

基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究

徐伟伟 张黎明 杨本永 乔延利

(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)

摘要 辐射定标是光学遥感信息定量化的关键技术之一。随着高分辨光学遥感器定量化应用的发展, 在轨绝对辐射定标精度的要求也越来越高。提出了一种基于多灰阶靶标的在轨定标方法, 采用实际测量的漫射辐照度与总辐照度比来代替辐射传输计算的气溶胶散射, 同时布设高反射率靶标以提高辐射定标精度。初步试验结果表明, 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方法, 对假定的理论模型依赖较少, 能够实现全动态范围的高精度定标, 不确定度优于 4%, 而且满足复杂环境条件的应用要求。

关键词 遥感; 多灰阶靶标; 辐射定标; 漫射辐照度与总辐照度比; 高分辨遥感器

中图分类号 TP79; TP722.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0212007

On-Orbit Radiometric Calibration Based on Gray-Scale Tarps

Xu Weiwei Zhang Liming Yang Benyong Qiao Yanli

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

Abstract Radiometric calibration in-flight is one of critical techniques for information quantification of optical remote sensing. With the development of quantitative application of high spatial resolution satellite optical sensors, required precision on absolute radiometric calibration is asked higher and higher. A calibration method based on gray-scale tarps is presented. The measured ratio of diffusion to global irradiance substitutes the aerosol scatter computed by radiance transfer code. Besides high reflectance tarps are deployed to improve the accuracy of on-orbit radiometric calibration. Preliminary results show that in-flight absolute radiometric calibration using gray-scale tarps for high spatial resolution satellite sensors less depends on model assumption and could achieve high precision calibration at full dynamic range. The uncertainty is less than 4% and this approach can also satisfy the application demand to the complex environment.

Key words remote sensing; gray-scale tarps; radiometric calibration; diffuse-to-global ratio; high-spatial-resolution sensor
OCIS codes 120.0280; 280.4788; 010.0280

1 引 言

近年来, 世界各国相继开展高分辨率的空间对地观测计划, 为了保证测量结果的定量化水平和可利用价值, 对高空间分辨率光学卫星传感器的在轨绝对辐射定标精度已提出了越来越高的要求^[1]。绝对辐射定标旨在建立传感器测量的数字信号与对应的辐射能量之间的数量关系, 以将卫星图像数字值

转换为绝对物理量(辐射亮度/反射率), 确定一个能对地物做出直接判断和比对的标准, 进行遥感数据的定量化分析, 更好地识别地物^[2,3]。辐射定标是遥感信息定量化过程的关键技术之一。

光学卫星传感器在轨辐射定标的主要方法是反射率基法^[4~7], 该方法利用大面积均匀场, 同步测量地表反射率、大气消光特性及气象参数等。通过辐

收稿日期: 2011-07-18; 收到修改稿日期: 2011-09-30

基金项目: 中国科学院科技创新基金(CXJJ-11-S105)和中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金(083AG11144)资助课题。

作者简介: 徐伟伟(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光学遥感器在轨检测及成像质量分析等方面的研究。

E-mail: taiyu555532@gmail.com

导师简介: 张黎明(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感器辐射定标与标准传递等方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

射传输计算出卫星入瞳处的表观反射率或表观辐亮度,进而与卫星图像计数值相比较得出定标系数。反射率基法的重要误差来源于对气溶胶模型的假设,不同的气溶胶模型会对表观反射率的计算产生较大影响。为减小因气溶胶近似产生的系统误差,Slater等^[8]提出了辐照度基法(或称为改进的反射率基法)。与反射率基法的唯一不同是加入了漫射辐射与总辐射比的测量,该比值包含气溶胶的散射特性,以实际测量代替了对气溶胶所作的假设,因而减小了与之相关的误差。Thome^[9]的研究结果表明,辐照度基法比反射率基法有1.7%的改进精度。然而,反射率基法及辐照度基法是一种单点(一种辐亮度)定标方法,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,对场地的反射率要求较高。当场反射率较低时,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,因此基于大面积校正场的辐射定标对精度的影响很大。例如我国的敦煌辐射校正场,地表反射率较低,这是影响我国辐射定标水平的重要因素,目前在轨定标的精度为5%~8%,难以实现全动态范围的高精度定标^[2,10~12]。同时,基于大面积均匀场的辐射定标,容易受地理位置及天气状况等因素的限制,使得光学遥感器的定标周期长、机会少和效率低。因此,为提高我国在轨辐射定标水平,发展新型高精度定标方法成为迫切需要研究解决的重要课题。

针对高空间分辨率光学卫星传感器,采用少量的包括高反射率靶标在内的多种反射率灰阶是实现高精度定标的有效途径之一。人工靶标具有良好的光谱平坦性、朗伯性及均匀一致性等光学参照特性,同时能够突破场地、天气等限制因素,实现移动定标^[13]。本文利用2009年春季昆明试验测量数据,结合资源卫星(CBERS-02B)高分辨率(HR)相机的遥感图像,对基于多灰阶靶标的高空间分辨率光学卫星传感器在轨绝对辐射定标的方法进行探讨。

2 基本原理

太阳反射波段到达光学卫星传感器入瞳的辐射能量主要由以下几部分组成:1)太阳辐射中未到达地面经大气吸收和散射而到达传感器视场的辐射,即程辐射;2)太阳直射及天空漫射经大气到达地面,被多灰阶靶标反射后再经大气透过进入传感器视场的辐射,即靶标辐射;3)大气-背景经过单次及多次散射耦合产生的辐射,即地-气耦合辐射。太阳辐射

与大气及地面目标的相互作用如图1所示。

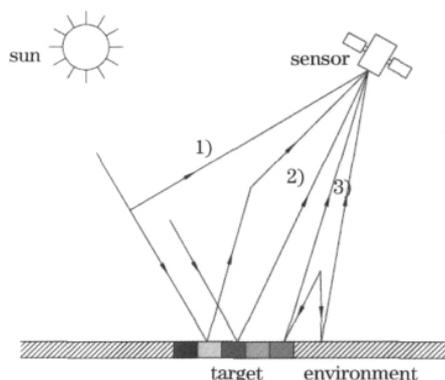


图1 太阳辐射、地面目标及传感器相互作用示意图
Fig. 1 Schematic diagram of interaction among sun, target and sensor

星载传感器入瞳辐亮度是大气程辐射、靶标辐射及地-气耦合辐射等三部分的合成^[14],在假定平面平行大气条件下,对于反射率均一的大面积均匀场(根据6S),入瞳辐亮度为

$$L = L_a + \frac{E_s \mu_s}{\pi} \frac{T(\theta_s) T(\theta_v)}{1 - S \rho} \rho, \quad (1)$$

式中 L_a 为大气程辐射, E_s 为大气外太阳辐照度, μ_s 为太阳天顶角 θ_s 的余弦因子, $T(\theta_s)$ 为向下的透过率, $T(\theta_v)$ 为向上的透过率, θ_v 为卫星观测天顶角, ρ 为均匀场反射率, S 为大气的球面反照率。

对于非均一的目标面(多灰阶靶标),需考虑多灰阶靶标反射率及其所在背景的反照率,故传感器入瞳辐亮度为

$$L = L_a + \frac{E_s \mu_s}{\pi} \frac{T(\theta_s)}{1 - S \rho_e} [\rho_t \exp(-\tau/\mu_v) + \rho_e t_d(\theta_v)], \quad (2)$$

式中 ρ_t 为灰阶靶标反射率, ρ_e 为背景反照率, τ 是大气光学厚度, μ_v 为卫星观测天顶角的余弦因子, $t_d(\theta_v)$ 为散射透过率。

大气程辐射及地-气耦合辐射在同一大气环境下为常量,其辐亮度综合设为 $L_{a,g}$,因此可将传感器入瞳所接收的靶标辐亮度简化为

$$L(\rho_t) = \frac{E_s \mu_s}{\pi} \frac{T(\theta_s)}{1 - S \rho_e} \rho_t \exp(-\tau/\mu_v). \quad (3)$$

对于大气散射,引入卫星过顶时刻的地面漫射辐照度/总辐照度之比 $\alpha(\theta_s) = E_{sky}/E_{total}$,有

$$\frac{E_s \mu_s T(\theta_s)}{1 - S \rho_e} = \frac{E_s \mu_s \exp(-\tau/\mu_s)}{1 - \alpha(\theta_s)} T_{gas}, \quad (4)$$

式中 T_{gas} 为大气特征吸收透过率,即太阳入射路径的大气特征吸收透过率与目标至卫星路径的大气特征吸收透过率之乘积。

将(4)式代入(3)式可得传感器入瞳辐亮度

$$L(\theta_s, \theta_v) = \frac{E_s \mu_s T_{\text{gas}}}{\pi} \frac{\exp(-\tau/\mu_s - \tau/\mu_v)}{1 - \alpha(\theta_s)} \rho_t + L_{\text{a.a.g.}} \quad (5)$$

由此可知, 传感器入瞳辐亮度与靶标反射率成正比, 根据传感器定标方程得

$$D_{N-t} = AL(\rho_t) + D_{N-0} + D_{N-t}^{\text{dark}}, \quad (6)$$

式中 D_{N-t} 为遥感影像响应值, A 为定标系数, D_{N-0} 为传感器对大气程辐射及地-气耦合辐射的响应值, D_{N-t}^{dark} 为暗电流。

因此, 通过测量靶标反射率、大气光学厚度、漫射辐射与总辐射比、气象参数及痕量气体常数(臭氧等), 根据(6)式, 基于多灰阶靶标反射率及其遥感图像计数值, 采用最小二乘法拟合可得到传感器响应与靶标反射率的关系, 进而求得传感器定标系数及截距值。若暗电流已知, 可进一步求得大气程辐射与地-气耦合辐射响应值。

3 地面同步测量

3.1 靶标反射率

根据卫星轨道预报参数, 在过顶前后半小时内, 对多灰阶靶标及背景反射率进行准同步测量。地面光谱测量仪器采用美国 ASD 公司研制生产的 Field Spec VNIR 型可见-近红外光谱辐射计, 并配有漫反射标准参考板, 试验前在中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室对其进行定标。对于大面积的多灰阶靶标, 通过多点测量统计平均的方法获取其反射率, 以保证试验数据能够反映多灰阶靶标的整体反射特性, 多灰阶靶标反射率如图 2 所示。

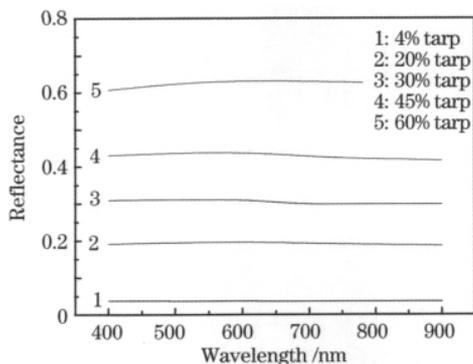


图 2 靶标反射率

Fig. 2 Reflectance of radiometric tarps

3.2 大气光学特性

同步测量当天进行大气消光和气象资料观测, 以获得试验场区上空大气总消光光学厚度、气溶胶

消光光学厚度、臭氧和水汽含量等参数。采用法国生产的 CIMEL-317 型手动太阳辐射计对太阳直射辐射进行测量, 利用 Langley 法得到总大气光学厚度^[15]。利用当地气压测值计算出瑞利散射光学厚度, 然后从总光学厚度中分离出气溶胶消光光学厚度, 结合收集的气象资料及环境参数, 选择合适的大气模式, 利用辐射传输计算得大气吸收透过率。同时采用积分球照度计和光谱辐射计结合漫反射标准参考板的方法对漫射辐照度/总辐照度比进行测量^[11,16,17], 过顶时刻的漫总比如图 3 所示, 漫总比反映大气中的散射情况, 比值越大, 表明大气散射越强。将测量的漫总比与太阳辐射计测量的气溶胶光学厚度比较, 大小变化规律完全一致。

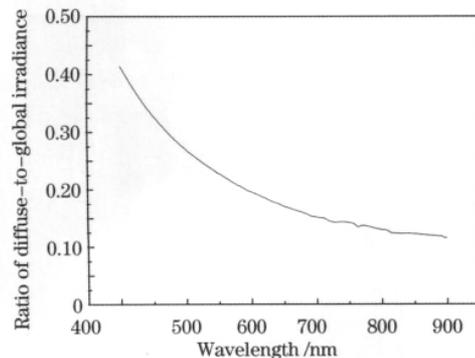


图 3 漫射辐照度与总辐照度比

Fig. 3 Spectral ratio of diffuse to global irradiance

4 结果及误差分析

根据靶标反射率及其高分辨率遥感影像, 通过最小二乘法拟合可得到传感器响应与多灰阶靶标反射率的关系曲线, 如图 4(b) 所示。若已知传感器暗电流或者通过冷空测量, 可进一步求得传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。相对大面积辐射校正场(如白沙场、敦煌场等), 多灰阶靶标能够在全动态范围内对高分辨率遥感器进行在轨绝对辐射定标, 能更真实地反映星载光学传感器的线性特性。同时基于多灰阶靶标的定标方法对环境要求不高, 不依赖大面积均匀场, 可在较复杂环境条件下进行光学卫星传感器的在轨定标和真实性检验。

基于多灰阶靶标的高分辨光学遥感器在轨绝对辐射定标的误差主要来源于靶标反射率、漫射辐照度与总辐照度比、大气光学特性测量等。多灰阶靶标反射率的测量采用与反射率基法中相同的测量方法, 其误差主要是由漫反射板的定标精度及场地测

量误差组成,其中漫射板反射率定标精度约为 2%。漫总比测量时,在遮挡太阳直射部分的同时也挡掉部分漫射辐射,由遮挡板面积及其与漫射板间的距离,可估算该遮挡立体角约占天空漫射的 0.4%,同时考虑到气溶胶散射前向较强,因此遮挡部分对定标结果引入约 2.5%的误差,另外天空漫射辐射的非均匀性也会引入约 1.5%的误差。光学厚度由定标的太阳辐射计测量,其误差约为 1%。在可见-近红外波段,大气吸收透过率主要受氧气、臭氧等特征吸收气体的影响,需根据试验场区海拔高度、气象资料及环境等因素,选择合适的大气模式,通过计算得到,其中氧气吸收可以精确计算,虽然臭氧的浓度估计可能存在误差,但是在该波段它是弱吸收,故综合

考虑大气吸收引入约 0.5%的误差。根据以上分析,该定标方法的总合成不确定度小于 4%,具体如表 1 所示。针对上述误差分析,为进一步提高在轨辐射定标精度,可通过选择合适的外场试验条件,如大气干洁、海拔较高、背景反射率低的大面积均匀场等,有效降低大气吸收及背景辐射等因素的影响;利用高光谱太阳辐射计测量直射辐射,以降低大气参数获取误差;同时尽可能保证实验设备操作及数据获取的规范性,以减小主观因素引入的测量误差。另外,可借助更加先进的定标技术来提高漫反射标准参考板的定标精度等措施,进而提高基于多灰阶靶标的高分辨遥感器在轨绝对辐射定标精度。

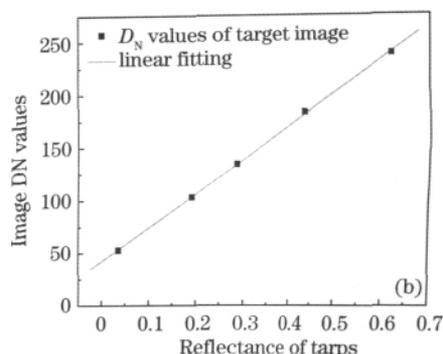
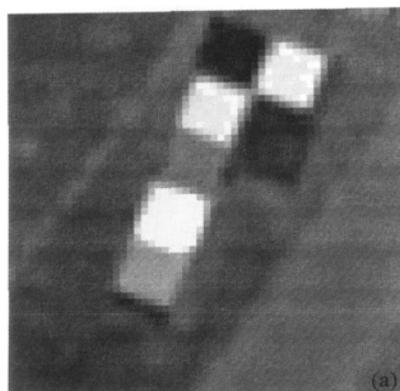


图 4 影像及关系曲线。(a)多灰阶靶标影像;(b)传感器响应与靶标反射率关系

Fig. 4 Image and relationship plot. (a) Image of multi-gray-scale tarps; (b) relation of sensor's response and reflectance

表 1 不确定度分析

Table 1 Uncertainty analysis

Uncertainty sources	Uncertainty contribution /%	
Reflectance of tarps measurement	Diffuser panel calibration	2
	Field measurement error	0.5
Diffuse-to-global ratio measurement	Block error	2.5
	Non-uniformity of sky diffuse irradiance	1.5
Atmospheric optical depth	1	
Transmission calculation	0.5	
Solar and satellite geometrical factor	0.1	
Total uncertainty	3.8	

5 结 论

基于多灰阶靶标的高分辨光学遥感器在轨绝对辐射定标方法,在(半程)辐照度基法的基础上,通过布设多种反射率的人工靶标、测量漫射辐射与总辐射比,消除气溶胶模型假定所带的误差,经线性拟合消去大气程辐射及地-气耦合辐射的影响,以实际测量代替辐射传输计算的气溶胶散射,提高了定标精

度,总合成不确定度小于 4%。试验结果表明,基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法,不仅满足高分辨率光学卫星遥感器在轨辐射定标的精度要求,而且能够突破大面积辐射校正场受到的地理位置、天气状况等因素限制,实现移动定标、缩短定标周期、提高定标效率,同时还能够在复杂环境条件下对高分辨率光学传感器进行全动态范围的高精度定标,对

提高我国在轨辐射定标水平具有重要意义。

参 考 文 献

- 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
郑小兵, 张黎明, 吴浩宇等. 面向光学遥感的先进光谱辐射定标技术[J]. *海洋科学与进展*, 2004, **22**(21): 16~22
- Fu Qiaoyan, Min Xiangjun, Li Xingchao *et al.*. In-flight absolute calibration of the CBERS-02 CCD sensor at the Dunhuang test site [J]. *J. 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
- Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua *et al.*. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors[J]. *J. Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 606~623
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): 606~623
- P. N. Slater, S. F. Biggar, R. G. Holm *et al.*. Reflectance and radiance-based methods for the inflight absolute calibration of multispectral sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, **22**(1): 11~37
- S. F. Biggar. In-Flight Methods for Satellite Sensor Absolute Radiometric Calibration[D]. Tucson: The University of Arizona, 1990
- S. F. Biggar, P. N. Slater, D. I. Gellman. Uncertainties in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4 ~ 1.1 μm range [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **48**(2): 245~252
- K. J. Thome. Absolute radiometric calibration of Landsat-7 ETM+ using the reflectance-based method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **78**(1-2): 27~38
- P. N. Slater, S. F. Biggar, K. J. Thome *et al.*. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors[J]. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, **13**(2): 349~359
- K. J. Thome. Validation plan for MODIS level 1 at-sensor radiance[OL]. [2011-12-30]. <http://modis.gsfc.nasa.gov/>
- 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, 黄意玟等. 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
- Hu Xiuqing, Zhang Yuxiang, Qiu Kangmu. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method[J]. *J. Remote Sensing*, 2003, **7**(6): 458~464
胡秀清, 张玉香, 邱康睦. 采用辐照度基法对 FY-1C 气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标[J]. *遥感学报*, 2003, **7**(6): 458~464
- Sun Jijuan, Ma Guoqiang, Zeng Yong *et al.*. Absolute radiometric calibration and the uncertainty analysis of CBERS-02 TIR band[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2007, **28**(1): 33~38
孙吉娟, 马国强, 曾湧等. CBERS-02 热红外波段绝对辐射定标及其不确定性分析[J]. *航天返回与遥感*, 2007, **28**(1): 33~38
- Holekamp. Radiometric characterization of the IKONOS, QuickBird, and OrbView-3 sensors[R]. 2006 Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop, 2006
- M. Pagnutti. 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
- Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Advanced calibration method for sun radiometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1337~1342
徐秋云, 郑小兵, 张伟等. 太阳辐射计先进定标方法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1337~1342
- Yang Benyong, Zhang Liming, Yang Baoyun *et al.*. Space stability measurement and analysis of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3026~3030
杨本永, 张黎明, 杨宝云等. 光学传感器星上定标漫射板空间稳定性测试与分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3026~3030
- David, C. Nagur, Cherukuru *et al.*. Use of a spectralon panel to measure the downwelling irradiance signal; case studies and recommendations [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(20): 5981~5986

栏目编辑:何卓铭