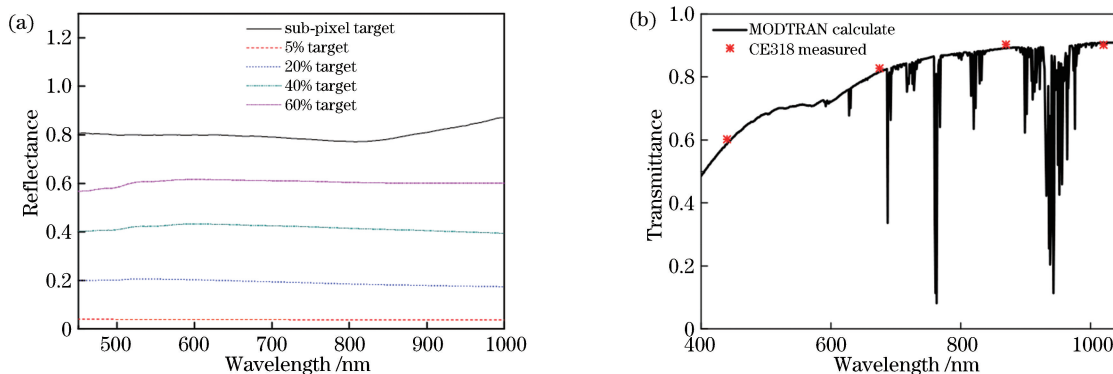


图 4 同步测试数据。(a)目标反射率;(b)大气透过率

Fig. 4 Synchronous test data. (a) Target reflectance; (b) atmospheric transmittance

3.2.2 辐射定标系数

亚像元目标定标场区范围内,点源目标上空的大气程辐射及地-气耦合背景辐射为常量,根据第 3.1 节光学遥感卫星传感器系统 PSF 检测结果,可以将亚像元目标的遥感图像响应值分离为亚像元目标的响应值与背景辐射(程辐射、地-气耦合、背景环

境、暗电流等组成)响应值两部分。作为亚像元目标的反射点源反射的辐射能量将扩散在探测器焦面的一定区域内(系统 PSF 特性),如图 5 所示,响应值可通过多能级目标的线性回归方法来获取,对系统 PSF 区域内的图像计数值进行统计,并结合不同能量梯度等级的亚像元目标进行线性拟合,斜率即亚

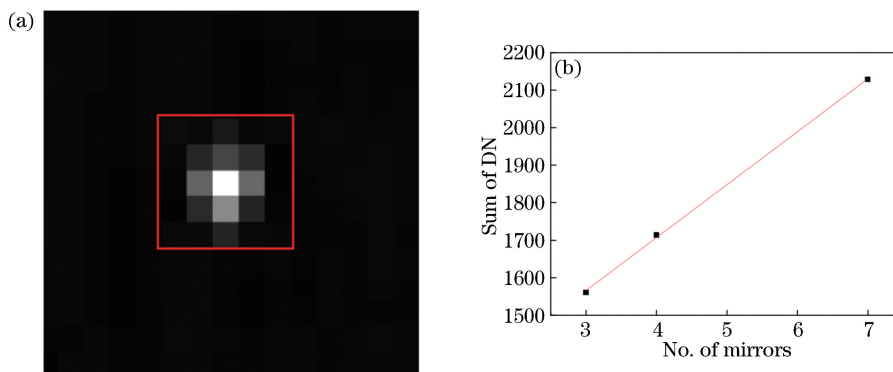


图 5 遥感影像处理。(a)亚像元目标影像;(b)线性拟合

Fig. 5 Remote sensing image process. (a) Image of sub-pixel target; (b) linear fitting

像元目标响应值。

定标场区同步测量数据结合亚像元目标参数及遥感器地面采样间隔,可得经反射点源亚像元目标反射至光学遥感卫星的入瞳辐亮度,经遥感器光谱响应函数归一化得到等效辐亮度,联立亚像元目标响应值,以获取光学遥感卫星基于亚像元目标的在轨绝对辐射定标系数。

4 分析讨论

基于亚像元目标的光学遥感卫星在轨定标方法是将恒星法与反射率基法相结合的绝对辐射定标方法,作为参照的亚像元反射点源目标产生“类恒星”的辐射源,并以地面实际测量代替气溶胶散射假定,通过多能级梯度亚像元目标设置的宽动态参照将大气程辐射与地-气耦合及暗电流等背景辐射响应分离,进而简化辐射传输计算,降低定标场对背景的要求,以实现高分辨率光学遥感卫星全动态范围的高精度定标。利用布设的多种反射率的灰阶靶标对基于亚像元目标的定标结果进行验证,并分析其不确定度。

4.1 不确定度分析

光学遥感卫星基于亚像元目标的在轨定标方法的不确定度主要来源于作为亚像元目标的点源反射率、大气特性参数、系统 PSF 等,另外大气外太阳常数、遥感器地面采样间隔等也会引入辐射定标误差。亚像元目标的镜面反射率可以在实验室里利用专用测试系统进行高精度检测得到。在保持镜面清洁的情况下,外场实验时反射点源的镜面反射率不会发生变化,统计分析得到亚像元目标反射率的实验室测量精度优于 2%,利用太阳光度计(CE318)测量得到大气光学厚度参数的精度约 1%。系统 PSF 可以通过现场布设非整像素间隔的 3×3 阵列循环矩阵

来进行高精度在轨检测,并依据参数化高斯模型拟合结果提取亚像元目标响应值区域(5 pixel×5 pixel),数值分析得出该部分引入的误差约 1%。另外,吸收气体透过率主要受氧气、水汽等吸收气体的影响,需要根据定标场区海拔、气象等参数来选择合适的大气模式与气溶胶模型。在可见、近红外谱段,气体吸收透过率的辐射传输计算误差约为 1%,太阳常数即大气外太阳光谱辐照度由国际上多国科学家对多年观测结果进行统计比对得到,其精度优于 1%。综上所述,基于亚像元目标的辐射定标不确定度分析结果如表 1 所示,综合定标精度优于 3.2%。光学遥感卫星基于亚像元参照目标的在轨定标方法以地面实测数据为主,通过多级反射能量梯度目标设置,简化辐射传输计算,降低气溶胶散射假设及邻近效应的影响,提高光学遥感卫星传感器的辐射定标精度。

表 1 不确定度分析

Table 1 Analysis on uncertainty

Uncertainty source	Uncertainty contribution / %
Reflectance of sub-pixel target	2.0
Atmospheric optical depth	1.0
System point spread factor	1.0
Sun-path transmittance	1.0
Sensor-path transmittance	1.0
Sensor's ground sample distance	0.5
Solar irradiance	1.0
Site test error	0.5
Others (spectral, geometrical)	0.5
Total uncertainty	3.2

4.2 定标系数对比

采用定标场区布设的大面积多反射率灰阶靶

标为参照目标,结合同步观测的反射率以及光学厚度参数,利用灰阶靶标遥感影像计数及其反射率进行线性拟合,扣除程辐射与环境辐射及暗电流等背景辐射的影响,通过辐射传输计算获得太阳入射与遥感器观测方向的大气透过率以及光学遥感卫星的入瞳辐亮度,进而与灰阶靶标响应值相比较得到辐射定标系数^[20,26],如图6所示。高分辨率光学遥感卫星基于亚像元目标的在轨绝对辐射定标结果为4.45,基于灰阶靶标的定标结果

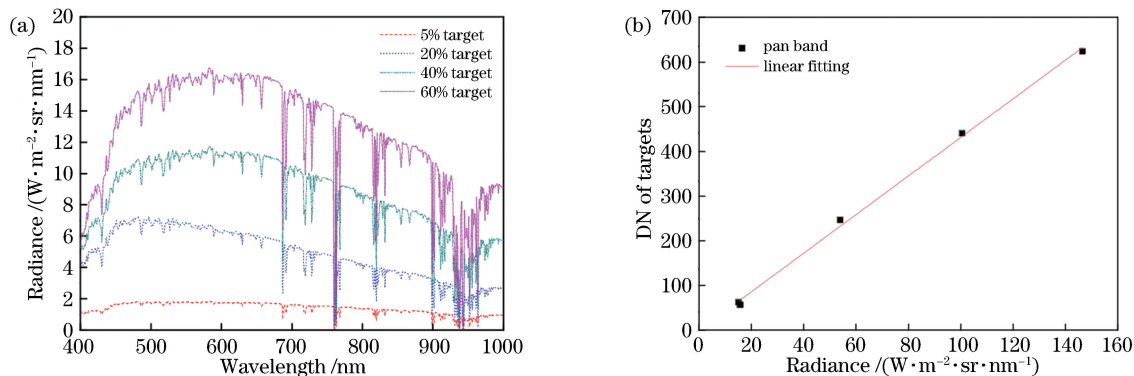


图6 灰阶靶标法。(a)入瞳辐亮度;(b)定标系数

Fig. 6 Gray-scale target method. (a) Incident pupil radiance; (b) calibration coefficient

4.3 动态范围定标

基于亚像元目标的高分辨率光学遥感卫星在轨绝对辐射定标方法以反射点源作为检测参照目标。因反射点源具有极小的空间尺寸和极高的辐射亮度,所以光学遥感卫星对其成像不饱和。因此,可以根据遥感器的动态范围,设置多种反射能量梯度等级,并对光学遥感卫星进行全动态范围定标,避免单点(辐射校正场)辐亮度定标,提高绝对辐射定标精度。利用多种反射能量梯度等级的亚像元目标可以通过线性回归法将亚像元目标辐射能量与程辐射、地-气耦合、环境等背景辐射相分离,降低大气与背景环境影响,同时还能够对遥感器的动态范围或响应线性进行在轨检测,这种“小”而“亮”的亚像元目标应用有利于减小邻近效应,简化定标流程并提高在轨定标精度。作为亚像元参照目标的反射点源的镜面反射率在太阳反射波段至中波红外与热红外波段具有较好的光谱平坦性,反射率均优于80%,经初步的遥感器入瞳能量估算,发现经亚像元目标反射至高分辨率光学遥感卫星的入瞳辐亮度在全谱段范围内均位于遥感器的动态范围内,且可以根据辐射定标需求设置多个不同的反射能量梯度等级,有望在全谱段范围(太阳反射波段至中波红外与热红外波段)内实现高分辨率光学遥感卫星全动态范围

为4.32,两者相差0.13,全色通道基于亚像元目标的在轨定标系数与基于灰阶靶标的定标系数相差3%,一致性较好。作为亚像元参照目标的反射点源具有自动化程度高、轻量化、小型化的结构特点,可以在大面积辐射校正场中突破时空及天气条件限制,实现光学遥感卫星全动态范围的移动定标,在对大面积多种反射率的灰阶靶标进行定标时便携且易展开,能够在相对复杂背景条件下实现光学遥感卫星的高频次定标。

的在轨定标。

5 结 论

高分辨率光学遥感卫星基于亚像元目标的在轨定标方法以轻小型的反射点源作为检测参照目标,将反射率的现场跑点测量转换为实验室测量,并以大气特性参数的地面同步观测为主,简化辐射传输计算(主要是吸收气体透过率),获取遥感器入瞳辐亮度。根据光学遥感卫星动态范围内多能量梯度等级目标设置及其遥感影像结果,并利用线性回归分离亚像元目标响应与背景辐射(程辐射、地-气耦合背景辐射、传感器暗电流等)响应,进而获取光学遥感卫星的定标系数。实验结果表明,高分辨率光学遥感卫星基于亚像元目标的在轨定标结果与基于大面积多反射率灰阶靶标的定标结果相差3%,不确定度分析表明该方法的在轨绝对定标精度优于3.2%。作为亚像元目标的反射点源,相对大面积辐射校正场或多反射率人工靶标参照,具有自动化程度高、轻量化、小型化的结构特点,便携且易展开,目标光学特性优异,大大地降低了光学遥感卫星入瞳辐亮度计算误差,该方法能够在相对复杂环境条件下实现光学遥感卫星全动态范围的高精度定标。

参 考 文 献

- [1] Zheng X B. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 36-43.
郑小兵. 高精度卫星光学遥感器辐射定标技术[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(5): 36-43.
- [2] Zheng X B. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites [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.
- [3] Liang S L. Quantitative remote sensing of land surfaces [M]. Fan W J, 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.
- [4] Gao H L, Gu X F, Yu T, *et al.* The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors[J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(4): 117-128.
高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展[J]. *遥感信息*, 2010, 25(4): 117-128.
- [5] Wang M, He M Y, Zhang S P, *et al.* Calibration methods of visible-near infrared channel-type satellite radiometric sensor[J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(1): 114-120.
王敏, 何明元, 张水平, 等. 通道式可见光近红外卫星遥感器辐射定标方法综述[J]. *遥感信息*, 2014, 29(1): 114-120.
- [6] Han Q J, Pan Z Q, Wang A C. 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.
- [7] Qiao Y L, Zheng X B, Wang X H, *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.
- [8] Chen L, Xu N, Hu X Q, *et al.* Study on orbit radiometric calibration for FY-2 visible band based on deep convective cloud[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(8): 2639-2645.
陈林, 徐娜, 胡秀清, 等. 基于深对流云目标的风云二号可见光通道辐射定标[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(8): 2639-2645.
- [9] Han Q J, Ma L L, Liu L, *et al.* On-orbit calibration and evaluation of GF-2 satellite based on wide dynamic ground target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0728003.
韩启金, 马灵玲, 刘李, 等. 基于宽动态地面目标的高分二号卫星在轨定标与评价[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0728003.
- [10] Slater P N, Biggar S F, Palmer J M, *et al.* Unified approach to pre- and in-flight satellite-sensor absolute radiometric calibration [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2583: 130-141.
- [11] 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.
- [12] Teillet P M, Thome K J, Fox N P, *et al.* Earth observation sensor calibration using a global instrumented and automated network of test sites (GIANTS) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4540: 246-254.
- [13] Gao H 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.
- [14] Fu Q Y, Min X J, Li X C, *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.
- [15] Liu L, Zhang X W, Han Q J, *et al.* In-orbit radiometric performance change monitoring of ZY-3 MUX camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(4): 90-95.
刘李, 张学文, 韩启金, 等. “资源三号”卫星多光谱相机在轨辐射性能变化监测[J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(4): 90-95.
- [16] Zhang X W, Fu Q Y, Han Q J, *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.
- [17] Xu W W, Zhang L M, Yang B Y, *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.
- [18] Huang H L, Yi W N, Qiao Y L, *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.
- [19] Du L L, Yi W N, Wang Y, *et al.* Multi-sensor cooperative radiometric calibration method of Mapping Satellite-1[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0401001.
- 杜丽丽, 易维宁, 王昱, 等. 天绘一号卫星多传感器协同辐射定标方法[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0401001.
- [20] Han Q J, Fu Q Y, Pan Z Q, *et al.* Absolute radiometric calibration and validation analysis of ZY-3 using artificial targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(s1): 167-173.
- 韩启金, 傅俏燕, 潘志强, 等. 资源三号卫星靶标法绝对辐射定标与验证分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(s1): 167-173.
- [21] Stephen J S. Specular array for radiometric calibration and method: US8158929[P]. 2012-04-17. [2019-01-30]. <https://patents.google.com/patent/US8158929B2/en>.
- [22] Bowen H S. Absolute radiometric calibration of the IKONOS sensor using radio-metrically characterized stellar sources [C]//Pecora 15/L and Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings, November 10-15, 2002, Denver, USA. [S.l.: s.n.], 2002: 1-7.
- [23] Bowen H S, Dial G. IKONOS calculation of MTF using stellar images [OL]. (2002-03-26) [2019-01-03]. <http://calval.cr.usgs.gov/wordpress/wp-content/uploads/21Bowen.pdf>.
- [24] Xu W W, Zhang L M, Shen Z G, *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.
- [25] Xu W W, Zhang L M, Si X L, *et al.* On-orbit modulation transfer function detection of high resolution optical satellite sensor based on reflected point sources[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0728001.
- 徐伟伟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨调制传递函数检测[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0728001.
- [26] Xu W W, Zhang L M, Li X, *et al.* On-orbit absolute radiometric calibration of high resolution satellite optical sensor based on gray-scale targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 0417005.
- 徐伟伟, 张黎明, 李鑫, 等. 基于灰阶靶标的高分辨率光学卫星传感器在轨绝对辐射定标[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 0417005.