

文章编号: 1002-2082 (2020) 02-0354-07

光栅式成像光谱仪空间均匀性测试研究

曹 盼¹, 许世军¹, 史小红¹, 袁 良^{2,3}, 占春连³

(1. 西安工业大学 理学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;
3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘 要: 空间均匀性是成像光谱仪辐射定标的核心参数之一。通过对国内外均匀性测试方法研究, 提出采用空间分布法对光栅式成像光谱仪的空间均匀性进行测试研究。该方法能准确给出各个位置点信号响应的详细分布, 对于提高并改善光栅式成像光谱仪的图谱质量具有重要的意义。空间分布法建立在高稳定性、高均匀性标准光源的基础上, 由计算机软件对测试结果进行图谱分离, 提取同波长下空间响应信号获得光栅式成像光谱仪的空间均匀性。最后分析了空间均匀性测量不确定度的影响因素, 并分析了空间均匀性对绝对辐射定标和光谱精度的影响。

关键词: 成像光谱仪; 光栅式成像光谱仪; 辐射定标; 空间均匀性

中图分类号: TN29; TH744.1

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0203003](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203003)

Research on spatial uniformity test of grating imaging spectrometer

CAO Pan¹, XU Shijun¹, SHI Xiaohong¹, YUAN Liang^{2,3}, ZHAN Chunlian³

(1. School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

3. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Spatial uniformity is one of the core parameters of the radiation calibration for imaging spectrometer. Based on the research on the test methods of uniformity at home and abroad, a spatial distribution method was proposed to test the spatial uniformity of the grating imaging spectrometer. The detailed distribution of the signal response at each position was accurately obtained by this method, which was of great significance for improving the image and spectrum quality of the grating imaging spectrometer. The spatial distribution method was established based on the standard light source with high stability and high uniformity, the test results were separated by the computer software, and the spatial uniformity of the grating imaging spectrometer was obtained by extracting the spatial response signal at the same wavelength. Finally, the influencing factors of the spatial uniformity measurement uncertainty were analyzed, and the influence of spatial uniformity on the absolute radiation calibration and the spectral accuracy was analyzed.

Key words: imaging spectrometer; grating imaging spectrometer; radiation calibration; spatial uniformity

引言

成像光谱仪既可以获取目标的光谱信息, 又可以获取目标的图像信息, 是“图谱合一”的先进光学仪器。成像光谱仪按照分光原理可分为光栅式成像光谱仪、傅里叶式成像光谱仪和滤光片式成像光谱仪等; 按光学成像系统可分为照相式成像

光谱仪和望远式成像光谱仪; 按分辨率可分为超光谱成像光谱仪、高光谱成像光谱仪和多光谱成像光谱仪; 按波段可分为紫外成像光谱仪、可见成像光谱仪、近红外成像光谱仪、中红外成像光谱仪和长波红外成像光谱仪等, 光栅式成像光谱仪因其技术成熟占据着主导地位^[1-2]。

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2020-01-03

基金项目: 国防科技工业技术基础研究科研计划项目 (JSJL2015208A003)

作者简介: 曹盼 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。Email: 1581461711@qq.com

各类成像光谱仪的分光技术、图谱分离技术及辐射定标技术等一直是光谱成像领域研究的核心,成像光谱仪的辐射定标主要包括空间均匀性、光谱辐射亮度响应度、直线性、辐射灵敏度和动态范围等,其中空间均匀性是成像光谱仪辐射参数定标的核心参数之一,也是评价成像光谱仪质量的重要参数^[3-5]。

1 空间均匀性测试方法研究

光栅式成像光谱仪空间均匀性是指同波长下、空间任一列各个像元点输出信号一致性的描述。是评价成像光谱仪光谱辐射亮度、光谱辐射亮度响应度、光谱畸变、图像畸变等的重要参数,是成像光谱仪辐射定标的核心参数之一。

1.1 国内外测试方法研究

目前国内外对均匀性的检测方法有很多,主要包括最大最小法、平均值法、空间分布法等^[6]。

1) 最大最小法

$$u_{x,y} = \frac{V_{\max}(i,j) - V_{\min}(i,j)}{V_{\max}(i,j) + V_{\min}(i,j)} \times 100\% \quad (1)$$

该方法是将最大辐射输出灰度信号 $V_{\max}(i,j)$ 和最小辐射输出灰度信号 $V_{\min}(i,j)$ 相减比上最大和最小辐射输出灰度信号相加,直接给出均匀性测试结果, (i,j) 代表二维平面内的任意像元点。由于采用最大与最小相加的方法,若灰度信号偏大,其均匀性测试结果比其他方法小了近一半。因此,该方法受其灰度信号影响比较大,并且不能给出均匀性的详细分布。

2) 平均值法

$$u_{x,y} = \frac{|V(i,j) - \bar{V}|_{\max}}{\bar{V}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 \bar{V} 是成像光谱仪整个 CCD 接收面上辐射输出灰度信号的平均值。该方法是目前常用的均匀性测试评价方法,其分子采用任意输出辐射灰度信号与平均值偏差最大的值,分母采用辐射灰度信号的平均值,采用偏差最大值的相对误差给出均匀性测试结果,同样不能反映均匀性在空间位置的详细分布情况。

3) 空间分布法

$$u_{x,y} = \frac{V(i,j) - V_0(i,j)}{V_{\max}(i,j) - V_{0\min}(i,j)} \quad (3)$$

式中 $V(i,j)$ 是任意位置点的辐射输出灰度信号; $V_0(i,j)$ 是与 $V(i,j)$ 对应像元点的背景杂光灰度信号; $V_{\max}(i,j)$ 是最大辐射输出灰度信号; $V_{0\min}(i,j)$ 是

与 $V_{\max}(i,j)$ 对应像元点的背景杂光灰度信号。空间分布法通过计算空间各个位置点相对最大辐射输出灰度信号的百分比,给出各个位置点检测的详细情况,凸显均匀性的空间位置分布。

通过对以上 3 种方法的比较研究,方案采用空间分布法对光栅式成像光谱仪空间均匀性进行测试研究,提取同波长下光谱信号并详细给出均匀性随空间位置的精细分布。

1.2 光栅式成像光谱仪空间均匀性测试研究

理想情况下,当用高稳定性、高均匀性标准光源对光栅式成像光谱仪空间均匀性进行测试时,认为光栅式成像光谱仪在同一波长下的光谱辐射信号是相等的。如果成像光谱仪的空间均匀性足够好,那么成像光谱仪的辐射输出灰度信号也应该是相等的。但是由于受成像镜头、分光系统、面元 CCD 材料和制作工艺的影响,导致最终输出信号在空间分布上发生了很大变化。

根据光栅式成像光谱仪的分光和工作原理,图 1 为光栅式成像光谱仪对目标扫描时任意一列经过入射狭缝和立体光栅分光后展开后的光谱图, y 轴代表光栅式成像光谱仪对目标的扫描方向, λ 代表波长方向, x 表示像面上与 λ 方向垂直的方向, $x\lambda$ 平面代表 y 轴上任意一列在空间按波长展开的光谱图像, (x,y,λ) 确定一个唯一的空间像元点。光栅式成像光谱仪可以直接获得光谱信息,图像信息则需要进行图谱分离后,将不同波长的信号按照图像亮度和色度要求进行三维建模完成图像重构,才能获得图像信息。

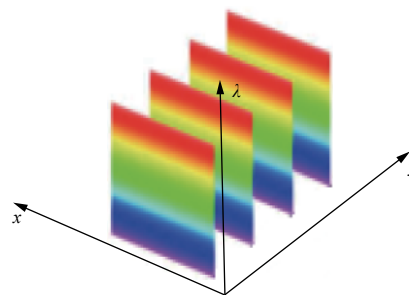


图 1 光栅式成像光谱仪条纹图

Fig. 1 Raster image of grating imaging spectrometer

根据图 1 的图谱信息,提取在 x 轴方向上任意一列波长的输出灰度信号,参见图 2,横坐标为 x 轴方向像元的空间位置,纵坐标为图 1 中 x 轴方向任意一列同波长条纹的输出灰度信号,用于表示同波长下光栅式成像光谱仪空间任一列各个像元点的辐射输出灰度信号。

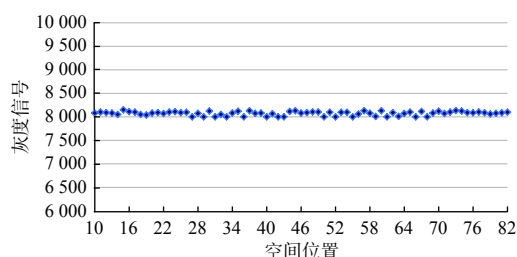


图2 空间均匀性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spatial uniformity

根据光谱辐射理论,光栅式成像光谱仪在扫描均匀的标准面光源光斑时,空间某列任意一点光谱展开后都形成二维的光谱辐射分布,其光谱辐射亮度 $L(x,y,\lambda)$ 和对应的辐射输出灰度信号有以下关系:

$$L(x,y,\lambda) = \frac{V(x,y,\lambda)}{R(x,y,\lambda)} \quad (4)$$

式中 $V(x,y,\lambda)$ 为在标准面光源照射下,光栅式成像光谱仪在面阵 CCD 像元点 (x,y,λ) 输出的灰度信号, $R(x,y,\lambda)$ 为对应像元点的光谱辐射亮度响应度。光谱辐射亮度响应度与成像光谱仪的光栅的衍射效率、光学系统光谱透过率、探测器的光谱辐射亮度响应度均成正比。

根据对国内外方法研究,根据(3)式采用空间分布法,光栅式成像光谱仪的均匀性表示如下:

$$u_\lambda(x,y) = \frac{V(x,y,\lambda) - V_0(x,y,\lambda)}{V_{\max}(x,y,\lambda) - V_{0m}(x,y,\lambda)} \times 100\% \quad (5)$$

将(4)式带入(5)式,忽略背景噪音的影响,则有如下关系:

$$u_\lambda(x,y) = \frac{L(x,y,\lambda) \cdot R(x,y,\lambda)}{L_{\max}(x,y,\lambda) \cdot R_{\max}(x,y,\lambda)} \quad (6)$$

式中: $u_\lambda(x,y)$ 表示某波长下光栅式成像光谱仪空间均匀性; $L(x,y,\lambda)$ 表示任意像元点 (x,y,λ) 的标准光谱辐射亮度; $L_{\max}(x,y,\lambda)$ 表示最大光谱辐射亮度; $V(x,y,\lambda)$ 为像元点 (x,y,λ) 的灰度信号; $V_0(x,y,\lambda)$ 为与 $V(x,y,\lambda)$ 对应像元点的背景灰度信号; $V_{\max}(x,y,\lambda)$ 表示与最大光谱辐射亮度对应的最大灰度信号; $V_{0m}(x,y,\lambda)$ 是与 $V_{\max}(x,y,\lambda)$ 相对应像元点的背景信号; $R(x,y,\lambda)$ 为像元点 (x,y,λ) 的光谱响应度; $R_{\max}(x,y,\lambda)$ 表示最大光谱辐射亮度响应度。

若光源均匀性足够好,同波长下光源的光谱辐射亮度都是近似相等的,则光栅式成像光谱仪的空间均匀性,即(6)式可简化为

$$u_\lambda(x,y) = \frac{R(x,y,\lambda)}{R_{\max}(x,y,\lambda)} \quad (7)$$

(7)式也是光栅式成像光谱仪对同一波长下的空间相对响应度,是光栅式成像光谱仪光谱辐射定标的特征参数。

光栅式成像光谱仪的绝对定标参数主要为光谱辐射亮度响应度,而光栅式成像光谱仪的光谱辐射亮度响应度与常规光谱辐射计相比更为复杂,通常包含了三个维度的光谱辐射亮度响应度:在波长维度的一维光谱辐射亮度响应度和二维像面上的空间相对响应度,在理想条件下,可用空间均匀性表示光栅式成像光谱仪的空间相对响应度。

若光栅式成像光谱仪的空间相对响应度足够好,且忽略背景信号的影响,则(6)式简化为:

$$u_\lambda(x,y) = \frac{L(x,y,\lambda)}{L_{\max}(x,y,\lambda)} \quad (8)$$

从(8)式可知,光栅式成像光谱仪的空间均匀性测试结果能够表征被测目标光源辐射信号在空间的分布情况。在光栅式成像光谱仪中,该参数通常被用于几何图像、辐射温度场等测试分析。在图谱信息采集和分析领域具有重要的应用。另外,成像光谱仪接收面上的各个点的 $u_\lambda(x,y)$ 值越趋近 1,则成像光谱仪的空间均匀性越好, $u_\lambda(x,y) = 1$ 是理想情况。获得每个点的 $u_\lambda(x,y)$ 后,可得出整个成像光谱仪接收面的空间均匀性。

2 光栅式成像光谱仪空间均匀性测试装置

光栅式成像光谱仪空间均匀性的测试装置根据其成像系统的要求而设计,当成像系统为望远光学系统时,需要设计准直光学系统;当成像系统为照相光学系统时,则直接对准积分球光源进行测试。

本文选取带望远系统的光栅式成像光谱仪进行测试实验,其测试装置主要由大口径标准积分球光源系统及其供电系统、光学准直系统和计算机测试软件等组成,其光路图如图3所示。

大口径标准积分球光源系统主要由大口径标准积分球、一组标准卤素灯光源及其供电系统等组成,提供直径为 1 000 mm、输出口径为 200 mm、波长范围为 300 nm~2 000 nm 的非常均匀的大口径光斑;光学准直系统主要由离轴抛物镜、平面反射镜和精密调整机构等组成,为光栅式成像光谱仪提供准直光平行光,模拟无限远目标。

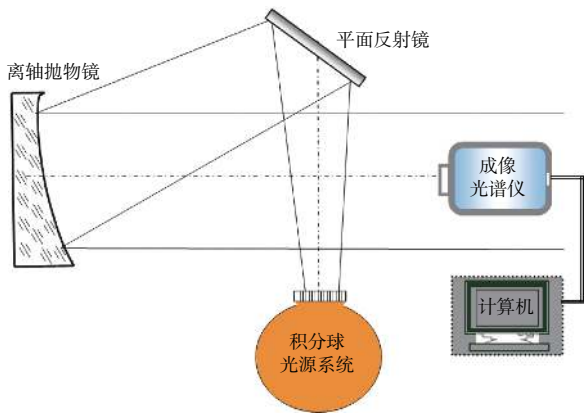


图3 光栅式成像光谱仪空间均匀性校准装置图

Fig.3 Calibration device diagram of grating imaging spectrometer spatial uniformity

实际测试时,光栅式成像光谱仪放置在平行光路中并对准平行光路,从积分球出口光束入射到平面反射镜上,被平面反射镜反射后到达离轴抛物镜,输出平行光;平行光进入光栅式成像光谱

仪后,经成像光谱仪的成像、分光和数据采集后由计算机处理系统根据(5)式建立的数学模型进行处理,得到光栅式成像光谱仪空间均匀性测试结果^[7-10]。

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

空间均匀性是影响成像光谱仪辐射定标的重要因素,需要给出相同波长下成像光谱仪输出信号的一致性。因此需要对其采集的大量光谱和信号数据按照波长和空间位置进行数据重新排列和组合,从光谱中提取信号数据输出空间均匀性的测量结果^[11-12]。

通过搭建光栅式成像光谱仪空间均匀性测试装置后进行实验测试,给出光栅式成像光谱仪在可见光波段内的空间均匀性测试数据。表1是随机选择的光栅式成像光谱仪空间均匀性测试部分数据。

表1 空间均匀性测试部分数据

Table 1 Part of data of spatial uniformity test

第 <i>i</i> 行波长/nm	信号相对强度	第 <i>i</i> +1行波长/nm	信号相对强度	第 <i>i</i> +2行波长/nm	信号相对强度	第 <i>i</i> +3行波长/nm	...
1 002.685 2	6 680	1 002.685 2	6 769	1 002.685 2	6 813	1 002.685 2	...
1 008.950 8	6 672	1 008.950 8	6 787	1 008.950 8	6 846	1 008.950 8	...
1 015.216 4	6 654	1 015.216 4	6 791	1 015.216 4	6 867	1 015.216 4	...
1 021.482	6 749	1 021.482	6 793	1 021.482	6 905	1 021.482	...
1 027.747 6	6 758	1 027.747 6	6 882	1 027.747 6	6 877	1 027.747 6	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

根据测试数据和均匀性测试数学模型,分离图谱数据,提取同波长下空间均匀性的测试结果,在可见光波段随机选择波长为375 nm、488 nm、649 nm、853 nm空间均匀性数据,绘制成均匀性曲线图,参见图4。其中横坐标为同列像元点的空间位置,纵坐标为空间均匀性数值。

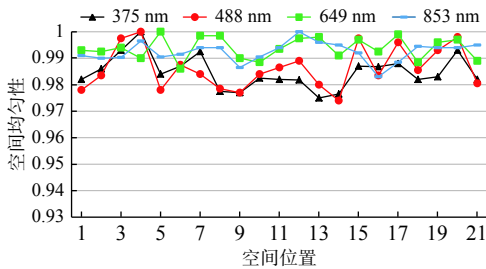


图4 可见光成像光谱仪空间均匀性测试结果

Fig.4 Test results of visible light imaging spectrometer spatial uniformity

空间分布法给出了每个像元点的空间均匀性分布情况,最终给出的结果由偏离1最远的点表示。由图4可以看出,波长为488 nm时光栅式成像光谱仪的空间均匀性最差,为97.4%;波长为649 nm时光栅式成像光谱仪的空间均匀性最好,为98.6%。

在近红外波段选取1 390 nm、1 497 nm、1 798 nm等波长点绘制成曲线图,如图5所示,波长为1 798 nm

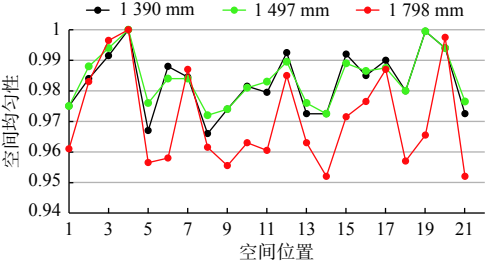


图5 近红外成像光谱仪均匀性测试结果

Fig.5 Test results of near-infrared imaging spectrometer spatial uniformity

时光栅式成像光谱仪的空间均匀性最差,为95.2%;波长为1 497 nm时光栅式成像光谱仪的空间均匀性最好,为97.2%。

3.2 光栅式成像光谱仪空间均匀性的影响因素分析

影响望远式光栅式成像光谱仪空间均匀性的因素主要有:标准积分球光源的均匀性、光学准直系统的均匀性、系统杂散光带来的影响、系统重复性测量引入的不确定度等^[13-15]。

1) 标准积分球光源的均匀性以及稳定性

由标准积分球光源使用说明书和均匀性测量结果可知,标准积分球光源均匀性的测量结果为1.7%,供电电源在1 h内稳定性为0.1%。因此,标准积分球光源带来的总测量不确定度为1.8%。

2) 成像光学系统的均匀性

由离轴抛物镜的设计说明、测量结果和实验可知,成像光学系统的均匀性带来的测量不确定度为1.2%。

3) 系统杂散光带来的影响

由杂散光实验和光学系统的调试可知,系统杂散光的影响对弱光信号的测试影响较大,当信噪比为10:1时,影响为10%,信噪比为100:1,由杂散光引入的测量不确定度为0.8%。

4) 系统重复性测量引入的不确定度

采用单元探测器对标准积分球光源的输出信号进行二维扫描,可扣除因阵列探测器空间不均匀性引起的影响,由于采用相对法进行测量和计算,因此重复性测量不确定度为2.0%。

综合以上分析,各分量之间独立不相关。按均匀分布 $k=2$ 计算,测量结果的合成测量不确定度,按(9)式计算,计算结果为1.6%。

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 \quad (9)$$

k 取2时,测量不确定度为3.2%。

4 空间均匀性对光栅式成像光谱仪光谱辐射定标的影响分析

光栅式成像光谱仪的图像信息是经图谱分离、图像重构而得到的,空间均匀性的好坏直接影响成像光谱仪是否能够精确获得目标的图谱信息,也是成像光谱仪辐射定标的核心参数之一。

4.1 对光谱精度的影响

空间均匀性是描述各个位置点对光信号响应能力一致性的参数,理想的成像光谱仪在相同波

长下其输出没有光谱畸变。但是由于空间均匀性的影响,导致各个像元的输出信号产生偏差,从而发生了光谱畸变,导致光谱精度下降,影响成像光谱仪对目标信号的探测精度以及图谱特性。

为了考核空间均匀性对光谱精度的影响,项目组设计了4组大口径窄带滤光片,挑选其中的2组进行实验,峰值波长分别为649 nm、1 390 nm。测试中将大口径窄带滤光片安装在积分球光源的出口,从积分球出射的光经过窄带滤光片、准直光学系统后成像在成像光谱仪的入口处,由成像光谱仪和计算机进行采集和数据处理。

图6是标准波长为649 nm时成像光谱仪的光谱不同位置的测量结果,其均匀性为98.6%,光谱畸变为5 nm。

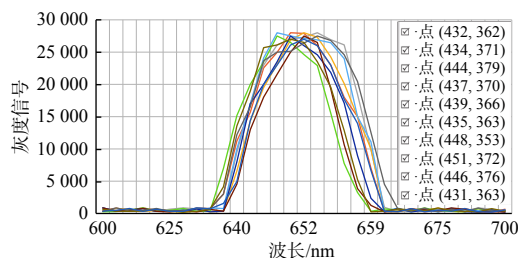


图6 标准波长为649 nm时成像光谱仪的光谱畸变测量结果

Fig. 6 Test results of imaging spectrometer spectrum distortion at wavelength of 649 nm

图7是标准波长为1 390 nm时成像光谱仪的光谱不同位置的测量结果,其均匀性为96.6%,波峰1对应位置为与波峰之间的最大偏差为15 nm,即该成像光谱仪的光谱畸变为15 nm。

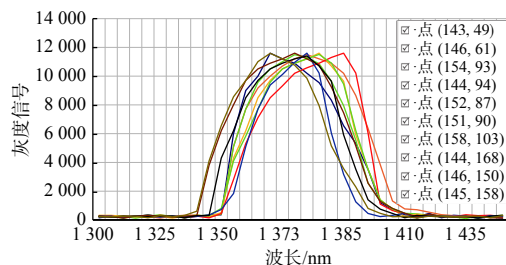


图7 标准波长为1 390 nm时成像光谱仪的光谱畸变测量结果

Fig. 7 Test results of imaging spectrometer spectrum distortion at wavelength of 1 390 nm

由实验可知,光栅式成像光谱仪光谱精度与空间均匀性具有直接的关系。当其他条件不变时,空间均匀性越差,光谱畸变越大,光谱精度也就越差。

4.2 对绝对辐射定标的影响

绝对辐射定标是光栅式成像光谱仪的核心技术指标, 光栅式成像光谱仪的绝对定标一般是对光谱辐射亮度的定标。由于光栅式成像光谱仪受光栅分光系统、面阵 CCD 及其数据采集稳定性、内部杂散光及光学成像系统畸变等综合因素的影响, 其输出结果在相同波长下空间均匀性偏差很大, 导致在不同位置的光谱辐射亮度的测试结果产生很大差异, 严重影响成像光谱仪的图谱质量。

从(7)式光栅式成像光谱仪均匀性测试讨论可知, 理想条件下, 可用空间均匀性表示光栅式成像光谱仪的空间相对响应度, 是光栅式成像光谱仪绝对辐射定标的核心参数之一, 该参数的定标结果直接影响光栅式成像光谱仪的最终测试结果。

从图4可见光栅式成像光谱仪空间均匀性测试结果可知, 该光栅式成像光谱仪空间均匀性在波长为 488 nm 时为 97.4%, 波长为 649 nm 时为 98.6%。根据误差理论, 对光栅式成像光谱仪辐射定标分量精度带来 2.6% 的影响。

从图5近红外成像光谱仪测试结果可知, 波长为 1 798 nm 时光栅式成像光谱仪的空间均匀性最差, 为 95.2%。波长为 1 497 nm 时光栅式成像光谱仪的空间均匀性最好, 为 97.2%。因此, 对光栅式成像光谱仪辐射定标精度带来 4.8% 的影响。

从图4、图5的测试结果可知, 近红外光栅式成像光谱仪的空间均匀性比可见光栅式成像光谱仪的空间均匀性好, 这也是现阶段可见光栅式成像光谱仪比近红外光栅式成像光谱仪测试精度高的原因之一。

5 结论

随着光栅式成像光谱仪的推广和应用, 对其图谱质量的评定要求越来越高。空间均匀性的好坏直接影响成像光谱仪光谱辐射亮度、光谱辐射亮度响应度、光谱畸变、图像畸变等, 也是成像光谱仪辐射定标的核心参数之一。文章提出了应用空间分布法对光栅式成像光谱仪的空间均匀性进行测试研究, 并搭建了带望远系统的光栅式成像光谱仪空间均匀性测试装置, 对可见光波段和近红外波段的空间均匀性进行了测试, 分析了空间均匀性对绝对辐射定标和光谱畸变的影响, 为光栅式成像光谱仪获取高精度辐射定标提供依据, 对于改善和提高光栅式成像光谱仪的图谱质量具有重要的意义。

参考文献:

- [1] HAN Jun, CHANG Bo, LU Shaojun, et al. SVM raster imaging spectrometer image distortion calibration method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3099-3104.
韩军, 常波, 路邵军, 等. SVM的光栅成像光谱仪图像畸变校准方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 3099-3104.
- [2] XIANG Libin, JI Zhongying, HUANG Min, et al. On the calibration of the spatially modulated imaging fourier transform spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 850-853.
相里斌, 计忠英, 黄旻, 等. 空间调制干涉光谱仪定标技术研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(7): 850-853.
- [3] YUAN Linguang, FAN Jihong, ZHOU Xiaoguang, et al. Research on near-UV to near-IR spectroradiometer and its calibration method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 478-482.
袁林光, 范纪红, 周晓光, 等. 近紫外到近红外光谱辐射计及定标方法研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(3): 478-482.
- [4] HAN Jun, LI Xun, WU Lingling, et al. Optical system design of grating-based imaging spectrometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 233-239.
韩军, 李珣, 吴玲玲, 等. 一种光栅型成像光谱仪光学系统设计[J]. *应用光学*, 2012, 33(2): 233-239.
- [5] FAN Jihong, ZHAO Shenglu, ZHAN Chunlian. Absolute radiometric calibration technique of imaging spectrometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 629-632.
范纪红, 赵生禄, 占春连. 成像光谱仪绝对辐射定标技术研究[J]. *应用光学*, 2013, 34(4): 629-632.
- [6] LIU Bohan, LAI Min, XIAO Shaorong. Method for detecting far-field spot uniformity of optical fiber output[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 356-362.
刘博涵, 赖敏, 肖韶荣. 光纤输出远场光斑均匀性检测方法的研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 356-362.
- [7] SUN Zhiyuan, CHANG Songtao, ZHU Wei. Simplified method for radiation calibration of medium wave infrared detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2132-2137.
孙志远, 常松涛, 朱玮. 中波红外探测器辐射定标的简化方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2132-2137.
- [8] CUI Jicheng, ZHU Jiwei, CUI Hong, et al. Research on radiation calibration technology of micro spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 49(7): 881-885.

- 崔继承, 朱继伟, 崔弘, 等. 微型光谱仪辐射定标技术研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(7): 881-885.
- [9] ZHANG Mengya, YUAN Yinlin, ZHAI Wenchao, et al. Design and detection of wide dynamic range infrared integrating sphere radiation source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019(6): 1-17.
- 张梦雅, 袁银麟, 翟文超, 等. 宽动态范围红外积分球辐射源的设计与检测[J]. *光学学报*, 2019(6): 1-17.
- [10] LIANG Pei. Study on the collimation characteristics of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006(6): 909-913.
- 梁培. 离轴抛物镜准直特性的研究[J]. *光学学报*, 2006(6): 909-913.
- [11] GAO Xiaohui. Research on hyperspectral data processing technology[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2013: 22-97.
- 高晓惠. 高光谱数据处理技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013: 22-97.
- [12] WU Zhenzhou. Mini Offner imaging spectrometer and spectral data processing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012: 10-82.
- 吴振洲. 微型Offner成像光谱仪和光谱数据处理[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012: 10-82.
- [13] FAN Qiaocheng, KUANG Rong, XING Chenggang, et al. On the relationship between measurement uncertainty and error theory[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(3): 380-384.
- 范巧成, 匡荣, 邢成岗, 等. 试论测量不确定度与误差理论的关系[J]. *计量学报*, 2017, 38(3): 380-384.
- [14] LI Youping, YU Bingxi, WANG Yupeng, et al. Measurement chain and uncertainty of imaging spectrometer radiation calibration impact[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006(5): 822-828.
- 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. *光学精密工程*, 2006(5): 822-828.
- [15] WANG Chengzhong. Verification method of measurement uncertainty and its application examples[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis(Part A: Physical Testing)*, 2008(10): 550-553.
- 王承忠. 测量不确定度的验证方法及其应用实例[J]. *理化检验(物理分册)*, 2008(10): 550-553.