文章编号:1001-5078(2018)10-1274-04

·光电技术与系统 ·

一种高光谱相机绝对辐射定标方法

刘贺雄,周 冰,高宇辰,贺 宣,鲁 军 (陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系,河北石家庄 050003)

摘 要:随着高光谱相机在特定区域特定波段背景辐射精确测量方面的应用,对高光谱相机辐射定标的精度、分辨率的要求也不断提高。本文通过测量滤波片透过率及积分球出射 DN 值得到各波段透过的能量占总透过能量的百分比,并结合实际测得的各波段辐亮度,建立其与相机探测器输出的各波段 DN 值的关系,达到辐射定标的目的。将提高高光谱相机定标分辨率 转换为提高测量滤波片透过率的波长分辨率,简化了研究过程。通过定标结果可知,波长在较小范围内变化时,高光谱相机对其增益系数也会发生变化。

关键词:高光谱;绝对辐射定标;滤波片;透过率

中图分类号:TP75 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.10.014

A method of absolute radiation calibration for a hyperspectral camera

Liu He-xiong, Zhou Bing, Gao Yu-chen, He Xuan, Lu Jun

(Electronic & Optical Engineering Department, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: With the application of hyperspectral camera in precise measurement of background radiation in specific areas and bands, the requirements on the accuracy and resolution of the camera's radiation calibration are constantly increased. In this paper, by measuring the filter transmittance and DN value of integrating sphere, the percentage of the energy transmitted from each band is obtained. Combined with the percentage and intensity of each wave band, the relation between intensity and the DN value of the camera detector is established. so far, the radiation calibration has been completed. In the paper, to improve calibration resolution of the hyperspectral camera is converted to improve wavelength measurement resolution of the filter transmittance, which simplifies the research process. The calibration results show that, when the wavelength changes in a small range, the gain coefficient of the hyperspectral camera changes. **Key words**; hyperspectral; absolute radiation calibration; filter; transmittance

1 引 言

自高光谱技术诞生以来,各国都对其进行了深入的研究。目前,高光谱遥感技术已广泛应用于农业调查、矿物质勘探、环境监测等领域^[1-2]。高光谱相机最显著的特点是可以将光谱技术和成像技术结

合起来,获得特定目标区域特定波段的光谱图像数据^[3]。高光谱相机在采集目标光谱信息之后的输 出为 DN (digital number)值^[4]。DN 值为量纲一数 据,无法反应真实的目标辐亮度^[5]。因此,在实际 应用时需对高光谱相机进行辐射定标,确定探测器

作者简介:刘贺雄(1993 -),男,硕士研究生,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:liuhexiongoec@126.com 收稿日期:2018-03-05;修订日期:2018-04-19

基金项目:河北省自然科学基金项目(No. F2016506014)资助。

输出的 DN 值与辐亮度的关系,便于对被观测目标 的光谱信息进行定量分析^[6-7]。辐射定标可分为相 对辐射定标和绝对辐射定标^[8]。相对辐射定标指 确定光谱相机各波谱段、各像源测得辐射量的相对 值;绝对辐射定标指建立传感器入瞳处表观辐亮度 与探测器输出的 DN 之间的关系^[9-10]。

随着技术发展,高光谱技术被引入激光制导、激 光测距等领域用于对特定区域特定波段背景辐射的 测量。在激光制导、激光测距等领域的背景辐射研究 中,所针对波段往往只有几个纳米,并要求得到实际 的精确背景辐射量。因此不同于传统的高光谱遥感, 对背景辐射测量要求对高光谱相机进行高精度、高分 辨率的辐射定标,以得到某一区域特点波段精确的背 景辐射绝对量。本文通过测量滤波片透过率得到各 波段透过的能量占总透过能量的百分比,从而得到各 波段的辐亮度,再建立其与相机探测器输出的各波段 DN 值的关系,实现绝对辐射定标的目的。

2 原 理

绝对辐射定标的基本内容是确定探测器入瞳处 表观辐亮度与探测器数字化输出之间的关系^[11]。 假设高光谱探测器入瞳处的辐亮度为 *L*(λ),则探 测器某一像源接受到的辐亮度可表示为:

$$E(\lambda) = \frac{\pi \tau(\lambda) L(\lambda) \cos^2(\theta)}{4F^2}$$
(1)

其中,F为系统的F数; $\tau(\lambda_i)$ 为高光谱相机分光效 率与光学系统透过率之积; θ 为像源与光轴的夹角。

该探测器像源输出的 DN 值可表示为:

$$DN(\lambda) = \int_{\lambda-\delta(\lambda)/2}^{\lambda+\delta(\lambda)/2} \frac{R_e E(\lambda) d^2 \eta(\lambda) t}{hc/\lambda} d\lambda + R_e I_d t$$
(2)

其中, λ_i 为标定波段中心波长; $\delta(\lambda_i)$ 为光谱分辨 率; $\eta(\lambda_i)$ 为探测器量子效率;d 为像源尺寸; R_e 为 探测器电子增益;t 为曝光时间;t 为探测器暗电流;h为普朗克常量;c 为光速。当 $\delta(\lambda)$ 很小时,根据式 (1)、(2),DN 可表示为:

$$DN(\lambda) = \frac{\pi \tau(\lambda) L(\lambda) \cos^2(\theta)}{4F^2}$$
$$\frac{R_e d^2 \eta(\lambda) t}{hc/\lambda} \delta(\lambda) + R_e I_d t$$
(3)

$$DN(\lambda) = G(\lambda)L(\lambda) + B$$
(4)
#...

:

$$G(\lambda) = \frac{\pi \tau(\lambda_i) L(\lambda_i) \cos^2(\theta)}{4F^2} \frac{R_e d^2 \eta(\lambda_i) t}{h c / \lambda_i}$$

$$B = R_e I_d t$$

由式(4)可知探测器入瞳处辐亮度与其输出 DN 值成线性关系。如果已知两组 DN(λ)、 $L(\lambda)$ 即 可求得倍增系数 $G(\lambda)$ 与偏置常数B,完成对某一波 长的绝对辐射定标。

3 传统方法

目前实验室绝对辐射定标大多采用积分球输出 的光做参考光源,通过调节积分球输出辐亮度的强 弱对高光谱相机进行定标^[7]。如图1所示,使用某 波段的单色光作为积分球光源,再用高光谱相机采 集其不同输出下的光谱图像,与此同时用辐射计测 量输出能量计算辐亮度。在采集多组数据之后即可 用最小二乘法确定入瞳处辐亮度与高光谱相机的数 字化输出 DN 值之间的关系。





Fig. 1 Traditional hyperspectral calibration method

此方法定标的分辨率受限于积分球输出光的光 谱宽度,只能标定某一较宽的波段,无法满足对光谱 分辨率较高的高光谱相机进行定标的要求。

4 方法改进与数据处理

以白炽灯为积分球光源,使用德国 inno-spec 公司生产的 The Redeye 高光谱相机对其 1056 ~ 1076 nm波段的输出光进行数据采集,采集步长 1 nm,如图 2 所示,得到其波长与 DN 值的关系 DN(λ)。利用美国瓦里安公司生产的分光光度计 Cary 2000 测定某滤波片的透过率 $\tau_1(\lambda)$,测量精度 0.02 nm。利用 $\tau_1(\lambda)$ 求得以 λ_{α} 为中心,步长 1 nm 的波段的平均透过率:

$$-(\lambda_{a}) = \frac{\sum_{i=a-0.5}^{a+0.5} \tau_{1}(\lambda_{i})}{51}$$
(5)

滤光片在 1057~1075 nm 波段,步长为1 nm 时 的平均透过率如图3 所示,由图3 可知,滤波片透过 率从 1057 nm 至 1075 nm 先变大后边小,峰值出现 在 1066 nm 处,峰值透过率约为 87%。



Fig. 2 The DN value of the integrating sphere output





根据 DN(λ)、 $\tau(\lambda)$ 即可求取某一波段透过能量占透过滤波片总能量的百分比:

$$\varphi(\lambda_a) = \frac{D(\lambda_a)\tau(\lambda_a)}{\sum_{i=1056}^{1076} D(\lambda_i)\tau(\lambda_i)}$$
(6)

图 4 所示为各波段透过能量占透过滤波片总 能量的百分比。各波段透过能量占透过滤波片总 能量的百分比是由滤波片各波段平均透过率、积 分球输出的各波段 DN 值共同决定的,由图可知 1067 nm 波段输出能量占比最大,约占总能量 的10%。

将滤波片置于积分球输出孔前,用高光谱相机 采集经过滤波片的输出光光谱信息,如图 5 所示,即 为其波长与 DN 值的关系 DN'(λ)。再用辐射计求 出其辐亮度 *L*,则以 λ_{α} 为中心,步长 1 nm 的波段透 过滤波片的辐亮度为:





改变积分球输出光亮度,依照上述方法测得多 组 DN'(λ)、 $L(\lambda_{\alpha})$,通过最小二乘法即可求取其增 益系数 $G(\lambda)$ 、偏置量 B,完成高光谱相机的绝对辐 射定标。本文使用的高光谱相机在每次使用前都会 进行去除暗噪声的操作,所以定标的偏置量 B 近似 为零。所得增益系数如图 6 所示。

Fig. 5 Spectral DN value of the output light that passes through the filter



Fig. 6 Gain coefficients at different wavelengths

5 结 论

通过测量滤波片透过率与积分球输出的 DN 值得到各波段透过滤波片的能量占总透过能量的 百分比,结合实际测得积分球出射并透过滤波片 的辐亮度,得到各波段实际出射辐亮度,由此建立 了各波段的辐亮度与相机探测器输出的各波段 DN 值的关系,完成绝对辐射定标。将提高高光谱 相机定标分辨率,转变为提高测量滤光片透过率 分辨率,简化了研究过程,达到了绝对辐射定标的 目的。通过实验结果可以看出:高光谱相机对不 同波长的光响应不一致。对于波长在较小范围内 变化的光,高光谱相机对其的增益系数也会发生 改变。

参考文献:

[1] HUA Houqiang. Calibration and image correction of single-ccd four-band spectral imager [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009. (in Chinese)

> 华厚强.单 CCD 四波段光谱成像仪的定标与图像校正 [D].成都:电子科技大学,2009.

 WU Longguo, HE Janguo, HE Xiaoguang, et al. Hyperspectral image technology in the research development of nondestructive testing fruit[J]. Laser & Infrared, 2013 43
 (9):990-996. (in Chinese)

> 吴龙国,何建国,贺晓光,等.高光谱图像技术在水果 无损检测中的研究进展[J].激光与红外,2013,43 (09):990-996.

- [3] WANG Jianyu, LI Chunlai, LV Gang, et al. System test calibration and flight verification of infrared hyperspectral imager [J]. Journal of Infrared and Millimeter-wave, 2013,36(1):69-74. (in Chinese)
 王建宇,李春来, 吕刚,等. 红外高光谱成像仪的系统 测试标定与飞行验证[J]. 红外与毫米波学报,2017, 36(1):69-74.
- ZHOU Chuncheng, LI Chuanrong, HU Jian, et al. Study on the relative radiation correction method of airborne hyperspectral imager based on the variation of the line frequency [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012,27(1):33 - 38. (in Chinese)

周春城,李传荣,胡坚,等.基于行频变化的航空高光 谱成像仪相对辐射校正方法研究[J].遥感技术与应 用,2012,27(1):33-38.

- [5] Hill S L, Clemens P. Miniaturization of sub-meter resolution hyperspectral imagers on unmanned aerial systems
 [C]// SPIE Sensing Technology + Applications, 2014: 91040A.
- [6] ZHENG Fengjie. Research on radiometric and geometric laboratory calibration methods of aerial remote sensing camera[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011. (in Chinese)
 郑逢杰. 航空遥感相机辐射与几何实验室标定研究 [D]. 郑州;河南理工大学,2011.
- [7] GOU Zhiyang, YAN Lei, CHEN Wei, et al. Absolute radiation calibration and validation analysis of aerial uav hyperspectral camera [J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2012, 32(2):430-434. (in Chinese)
 勾志阳,晏磊,陈伟,等. 无人机高光谱成像仪场地绝对辐射定标及验证分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2):430-434.
- [8] LI Zhenwang, LIU Liangyun, ZHANG Hao, et al. Radiometric calibration and validation of TG 1 hyper-spectral imager[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013,28(5):850-857. (in Chinese)
 李振旺,刘良云,张浩,等. 天宫一号高光谱成像仪在 轨辐射定标与验证[J]. 遥感技术与应用,2013,28 (5):850-857.
- [9] FANG Wei, ZHANG Wingying, QIAN Wei, et al. Study on the method of spectral radiometric calibration for LCTF tuning[J]. Optical Technology, 2009, 35(3): 359 - 362. (in Chinese)
 方薇,张冬英,钱玮,等. LCTF 调谐的高光谱成像系统 辐射定标方法研究[J]. 光学技术, 2009, 35(3):
- 359 362.
 [10] GUO Fei. Research on radiation calibration and performance evaluation of airborne imaging spectrometer [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2015. (in Chi-

nese) 郭飞.机载成像光谱仪辐射校正与性能评估研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.

[11] HAN Jie, XIE Yong, GU Xingfa, et al. In-flight radiation calibration for ZY - 3 satellite multispectral sensor by modified reflectance-based method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, (3):856 - 861. (in Chinese) 韩杰,谢勇,顾行发,等. 基于改进型反射率基法的资源三号卫星多光谱相机在轨辐射定标研究[J]. 光谱 学与光谱分析, 2015, (3):856 - 861.