

# 一种基于单元型红外光谱辐射计的成像光谱数据获取系统设计

宗靖国, 张建奇, 刘德连, 袁胜春

西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071

**摘 要** 依据单元非成像型光谱辐射计的特点, 提出了一种单元非成像型红外光谱辐射计的成像光谱数据获取系统。该系统采用在光谱辐射计前端加装扫描装置, 结合同步控制器, 实现光谱辐射计的空间扫描。利用光谱辐射计提供的接口, 完成了采集获得的成像光谱数据的批量定标。该系统可达到  $500 \times 500$  像素的空间分解能力, 光谱范围  $667 \sim 5\,000\text{ cm}^{-1}$ , 光谱分辨率为  $1\text{ cm}^{-1}$ , 空间视场角为  $150^\circ$ , 瞬时视场角为  $0.3^\circ$ 。将该系统应用于实际的场景光谱数据获取, 通过对得到的实验数据分析和比较, 说明本文给出的基于非成像光谱辐射计的成像数据获取系统, 能够实现实际场景的成像光谱数据获取, 能够满足实时性要求不太高的成像光谱数据获取。

**关键词** 光谱辐射计; 非成像; 光谱; 成像

中图分类号: TN216

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)10-2853-04

## 引 言

红外光谱辐射计是测量物体在红外波段发射光谱的仪器设备。通过获取物体的红外光谱辐射, 可以分析物体的辐射特性与物理属性, 如确定物体红外发射光谱的峰值强度、位置和形状, 分析物体, 特别是气体的红外光谱吸收特性等。进而完成农业、环境、地质、石油、安全、军事等军用、民用领域众多的应用需求<sup>[1]</sup>, 如在农业、林业上实现农作物、树木的生长评估、病虫害监测; 在环境应用方面实现污染监测、地质灾害监测、大规模的地物分类; 在安全领域实现危险品、违禁品检测; 在军事领域实现对典型军事目标的监控和打击等<sup>[2-7]</sup>。

红外光谱辐射计可分为单元非成像型和成像型两类。单元非成像型红外光谱辐射计以系统视场为单位, 每次采集一个视场内的红外光谱辐射分布数据, 其数据不包含目标空间信息。其突出特点是具有很宽的光谱响应范围和极低的系统噪声<sup>[8, 9]</sup>。成像型红外光谱辐射计的光电传感模块由大量的单元传感器组成, 每个单元传感器完成其所观测的瞬时视场的红外光谱辐射测量, 由此实现空间分解的红外光谱辐射测量, 获得系统总视场内的红外辐射的空间分布信息<sup>[10-13]</sup>。相比单元型非成像红外光谱辐射计, 成像型红外光谱辐射计获得的数据不但包含了光谱分布信息, 还包含了光谱的空间分

布信息, 形成了数据立方体, 因而可以为实际应用提供更为丰富的信息<sup>[14]</sup>。成像型红外光谱辐射计可以完成数据立方体的测量, 从而更好地服务于实际应用。

由上面的分析可知, 红外光谱数据立方体不仅具有场景的空间分布信息还具有场景的光谱分布信息, 对众多领域的实际应用都有着非常重要的意义。然而, 成像型红外光谱辐射计由于设计的局限往往都有一定的波段获取范围, 另一方面成像光谱往往价格昂贵, 在经费不足的条件下很难应用。如何利用单元非成像型红外光谱辐射计来获取成像光谱数据便成为本文的出发点。鉴于此, 本文依据单元非成像型光谱辐射计的特点, 提出了一种单元非成像型红外光谱辐射计的成像光谱数据获取新系统。该系统采用在光谱辐射计前端加装扫描镜, 结合同步控制器, 实现光谱辐射计的空间扫描。利用光谱辐射计提供的接口, 完成采集获得的成像光谱数据的批量定标<sup>[15, 16]</sup>。该系统不但具备了傅里叶光谱辐射计的实时、快速、准确、灵敏度高等特点, 还可以得到物体的空间信息。与热像仪相比该系统不但可以得到视频信息, 而且还可以得到目标详细的红外光谱信息, 从而有利于红外虚拟样机对目标的仿真和光谱图像反演<sup>[17]</sup>。

将该系统应用于实际的场景光谱数据采集, 实验结果表明本文给出的基于非成像光谱辐射计的成像数据获取系统, 能够实现实际场景的成像光谱数据获取, 能够满足实时性要求不太高的成像光谱数据获取。

收稿日期: 2010-03-08, 修订日期: 2010-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60777042), 航空科学基金项目(20090181004)资助

作者简介: 宗靖国, 1979年生, 西安电子科技大学博士研究生 e-mail: zongjig@126.com

©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 1 系统结构

该系统在现有的光谱辐射计前端加装二维扫描装置,使反射光光谱进入光谱辐射计进行光谱数据的采集。反射镜采用金镀层,其红外波段的光谱反射率大于 98%。该扫描装置可以完成水平和俯仰两个方向的运动,最小可旋转角度为  $0.0002^\circ$ ,通过同步控制器同步光谱辐射计的数据采集和扫描装置的旋转,以保证光谱数据和空间点的一一对应。

系统由 3 部分组成:光谱辐射计、同步控制器和二维扫描装置。如图 1 所示。

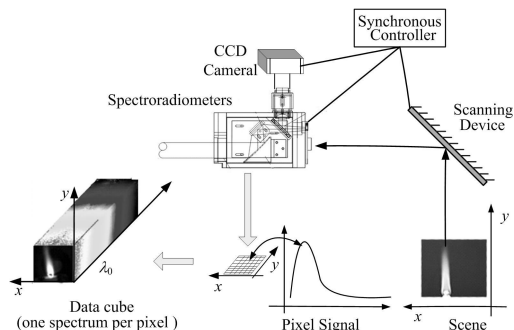


Fig 1 Structure of new imaging FTIR spectroradiometer

对系统采集数据的步骤描述如下:

(1) 设置需要采集的二维空间的俯仰角、方位角、光谱辐射计的瞬时视场角、光谱分辨率、空间分辨率;

(2) 调整固定于二维扫描装置上的平面反射镜,使其移动到指定位置;

(3) 当平面反射镜移动到指定位置后,自动采集当前位置的红外光谱数据和当前视场内的可见光数据;

(4) 当前位置的数据采集完成后,自动判断当前位置是否是最后一个位置,如果不是,则继续移动到下一个位置进行光谱数据采集;如果是最后一个位置,则表示所有位置的光谱数据采集完成;

(5) 所有位置的光谱数据采集完成后,再采集冷、热参考源的光谱数据作为参考;

(6) 利用参考源定标采集到的各位置光谱辐射,并将定标后的光谱辐射对应到二维空间的相应位置,形成包含一维光谱信息和二维空间信息的数据立方体。

## 2 数据处理

本文采用的光谱辐射计是 ABB 公司的 MR170,随机附带的软件只能逐条处理,不能进行批量定标。由于光谱辐射计得到的数据量大,笔者还自主开发了光谱处理软件。

光谱辐射计的定标需要一个已知的辐射源作为基准。通常使用黑体作为标准辐射源。黑体的辐射由普朗克公式给出

$$L(\sigma) = \frac{c_1 \sigma^5}{\exp\left(\frac{c_2 \sigma}{T}\right) - 1} \quad (1)$$

式中,  $c_1 = 1.19 \times 10^{-12} (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr} \cdot (\text{cm}^{-1})^4)$  是第一辐

射常数;  $c_2 = 1.493 \text{ K} \cdot \text{cm}$  是第二辐射常数;  $T$  是温度, K;  $\sigma$  为波数,  $\text{cm}^{-1}$ 。

光谱辐射计在测量时,探测器接收到的辐射量包含 3 个部分,一部分是场景的光谱辐射,另外一部分是来自于光谱辐射计自身的热辐射,还有辐射传输路径中大气的热辐射。

一个未经校正的测量可以由下面公式表示

$$S^{\text{Measured}}(\sigma) = K(\sigma)[L^{\text{Source}}(\sigma) + M^{\text{Stray}}(\sigma)] \quad (2)$$

式中,  $S^{\text{Measured}}(\sigma)$  是测量的光谱;  $K(\sigma)$  是仪器的响应函数;  $L^{\text{Source}}(\sigma)$  是辐射源的光谱辐射;  $M^{\text{Stray}}(\sigma)$  是传输路径中的光谱辐射。

在光谱辐射计不存在任何误差的情况下,干涉图是对称的,但实际上由于分光镜存在一定程度的散射等误差的存在,干涉图往往是不对称的,这种不对称使得在对干涉图进行傅里叶变换时产生虚部,从而使得光谱成为复数光谱。在定标时,需要尽量削弱干扰因素,所以黑体源应该充满光谱辐射计的视场,并尽量靠近光谱辐射计。这样传输路径中大气的热辐射等因素基本可以忽略。对光谱定标的方法如下:分别测量冷、热标准黑体辐射源,这个温度要尽量接近被测物体的温度,并且在被测物体的温度之外。

$$L_H(\sigma) = \frac{S_H^{\text{Measured}}(\sigma)}{K(\sigma)} - M^{\text{Stray}}(\sigma) \quad (3)$$

$$L_C(\sigma) = \frac{S_C^{\text{Measured}}(\sigma)}{K(\sigma)} - M^{\text{Stray}}(\sigma) \quad (4)$$

式中,  $L_C(\sigma)$  和  $L_H(\sigma)$  分别表示冷、热黑体的光谱辐射的理论值。特定温度下黑体的辐射可以表示为

$$L(\sigma) = \varepsilon(\sigma) P_T(\sigma) = \varepsilon(\sigma) \frac{c_1 \sigma^5}{\exp\left(\frac{c_2 \sigma}{T}\right) - 1} \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon(\sigma)$  是黑体的发射率;  $P_T(\sigma)$  是由普朗克公式计算出的已知温度黑体的辐射。

由(3)和(4)式可以得出

$$K(\sigma) = \frac{S_H^{\text{Measured}}(\sigma) - S_C^{\text{Measured}}(\sigma)}{L_H(\sigma) - L_C(\sigma)} \quad (6)$$

$$M^{\text{Stray}}(\sigma) = \frac{L_H(\sigma) S_C^{\text{Measured}}(\sigma) - L_C(\sigma) S_H^{\text{Measured}}(\sigma)}{S_H^{\text{Measured}}(\sigma) - S_C^{\text{Measured}}(\sigma)} \quad (7)$$

由此可得到  $K$  和  $M$ 。

由于复数光谱的虚部只反应噪声水平,所有的光谱信息全部包含在实部。所以我们在处理时忽略虚部。对于辐射强度介于冷、热标准黑体之间的目标,利用冷、热标准黑体辐射在连续波长上进行插值,得出空间各点在  $2 \sim 15 \mu\text{m}$  上任意波长处被测目标的光谱辐射。

## 3 实验结果和讨论

为了验证系统的可靠性,我们选取了 MIKRON M340 型号的黑体校正源,其温控范围是:  $-20 \sim 150^\circ\text{C}$ ,精度:  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ,为了保证数据的稳定性,我们使用  $60^\circ\text{C}$  的黑体温度作为实验的测试温度,分别使用  $50^\circ\text{C}$  黑体和  $70^\circ\text{C}$  黑体作为冷、热参考源。测试结果如图 2 所示。由图 2(a) 可以看出该黑体是一个小面元黑体,从图 2(b) 可以看出,定标后的数据真实的反映了黑体的空间形状信息。选取黑体中一点,计

算出其光谱辐射曲线如图 2(c) 所示, 图 2(c) 中平滑的那条曲线为 60 ℃ 标准黑体辐射曲线, 带有毛刺的曲线为实验得到的辐射曲线。由于大气吸收等因素的影响, 实验曲线带有毛刺是不可避免的。从图 2 我们可以看出, 实验装置反映了黑体的空间信息, 同时也得到了光谱信息, 能够真实的反映空间物体的光谱辐射。

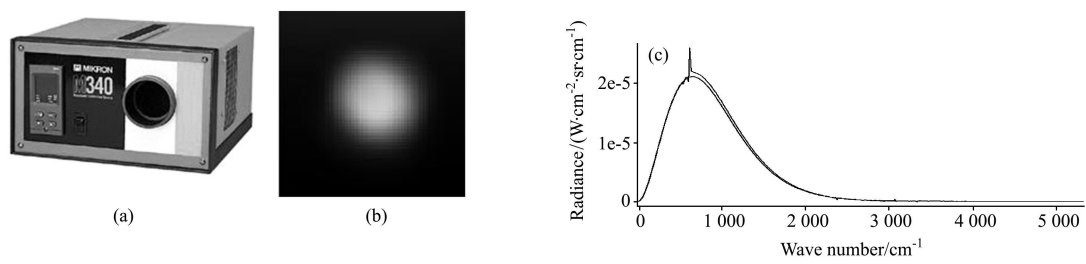


Fig 2 Result of measurement  
(a): Blackbody M340; (b): Blackbody image; (c) Contrast of blackbody curve at 60 ℃

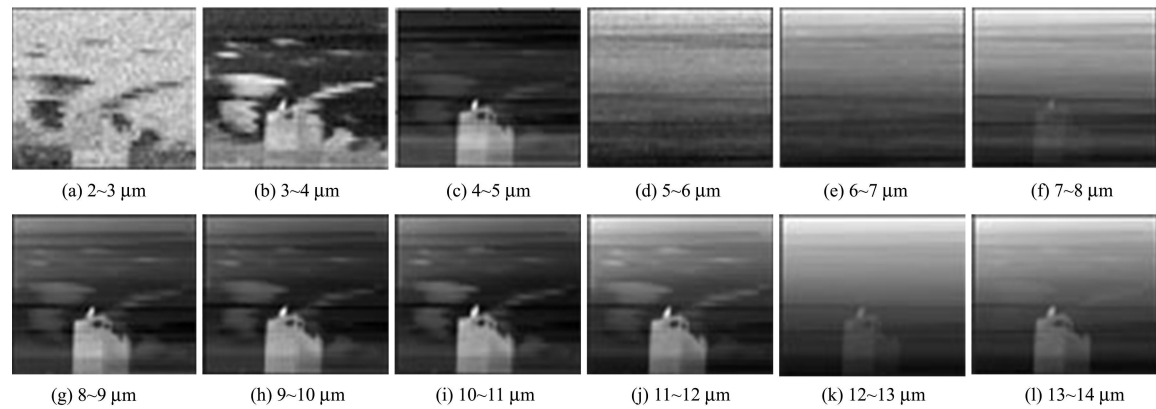


Fig 3 Wave band IR images of building

图 3(a) ~ (l) 分别为采集得到的光谱数据在 2~ 14 μm 波段内的图像, 从中可以看出, 图像中可以清晰的看到建筑物的图像。选取一个像素点显示其光谱数据如图 4 所示, 从该结果中可以看出, 该像素点的光谱辐射数据变化平缓, 这与该像素点是云背景这一情况是吻合的。

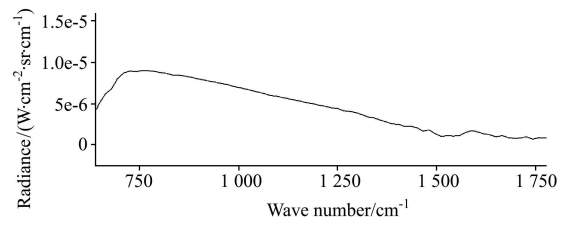


Fig 4 Cloud background spectral radiance curve

将本文给出的新系统应用于实际场景的成像光谱数据获取, 实验中对准一地面建筑物, 采用本文给出的数据处理算法对采集得到的数据进行处理, 采用分波段积分的方法来验证新系统的性能, 从 2 μm 开始, 每隔 1 μm 一幅图像, 结果如图 3 所示。

从实验结果中可以看出本文设计的改进系统不仅可以获得场景中每一点的光谱信息还可以得到场景中物体空间分布信息, 相对于单元非成像光谱辐射计其应用范围更广。

## 4 总 结

本文提出一种新型的成像光谱辐射计系统, 不仅能够获取场景中的光谱信息还可以获得场景中的空间分布信息。该系统并不改变原有的光谱辐射计的属性和测试性能。将给出的改进系统应用于实际的黑体和场景测试, 实验结果表明本文提出的改进系统, 可以实现单元非成像光谱辐射计的空间二维光谱数据获取。该系统可用于军事红外目标反演、目标识别、红外虚拟样机对目标的仿真等领域。

## 参 考 文 献

[ 1 ] M A Ling, CUI De qi, WANG Rui, et al(马 玲, 崔德琪, 王 瑞, 等). Optical Technique(光学技术), 2006, 32( 8): 572.  
[ 2 ] Yang Y, Sule Suso J, Sock alingum G D. SPIE, 2008, 6859: 68591U.  
[ 3 ] Lazarevich A K, Oursler D A, Baldwin K C. SPIE, 2006, 6218: 621808.  
[ 4 ] Briand Danick, Manzardo Omar, de Rooij Nicolaas F, et al. Sensors, IEEE, 2007, 17( 12): 1364.  
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- [ 5 ] SHAN Yong, ZHANG Jing-zhou, GUO Rong-wei(单 勇, 张靖周, 郭荣伟). Journal of Aerospace Power(航空动力学报), 2008, 23(2): 251.
- [ 6 ] WANG Rui-sheng, YANG Su-ming, YAN Bai-kun(王润生, 杨苏明, 阎柏琨). Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感), 2007, (1): 1.
- [ 7 ] XIANGLI Bin(相里斌). Acta Photonica Sinica(光子学报), 1997, 26(6): 550.
- [ 8 ] LU Qun-bo, YAO Tao, XIANGLI Bin, et al(吕群波, 姚 涛, 相里斌, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(1): 114.
- [ 9 ] Cabib Dario, Gil Amir, Buckwald R A. SPIE, 2006, 6207: 62070L.
- [ 10 ] YIN Shi-min, JI Zhong-ying, CUI Yan, et al(殷世民, 计忠瑛, 崔 燕, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2009, 38(4): 880.
- [ 11 ] PAN Ming-zhong, QI Hong-xing, XIAO Gong-hai, et al(潘明忠, 亓洪兴, 肖功海, 等). Infrared(红外), 2010, 31(1): 1.
- [ 12 ] Louis Moerau, Claude Roy, Christian Vallieres, et al. SPIE, 2009, 7300.
- [ 13 ] DU Shi-song, WANG Yong-mei, WANG Ying-jian(杜述松, 王咏梅, 王英鉴). Optical Instruments(光学仪器), 2008, 30(6): 77.
- [ 14 ] YANG Yi. Infrared, 2006, 27(8): 24.
- [ 15 ] JIAN Xiao-hua, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang(简小华, 张淳民, 赵葆常). Acta Physica Sinica(物理学报), 2007, 56(2): 824.
- [ 16 ] HE Guo-jing, ZHANG Jian-qi(何国经, 张建奇). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2004, 33(4): 338.
- [ 17 ] ZHANG Xiang, ZHANG Jian-qi, JIN Wei, et al(张 翔, 张建奇, 靳 薇, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2009, 38(5): 1221.
- [ 18 ] ZHANG Jian, ZHANG Jian-qi, SHAO Xiao-peng(张 健, 张建奇, 邵晓鹏). Journal of System Simulation(系统仿真学报), 2005, 17(10): 2399.

## A New Imaging FTIR Spectroradiometer

ZONG Jing-guo, ZHANG Jian-qi, LIU De-lian, YUAN Sheng-chun

School of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China

**Abstract** According to the characteristic of single element detector and non-imaging spectroradiometer, a new imaging FTIR spectroradiometer system was developed for spectral data acquisition. This system is composed of a spectroradiometer, a synchronous controller and a scanning device. Using the data interface of spectroradiometer, spectral radiometric calibration can be achieved for the system. The image resolution is  $500 \times 500$  pixels, spectral range is  $667\text{--}5\,000\text{ cm}^{-1}$ , spectral resolution is  $1\text{ cm}^{-1}$ , and space Field of view is  $15^\circ$ , Instant Field of View is  $0.3^\circ$ . Experiments were held for actual data acquisition and data analysis was made. The analysis result indicates that the proposed system is adequate for non-realtime imaging spectral data acquisition.

**Keywords** Spectroradiometer; Non-imaging; Spectrum; Imaging

(Received Mar. 8, 2010; accepted Jun. 20, 2010)