

Hadamard 变换成像光谱仪实验室辐射定标方法

白军科^{1,2}, 刘学斌¹, 闫鹏¹, 胡炳樑¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: Hadamard 变换成像光谱仪采用多通道探测数字变换技术实现光谱成像。主要介绍了基于数字微镜阵列器件的 Hadamard 变换成像光谱仪的工作原理与仪器结构, 研究设计了一套适用于该 Hadamard 变换成像光谱仪的实验室辐射定标方案。用远距点光源光路进行 CMOS 探测器像元响应不均匀性修正, 获得相对定标精度达到 4.6%; 采用太阳模拟光源和均匀平行光路, 用光谱辐射度计实现标准辐射亮度的传递进行光谱辐射定标, 绝对定标精度达到 8.92%。通过实物成像, Hadamard 变换成像光谱仪的实验室辐射定标方法精确、实用。

关键词: 辐射定标; Hadamard 变换成像光谱仪; 相对定标; 绝对定标

中图分类号: O433.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0503-04

Laboratory radiation calibration method of Hadamard transform imaging spectrometer

Bai Junke^{1,2}, Liu Xuebin¹, Yan Peng¹, Hu Bingliang¹

- (1. Laboratory of Spectral Imaging Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hadamard transform imaging spectrometer is a multi-channel detection digital transform spectrometer detection technology. The spectrometer used this technology to achieving spectral imaging. Based on the digital micromirror array device of the Hadamard transform spectrometer working principles and the instrument, a series of precision laboratory calibration methods were researched and employed for the Hadamard transform imaging spectrometer. A point light source in long distance was used for the pixel response nonuniformity correction of the CMOS detector. The uncertainty of the relative calibration was 4.6%. Solar simulator and spectral radiometer were used in absolute radiation calibration of the whole system, and the uncertainty of the absolute radiation calibration was 8.92%. Both of the uncertainty of relative calibration and the uncertainty of the absolute radiation calibration met the requirements of the projection. By actual objects imaging, the laboratory calibration methods of the Hadamard transform imaging spectrometer are proved accurate.

Key words: radiation calibration; Hadamard transform imaging spectrometer; relative calibration; absolute calibration

收稿日期: 2012-06-11; 修订日期: 2012-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(41005109)

作者简介: 白军科(1984-), 男, 硕士生, 主要从事数字图像处理方面的研究。Email: jakeybai@163.com

导师简介: 刘学斌(1965-), 男, 研究员, 主要从事数字信号处理方面的研究。Email: lxb@opt.ac.cn

0 引言

光谱成像技术是涵盖光谱技术和成像技术的一种新型遥感技术^[1]。它具有获得目标的二维空间信息和一维光谱信息的功能,形成三维数据立方体^[2-3],经过多年的飞速发展被广泛应用于科学研究和探索、社会生产和军事活动等诸多领域中。

Hadamard 变换成像光谱仪是从传统色散型光谱分析法的基础上发展而来的,它以 Hadamard 编码模板代替常规色散型光谱仪的入射狭缝,具有高能量输入、多通道同时成像能力以及高信噪比等优点^[4-6]。文中结合 Hadamard 变换成像光谱仪自身特点,针对实验室辐射定标问题^[7],给出一套具有一定精度的实验室辐射定标方法,满足了 Hadamard 变换成像光谱仪的实验室辐射定标要求。

1 Hadamard 变换成像光谱仪系统

Hadamard 变换成像光谱仪由前置系统、分光系统、Hadamard 编码模板 DMD^[8]、合光系统以及数据采集系统构成,其工作原理如图 1 所示。

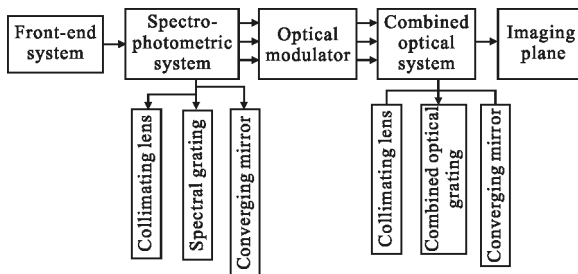


图 1 Hadamard 变化光谱仪工作原理图

Fig.1 Principle chart of Hadamard transform imaging spectrometer

该成像仪根据 Hadamard 变换多通道探测原理,选择数字微镜器件作为通道选通的手段,将其位置设置在色散后的各色光成像面上,通过输入预置 Hadamard 编码信息控制数字微镜器件上相应位置微反射镜对光路进行通断选择,之后在像面探测器上得到选通后的合光像,最后通过预置模板的逆变换得到信噪比增强的数据立方体。

2 实验室光谱辐射定标

实验室光谱辐射定标的主要目的是为了获得光

谱辐射定标系数,以修正仪器获得的光谱曲线上各谱段光谱强度的数值和真实景物该谱段光谱强度的误差。实验室光谱辐射定标主要包括两方面:相对辐射定标和绝对辐射定标。

2.1 相对辐射定标

相对辐射定标是为了确定仪器在均匀光强输入的情况下,图像传感器各探测像元之间的响应不一致性。实验室通过设置均匀照明光源,使仪器入瞳处获得均匀的人瞳能量,此时采集图像数据,通过计算可以得到在此种定标方法下的像元响应不均匀性和相对定标修正系数,通过系数修正使光谱仪每个探测单元的响应不一致性降到最低。通过对相对辐射定标方法的各个环节带来的不确定度实测和数据分析可以计算得到该方法的定标精度。

选择高亮度积分球作为光源,通过设置减光片使光照强度适合仪器测试需求。将主控电脑与光谱辐射度计连接,获得光谱曲线;换 Hadamard 变换成像光谱仪探测,并进行数据处理获得光谱曲线进行修正。具体实验室辐射定标实验装置如图 2 所示。

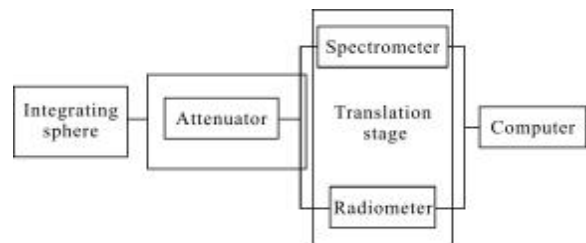


图 2 实验室辐射度定标实验装置示意图

Fig.2 Optical principle schematic of laboratory radiation calibration

实验室相对辐射定标的具体算法实现如下。实验室择高亮度积分球作为光源,假设获得的全通过光照图像也即 DMD 编码为“1”情况下 100 幅平均为 y_a ;假设获得背景噪声图像也即 DMD 编码为“0”情况下获得 100 幅平均为 y_b ;则去除背景噪声为:

$$y_s(i,j) = y_a(i,j) - y_b(i,j) \quad (1)$$

对去除背景噪声后的这一幅图像进行整幅求平均,然后每一个像素去除平均数,获得每一个像素点的相对定标的修正因子为:

$$y_x(i,j) = y_s(i,j) / \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_s(i,j) / (n \times m) \right] \quad (2)$$

式中:图像大小为 $n \times m$ 。因此,编码后采集的图像中

每个像素点 $y(i,j)$ 应修正为:

$$y_0(i,j)=y(i,j) \times y_x(i,j) \quad (3)$$

2.2 绝对辐射定标

绝对辐射定标是为了建立复原光谱值与目标光谱辐亮度间的定量关系。定标的过程实质是标准亮度的传递和标定过程。

文中是通过 Hadamard 变换成像光谱仪获得纠正后的响应输出值(纠正包括暗信号的去除以及相对辐射定标修正)与光谱辐射度计获取的光谱辐亮度对比,来获得该成像光谱仪的绝对辐射定标系数,通过绝对定标系数修正使光谱仪所反演的光谱辐亮度曲线尽可能地接近光谱辐射度计实际光谱辐亮度曲线。通过对实验室绝对辐射定标方法的各个环节带来的不确定度实测和数据分析可以计算得到该方法的定标精度。

采用光照均匀高亮度积分球作为光源,光谱辐射度计经过标定,来采集出射光的光谱辐亮度(见图 2)。

实验室绝对辐射定标的具体算法实现如下。首先辐射度计采集待测光谱仪入瞳处 k 谱段的光谱辐亮度 L_k ; 然后采集待测光谱仪各像元原始测量值,根据实验室相对辐射定标系数,得到纠正后的 k 谱段响应输出值 X_k ; 最后得到实验室绝对辐射定标的系数:

$$A_k=X_k/L_k \quad (4)$$

这样就可以得到修正复原后的光谱值:

$$X=X \cdot A_k \quad (5)$$

2.3 定标精度

(1) 实验室相对辐射定标不确定度

实验室选择高亮度积分球作为光源, Hadamard 编码选择全不通,即 DMD 全 0 编码,获得 100 幅背景噪声图;将 Hadamard 编码模板全通,即 DMD 全 1 编码,获得 100 幅图像,利用 2.1 节的方法计算获得修正因子,从而根据以下实验室相对定标各个环节不确定度参数数据计算得到相对辐射定标的不确定度。

u_1 : 整机系统相对定标时,校正光源的不均匀性 1%。

u_2 : 光谱仪自身不稳定性所带来的系统暗电流随机噪声,采用 100 次采样的平均值作为测量结果,则平均值的不确定度为 4.27%。

u_3 : 被标定光源照明随机噪声,采用 100 次采样

的平均值作为测量结果,则平均值的不确定度为 0.26%。

u_4 : 系统数据处理的残留误差,残留灰度值 2.2,平均灰度值 185, $u_4=2.2/185=0.0119=1.19\%$ 。

则系统相对定标的合成总误差为:

$$u_c=\sqrt{1^2+4.27^2+0.26^2+1.19^2}=4.6\% \quad (K=1)$$

由此可得, Hadamard 变换成像光谱仪实验室相对辐射定标精度可以达到 $\leq 5\%$ 的指标要求。

(2) 实验室绝对辐射定标不确定度

u_a : 测试光谱偏差(如图 3 所示),计算得到测试复原光谱全谱段平均相对偏差为 8.5%。此项包含了照明随机误差、暗电流随机误差、光谱复原误差、响应非线性度误差。

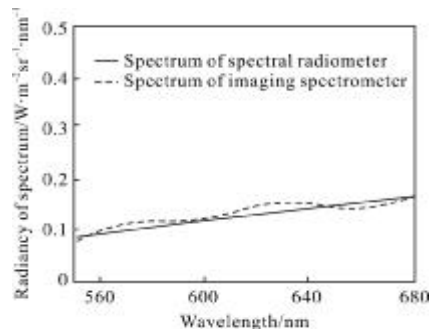


图 3 光谱绝对辐射定标后的测试光谱

Fig.3 Comparison of reconstructed spectrum after radiance absolute calibration and the standard spectrum

u_b : 标准传递误差(光谱辐射度计校准的不确定度)的不确定度。由误差分量 u_2 、 u_3 、 u_4 、 u_5 组成。

u_2 : 标准灯标准照度传递的不确定度 2.5%。

u_3 : 漫反射板反射率的不确定度 0.5%。

u_4 : 校准时距离测量的误差小于 1 mm,测量距离 650 mm, $1/650 \text{ mm}=0.0015=0.15\%$ 。

u_5 : 检定时角度调试偏差 1%。

则光谱辐射度计检定的误差为:

$$u_b=\sqrt{u_2^2+u_3^2+u_4^2+u_5^2}=\sqrt{2.5^2+0.5^2+0.2^2+1^2}=2.7\%$$

u_c : 100 次采样数据复原光谱的均方差 0.14%。

则 Hadamard 变换成像光谱仪绝对辐射定标精度为:

$$u_a=\sqrt{u_b^2+u_c^2}=\sqrt{2.7^2+8.5^2+0.14^2}=8.92\%$$

由此可得, Hadamard 变换成像光谱仪实验室绝

对辐射定标精度可以达到 $\leq 10\%$ 的指标要求。

3 实物成像实验

取实验室实物蝴蝶翅膀上色彩鲜艳部分的一个像元点行 $x=180$, 列 $y=215$ 定标, 可得该像元点的相对定标修正因子为 $y_x(x,y)=y_x(180,215)=0.989$ 。图 4 为经过相对辐射定标前后图像灰度值的比较。

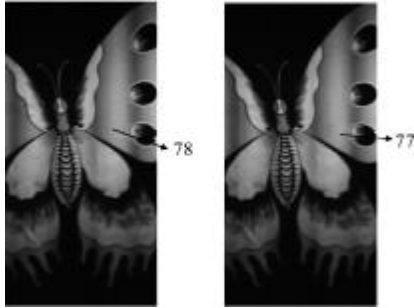


图 4 像元点(180,215)实验室辐射定标前后灰度值

Fig.4 Comparison of gray values before and after calibration of the pixel(180,215)

通过像元点(180,215)实验室辐射定标前后光谱仪复原光谱辐亮度曲线与辐射度计所测辐亮度曲线的比较如图 5 所示。可以直观地得出,用文中所提出的方法进行实验室辐射定标后,得到的 Hadamard 变换成像光谱仪复原后的光谱辐亮度曲线与光谱辐射度计的光谱辐亮度曲线相当接近,说明文中所提出的实验室辐射定标方法简单实用。

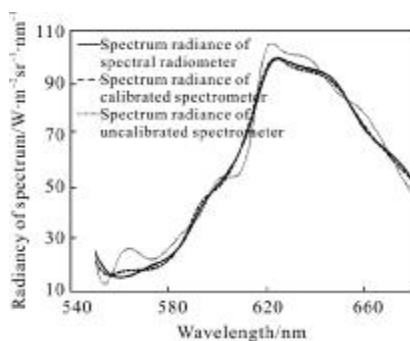


图 5 像元点(180,215)实验室辐射定标前后光谱辐亮度曲线比较

Fig.5 Comparison of spectrum radiance before and after calibration of the pixel(180,215)

4 结论

阐述了 Hadamard 变换成像光谱仪的系统架构与工作原理,详细论述了实验室辐射定标的原理,

给出了测量实验装置以及一种针对该成像光谱仪简单实用的实验室辐射定标方法。通过计算实验室辐射定标精度,相对辐射定标不确定度为 4.6%,绝对辐射定标不确定度为 8.92%,均达到了 Hadamard 变换成像光谱仪定标精度要求。最后进行了实物成像实验,验证了文中所给出的针对 Hadamard 变换成像光谱仪的实验室辐射定标方法精确、实用。

参考文献:

- [1] Li Xianjie, Liu Yingbin, Feng Zhen, et al. AlGaAs/GaAs quantum well infrared photodetector focal plane array based on MOCVD technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(4): 435-438. (in Chinese)
李献杰, 刘英斌, 冯震, 等. 基于 MOCVD 技术的长波 AlGaAs/GaAs 量子阱红外焦平面探测器[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 435-438.
- [2] Wolfe W L. Introduction to Imaging Spectrometers [M]. US: SPIE Press, 1997: 1-23.
- [3] Shaw G A, Burke H K. Spectral imaging for remote sensing [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2003 14(1): 3-28.
- [4] Shao Xiujuan, Hu Bingliang, Yan Peng. Design of multi-spectral adaptive spectrometer based on Hadamard transform [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 963-966. (in Chinese)
邵秀娟, 胡炳梁, 闫鹏. Hadamard 变换多谱段自适应光谱仪[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 963-966.
- [5] Jin Weiqi, Wang Jihui, Wang Xia, et al. Development on performance evaluation of thermal imaging systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 7-13. (in Chinese)
金伟其, 王吉辉, 王霞, 等. 红外成像系统性能评价技术的新进展[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 7-13.
- [6] Treado P J, Morris M D. Multichannel Hadamard transform Raman microscopy[J]. Appl Spectrosc, 1990, 44(1): 1-4.
- [7] Cui Yan, Ji Zhongying. The laboratory radiation calibration of spatially modulated spectrometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(1): 25-28. (in Chinese)
崔燕, 计忠瑛. 空间调制干涉光谱成像仪辐射度定标[J]. 光子学报, 2005, 34(1): 25-28.
- [8] Harwit M, Sloane N J A. Hadamard Transform Optics [M]. New York: Academic Press, 1979.