

基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标

徐伟伟^{1,2*}, 张黎明^{1,2}, 李鑫^{1,2}, 杨宝云^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 针对场地辐射定标方法难以覆盖传感器动态范围的问题, 提出基于多种反射率呈线性的宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标方法。以地面同步的实际测量代替气溶胶散射特性假设, 采用线性回归法分离宽动态目标反射辐射与程辐射、地-气耦合辐射及暗电流等背景辐射, 在简化辐射传输计算的同时降低对背景环境的要求, 实现星载高分辨率传感器全动态范围定标与响应线性检测。试验结果表明: 光学卫星相机基于宽动态目标的在轨辐射定标方法的不确定度小于3.6%, 与反射率基法定标结果之间的差异小于5.5%, 反演的地物反射率及辐亮度与实测值之间的误差均小于6%, 验证了在轨辐射定标方法的有效性, 该方法可以满足复杂环境条件下高精度在轨定标的应用需求。

关键词 遥感; 辐射定标; 宽动态目标; 漫射辐射/总辐射比

中图分类号 O435; TP79

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1028004

On-Orbit Radiometric Calibration of High-Resolution Optical Satellite Camera Based on Wide Dynamic Targets

Xu Weiwei^{1,2*}, Zhang Liming^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Yang Baoyun^{1,2}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Aiming at site radiometric calibration is difficult to cover the dynamic range of the remote sensor, an on-orbit calibration method for high-resolution optical satellite camera is presented using wide dynamic targets with multiple linear reflectance (WDTMLR). It replaces the assumption of aerosol scattering characteristics with the actual measurement of ground synchronization. At the same time, the WDTMLR approach could isolate the response of wide dynamic targets from the response produced by sky path radiance, ground-atmospheric coupled radiance and dark current by using linear regression method, which simplifies radiometric transfer calculation and reduces the requirement of background. The WDTMLR method can achieve full dynamic calibration and linear measurement of spaceborne high-resolution remote sensing sensor. Results show that the uncertainty of the calibration approach is less than 3.6%. The difference in calibration coefficient between the WDTMLR method and the reflectance-based method is less than 5.5%. Moreover, the difference between the reflectivity and radiance of ground object obtained by the satellite sensor and that of field measured value is less than 6%, which demonstrate the effectiveness of on-orbit radiometric calibration. The WDTMLR method can satisfy with the application requirements for high-precision on-orbit calibration in complex environmental conditions.

Key words remote sensing; radiometric calibration; wide dynamic targets; diffuse-to-global ratio

OCIS codes 110.3000; 110.4850; 280.0280

1 引言

遥感信息定量化应用对于我国的经济高速发

展、生态环境保护、自然资源调查、应急管理决策、减灾防灾与国防安全等具有不可替代的重要作用。近年来,我国相继实施了高分专项与空间基础设施建

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-04-29; 录用日期: 2019-06-27

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

设等,发射了多颗高空间分辨率光学遥感卫星(或星座),遥感数据在国民经济建设与信息安全等领域都发挥了关键性作用。辐射定标技术是实现卫星遥感数据定量化的必要环节和基础,提高其定标精度与稳定性,对于充分发挥高分辨率卫星的综合效能,提高卫星遥感定量化应用水平具有重要意义^[1-3]。

辐射定标就是将光学卫星相机以数字化方式记录的观测值转换为所观测目标的辐射量值(辐亮度或反射率),光学遥感卫星全寿命期定标体系主要由发射前实验室定标与在轨定标组成。实验室定标可以模拟遥感器在空间运行环境下最完备的定标与性能测试,并建立遥感器的辐射响应模型,但由于卫星发射(冲击、振动、加速度)、空间运行环境(紫外辐射、粒子轰击、原子氧)、成像系统(透射系数、光谱响应)、元器件老化(电子学、探测器)等诸多因素影响,光学卫星相机性能可能发生衰变,因此有必要进行定期或不定期的在轨定标^[4-7]。没有高精度的定标,同一颗卫星不同时相或不同卫星(星座)获取的遥感数据就无法相互比较,高精度、高频次、业务化的在轨辐射定标贯穿于从卫星研制到运行终止的全寿命期,星载遥感器的在轨定标主要由星上定标、交叉定标和替代定标构成。星上定标无论是采用内置标准灯与积分球,还是太阳漫射板的方法,都是将实验室辐射基准作为参考,存在向国际单位溯源这一难题,且无法对卫星发射过程中的冲击和加速度等实行有效监测。交叉定标精度首先取决于参考遥感器自身的定标精度,而且还受对定标参照目标区域观测的同时性、方向性及观测波段一致性等影响。业务化遥感卫星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、干湖床、戈壁、深对流云、冰雪等目标的定标方法,并已成功应用于LANDSAT、The Systeme Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT)、Chinese Meteorological Feng-Yun Satellite (FY)、China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS) 和 Zi-Yuan Satellite(ZY)等系列卫星的在轨辐射定标,且均取得良好的应用效果^[8-16]。例如我国的敦煌辐射校正场在定期评价遥感器性能与定标方面发挥了关键性作用。基于辐射校正场的反射率基法或辐射度基法都是一种单点(辐亮度)定标方法,对场地反射率要求较高,当反射率较低时,需要通过外推法来得到高于场地反射率的辐亮度;当反射率较高时,则需要通过内插法来得到未知辐射量,因此敦煌辐射校正场反射率偏低是影响其辐射定标精度的重要因

素。目前,上述定标方法的在轨定标精度为5%~8%,难以实现光学卫星相机全动态范围定标^[17-19]。针对近年来快速发展的高空间分辨率光学卫星,国内外采用灰阶靶标对高分辨率光学卫星相机进行在轨绝对辐射定标与真实性检验等,但采用的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将自然均匀目标替换为人工靶标,仍需要定标场区气溶胶散射特性假设,在复杂背景环境条件下难与实际情况相符^[20-22]。

本文提出一种在相同大气背景条件下基于宽动态目标的高精度定标方法,即在对地观测的高分辨率光学遥感器的动态范围内设置光学特性优异、参照包含少量高反射率目标的多种宽动态目标,以提高高分辨率光学卫星相机的在轨绝对辐射定标精度。

基于宽动态目标的在轨辐射定标是以反射率为5%、20%、40%、60%的靶标为检测参照目标,并以地面准同步的实际测量代替气溶胶散射特性假设,辅以简化的辐射传输计算,以实现高分辨率光学卫星相机全动态范围内的高精度定标。在介绍该定标原理的基础上,利用在轨试验所获取的资源三号遥感影像,对其数据处理方法、定标结果及不确定度进行了分析讨论。

2 基本原理

对地观测卫星遥感中,航天光学遥感器接收的入瞳辐亮度是太阳辐射、地球周围大气及地物目标间辐射传输的结果,如图1所示。根据辐射传输理论及平面平行大气假设,太阳反射波段主要由程辐射、目标反射辐射与地气耦合辐射等部分组成。

对于非均匀地物目标(宽动态反射率靶标),需

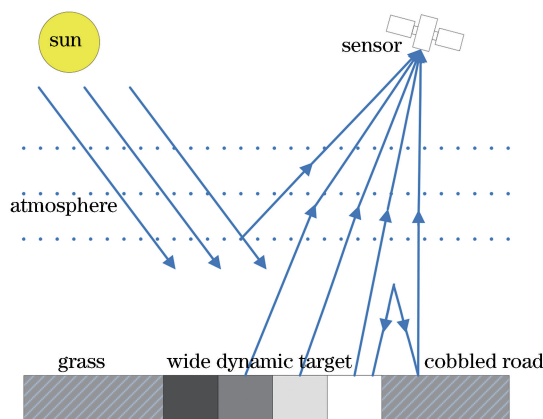


图1 太阳、大气、地表间辐射传输示意图

Fig. 1 Schematic of radiative transfer for sun, atmospheric and the earth's surfaces

要考虑靶标反射率及背景反射率,因此光学卫星相机的入瞳辐亮度可表示为

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

式中: $\frac{E_s \mu_s [\exp(-\tau/\mu_s) + t_d(\theta_s)]}{1 - S\rho_e} = \frac{E_s \mu_s \exp(-\tau/\mu_s)}{1 - \alpha(\theta_s)}$, $\alpha(\theta_s)$ 是漫射辐射/总辐射比; L_a 是大气程辐射; E_s 是太阳常数; μ_s 是太阳天顶角 θ_s 的余弦因子; T_{gas} 是大气吸收透过率; τ 是大气光学厚度; $t_d(\theta_s)$ 是大气散射透过率; S 是大气球面反照率; ρ_e 是背景反射率; ρ_t 是宽动态目标反射率; μ_v 是卫星观测天顶角的余弦因子; θ_v 是卫星观测天顶角; $t'_d(\theta_v)$ 是散射透过率。

宽动态反射率靶标布设场区背景环境均匀且辐射特性单一,背景反射率可以看作是常数,则定标场区的地面总照度保持不变,反射率靶标目标上空的程辐射与地气耦合辐射相同。通过引入漫射辐射/总辐射比来表征光学卫星相机定标场区的大气散射,则入瞳辐亮度可化简为

$$L = L_a + \frac{E_s \mu_s T_{\text{gas}}}{\pi} \frac{\exp(-\tau/\mu_s - \tau/\mu_v)}{1 - \alpha(\theta_s)} \rho_t + L_{a-g}, \quad (2)$$

式中: L_{a-g} 是地-气耦合辐射。

由此可知,宽动态目标(多种反射率靶标)反射至星载遥感器的入瞳辐亮度与目标反射率成正比,因此根据遥感器的动态范围,可以在一种大气背景条件下,设置多种不同反射率的地面检测参照,如反射率分别为 5%、20%、40% 与 60% 的线性目标,进而在数据处理中将传感器入瞳辐亮度或响应值与参照目标反射率进行线性拟合,扣除大气程辐射与地-气耦合辐射等的影响,提高光学遥感卫星在轨定标精度。结合在轨检测试验时地面同步测量的反射率、大气光学特性及气象参数等,采用简化辐射传输(大气吸收透过率部分)计算可得宽动态反射率靶标的入瞳辐亮度,进而根据遥感器的动态范围设计实验室的定标结果,预估遥感器的辐射响应及线性特性,以评价其辐射响应特性。

光学卫星相机的辐射定标方程为

$$D_N = AL(\rho_t) + D_{N_0} + D'_{N_0}, \quad (3)$$

式中: $L(\rho_t) = \int \frac{E_s \mu_s T_{\text{gas}} \exp(-\tau/\mu_s - \tau/\mu_v) \rho_t R(\lambda) d\lambda}{\pi[1 - \alpha(\theta_s)]}$ $\int R(\lambda) d\lambda$; $R(\lambda)$ 是遥感器的光谱响应函数; λ 是波

长; A 是定标系数; D_N 是遥感影像响应值; D_{N_0} 是传感器对程辐射及地-气耦合辐射响应值; D'_{N_0} 是暗电流。

根据(3)式可知,光学卫星相机对宽动态目标的响应值与其反射率成正比,对地面同步(或准同步)测量的宽动态目标反射率与遥感影像响应值进行线性回归,可将宽动态目标辐射响应与程辐射、地-气耦合及暗电流等背景辐射响应分离。将分离的宽动态目标辐射响应值与简化辐射传输计算的经宽动态目标反射至遥感器的入瞳辐亮度相结合,经线性拟合就可得在轨辐射定标系数。

3 试验与数据处理

高分辨率资源三号光学卫星共搭载四台光学相机,其中三台全色相机按照前视、正视和后视(分别以 FWD、NAD 与 BWD 表示)设计安装构成三线阵立体相机,完成立体测绘功能;另一台多光谱相机包含蓝、绿、红和近红外四个谱段(分别以 B1、B2、B3 与 B4 表示),用于与正视全色影像的融合和地物判读解译。2012 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开展了资源三号卫星传感器基于宽动态目标的在轨辐射定标与性能检测试验,如图 2 所示。在定标场区域布设大面积的宽动态反射率靶标与刃边靶标,并于卫星过顶时采集目标与场区背景反射率及大气特性参数等信息。

3.1 地面测试数据

根据卫星轨道预报参数,在卫星过顶宽动态目标布设场前后 0.5 h 采用地物光谱仪(ASD)对目标及场区背景反射率进行准同步测量,通过对比法及多点统计法计算目标反射率,结果如图 3(a)所示,在可见-近红外波段范围内具有良好的光谱平坦性及线性特性,有利于在轨定标精度的提高。利用光谱照度计(VIF981)与太阳光度计(CE-318)测量到达地面的漫射辐射/总辐射比与太阳直射辐射,并采用 Langley 法反演定标场区大气光学厚度及透过率,以及吸收气体如臭氧、水汽等的透过率。根据定标场区海拔与气象信息等,选择合适的大气模式通过辐射传输计算得到太阳-宽动态目标路径的高光谱大气透过率,如图 3(b)所示,太阳-宽动态目标路径的高光谱大气透过率逼近太阳光度计测量的通道透过率,改变观测几何因子即可得高分辨率光学卫星相机观测宽动态目标路径的大气透过率。



图 2 宽动态目标及遥感影像

Fig. 2 Wide dynamic targets and remote sensing image

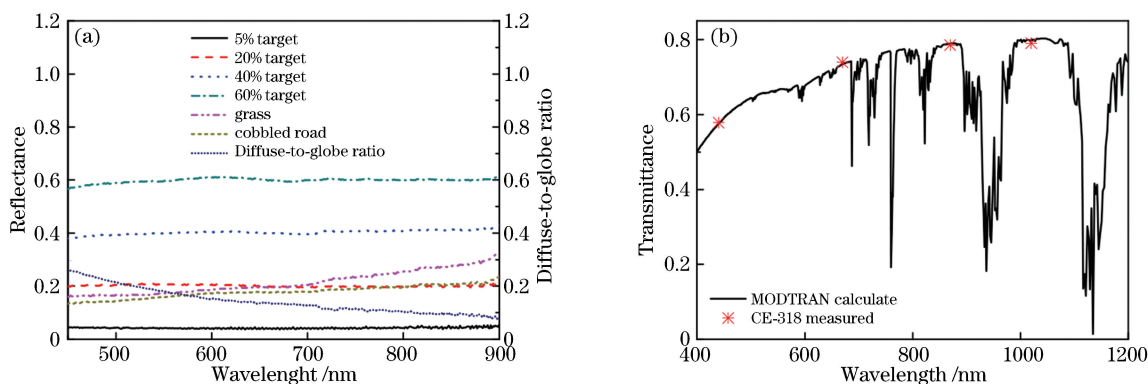


图 3 地面测试数据。(a)目标反射率;(b)大气参数

Fig. 3 Field measurement data. (a) Targets' reflectance; (b) atmospheric parameters

3.2 目标背景分离

利用光学卫星相机的光谱响应函数对地面准同步测量的目标反射率进行归一化处理可得宽动态目标的等效反射率,将其与遥感影像响应值进行线性回归,图 4 为传感器响应值与目标反射率的关系曲线,截距表示地面参照目标反射率为零时遥感器的响应值即为程辐射与地-气耦合辐射响应值及暗电流。根据(2)式与(3)式可知斜率表示光学遥感卫星各通道的反射率响应系数,且在遥感器动态范围内设置的线性目标的响应值也呈线性分布,表明遥感器成像系统是线性位移不变系统,可进行线性定标。若已知暗电流或通过冷空(深空)观测,可进一步求得光学卫星相机对程辐射及地-气耦合辐射等背景响应值,即截距值减去暗电流;同时宽动态目标的影像响应值减去截距值即为宽动态目标反射辐射响应值,结合其反射至光学卫星相机的等效入瞳辐亮度可得定标系数。宽动态目标等效反射率与遥感影像响应值线性拟合的相关系数均优于 0.999,表明在轨辐射定标与性能检测设置的宽动态目标参照均在其动态范围内,光学卫星相机具有良好的响应线性。

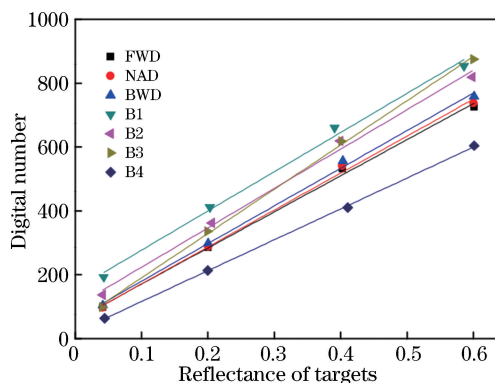


图 4 传感器响应值与目标反射率关系图

Fig. 4 Relationship of sensor's response and target reflectance

3.3 辐射定标系数

结合地面准同步测量的宽动态目标反射率、大气透过率、漫射辐射/总辐射比、气象参数等,以及大气外太阳常数,根据(2)式可得卫星过顶时刻地面总照度,进而求得宽动态目标反射至遥感器的入瞳辐亮度,将其对光学卫星相机的光谱响应函数归一化就可得等效辐亮度。利用最小二乘法对宽动态目标响应值与计算的等效入瞳辐亮度进行线性拟合,以

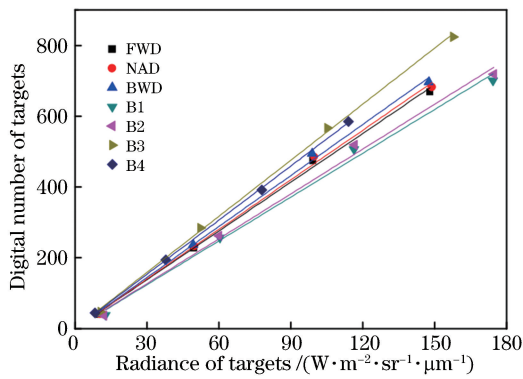


图 5 定标系数

Fig. 5 Calibration coefficient

得光学卫星相机的在轨辐射定标系数,如图 5 所示。由于经过了目标背景分离,扣除了程辐射与地-气耦合辐射响应值及暗电流的影响,截距基本为零且可忽略不计,线性拟合的相关系数均优于 0.999,相应的斜率表示各相机通道的辐亮度定标系数。相对于辐射校正场(如白沙场、敦煌场等),宽动态目标能够

对传感器进行全动态范围定标,不仅突破了时空限制,还以地面实际测量代替气溶胶散射特性假设,并将目标反射辐射与程辐射、地-气耦合辐射及暗电流等响应分离,简化了辐射传输计算与定标流程,提高了定标效率与精度。

3.4 定标结果检验

为对光学卫星相机在轨辐射定标结果进行检验,选取了定标场区中宽动态目标附近的典型地物目标——草地与石子路,利用计算得到的定标系数、卫星遥感影像数据及定标场区的大气参数,对典型地物目标进行反射率与辐亮度反演,并将反演结果分别与实测结果及辐射传输计算结果进行比较,结果如表 1 所示。除石子路反演反射率与实测反射率在第二通道差异 5.55%外,其余的目标反射率差异均小于 5%;除石子路的反演辐亮度与实测辐亮度在第二通道差异 5.52%外,其余的目标辐亮度差异均小于 5%,验证了光学卫星相机基于宽动态目标的在轨辐射定标结果的有效性。

表 1 典型地物反演结果

Table 1 Results of typical ground object inversion

Ground object	Parameter	FWD	NAD	BWD	B1	B2	B3	B4	
Grass	Reflectance	Measured	0.2079	0.2069	0.2086	0.1654	0.1735	0.1990	0.2665
		Retrieved	0.2013	0.1968	0.2002	0.1587	0.1654	0.1922	0.2538
		Relative error /%	-3.21	-4.87	-4.02	-4.05	-4.67	-3.38	-4.76
	Radiance / ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	Measured	50.2786	50.3231	50.2757	49.1925	50.6237	51.7993	50.1139
		Retrieved	49.5690	48.7778	49.1658	47.2256	48.2832	50.5055	48.1519
		Relative error /%	-1.41	-3.07	-2.21	-4.00	-4.62	-2.50	-3.92
Cobbled road	Reflectance	Measured	0.1792	0.1785	0.1795	0.1428	0.1595	0.1783	0.2037
		Retrieved	0.1783	0.1739	0.1722	0.1387	0.1506	0.1712	0.1951
		Relative error /%	-0.53	-2.56	-4.06	-2.84	-5.55	-4.01	-4.22
	Radiance / ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	Measured	43.7215	43.8044	43.6506	42.4645	46.5339	46.6222	38.4315
		Retrieved	43.9039	43.1117	42.2839	41.2803	43.9670	44.9720	37.0112
		Relative error /%	0.42	-1.58	-3.13	-2.79	-5.52	-3.54	-3.70

4 分析讨论

将定标结果与反射率基法定标结果相比较,并对基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机定标进行不确定度分析,进一步验证该定标方法的有效性。

4.1 定标系数对比

反射率基法以大面积辐射校正场作为观测目标,并通过地面准同步测量场地反射率与大气光学特性参数等,利用辐射传输计算星载传感器入瞳辐

亮度,将其对光学卫星相机光谱响应函数进行归一化处理得到等效辐亮度,进而与场地遥感影像计数依据定标方程得到定标系数^[19,22-23]。基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机的在轨辐射定标结果与反射率基法定标结果如表 2 所示,遥感器定标系数差异均优于 5.5%,其中第四波段差异最小仅为 0.92%,第三波段差异最大达到 5.39%,进一步验证了高分辨率光学卫星相机基于宽动态目标的在轨辐射定标方法的可行性与有效性。相对于大面积辐射

校正场的反射率基法,该定标方法不仅能降低对场地背景环境的要求,还能够突破时空限制,在复杂的背景环境下实现光学卫星相机全动态范围内的高精度移动定标。

4.2 不确定度分析

基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标方法的不确定度主要来源于宽动态目标反射率与大气光学特性(漫射辐射/总辐射比、光学厚度、透过率)的现场测量误差,另外,太阳常数、大气模式等因素也会引入一定的定标误差。宽动态目标反射率测量采用比对法与统计法相结合,误差由作为标准传递的漫射板实验室定标精度、天空漫射辐

射修正与遮挡误差等组成,其中的漫射板实验室定标精度为2%,天空漫射修正引入的误差约为1%;漫射辐射/总辐射比的测量采用遮挡法,天空漫射测量时,遮挡太阳直射的同时也会遮挡部分漫射辐射,统计分析得测量误差约2%;采用经定标的太阳光度计测量大气光学厚度误差约1%,吸收透过率主要受水汽、氧气等特征吸收气体影响,可根据定标场区海拔与气象信息及环境等因素,选择合适的大气模式计算获得可见-近红外波段的吸收透过率误差约为1%。高分辨率光学卫星相机基于宽动态目标的在轨辐射定标方法的不确定度分析结果如表3所示,综合不确定度优于3.6%。

表2 定标系数比较

Table 2 Comparison of calibration coefficient

Sensor band	FWD	NAD	BWD	B1	B2	B3	B4
Calibration coefficient obtained with our method / ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	4.5961	4.6710	4.8068	4.1284	4.2275	5.2825	5.1020
Calibration coefficient by test site / ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	4.4444	4.4425	4.9456	3.9604	4.4385	5.5835	5.1493
Relative error /%	3.41	5.14	-2.81	4.24	-4.75	-5.39	-0.92

表3 不确定度分析

Table 3 Uncertainty analysis

Uncertainty sources	Uncertainty contribution /%	
Solar irradiance	1.0	
Reflectance of wide dynamic targets	Diffuser panel calibration	2.0
	Sky diffuse correction	1.0
	Optical depth	1.0
Atmospheric	Transmittance	1.0
	Diffuse-to-global ratio	2.0
Site measurement error	0.5	
Geometrical factor and others	0.5	
Total uncertainty	3.6	

5 结 论

基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标方法以光学特性优异的多种反射率靶标作为检测参照目标,在半程辐照度基法的基础上,实现星载光学遥感器全动态范围定标与响应线性检测;以地面准同步实际测量的大气光学特性代替辐射传输计算中的气溶胶散射特性假设;通过宽动态目标反射率与其遥感影像响应值的线性回归,将背景辐射(程辐射与地-气耦合辐射及暗

电流等)扣除,以降低在轨辐射定标对试验场背景环境的要求。试验分析表明:基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标的综合不确定度优于3.6%,与大面积辐射校正场的反射率基法定标结果之间的差异小于5.5%。相对于大面积辐射校正场,宽动态目标法不仅能够突破时空与天气条件限制,避免单点辐亮度定标与暗电流或自身偏移量检测,还能够在复杂环境条件下,实现光学卫星相机在全动态范围内的高精度移动定标,简化定标流程的同时提高定标精度,对我国光

学卫星相机的辐射定标与遥感数据的定量化应用水平的提高具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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. 高精度卫星光学传感器辐射定标技术[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(5): 36-43.
- [3] 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.
- [4] 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传感器辐射定标方法综述[J]. *遥感信息*, 2014, 29(1): 114-120.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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. 星载光学传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.
- [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] Xu W W, Zhang L M, Chen H Y, *et al.* In-flight radiometric calibration of high resolution optical satellite sensor using reflected point sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0328001.
徐伟伟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 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[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0328001.
- [11] Wang L, Hu X Q, Chen L. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1911-1920.
王玲, 胡秀清, 陈林. 基于多种亮度稳定目标的 FY-3C/中分辨率光谱成像仪的反射太阳波段辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1911-1920.
- [12] Wang L, Hu X Q, Chen L. Wide dynamic nonlinear radiometric calibration of optical satellite sensors using multiple stable earth targets [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 892-906.
王玲, 胡秀清, 陈林. 多目标的卫星仪器宽动态非线性定标[J]. *遥感学报*, 2017, 21(6): 892-906.
- [13] 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.
- [14] Biggar S F. In-flight methods for satellite sensor absolute radiometric calibration [D]. Tucson: the University of Arizona, 1990.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Tang X M, Wang H Y, Zhu X Y. Technology and applications of surveying and mapping for ZY-3 satellites [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1482-1491.
- 唐新明, 王鸿燕, 祝小勇. 资源三号卫星测绘技术与应用 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1482-1491.