

一种基于柱面反射镜的紫外/可见光成像光谱仪

唐 义 张止戈 陈廷爱 南一冰 黄河清 倪国强

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 通过柱面反射镜调整光谱仪子午面与弧矢面光焦度,有效地校正了系统的像散。同时分析了 Czerny-Turner 结构成像光谱仪的球差、彗差及校正方法,通过控制系统 F 数校正球差,通过控制准直镜与聚焦镜的离轴角达到校正彗差的目的。利用基于蒙特-卡罗方法的成像光谱仪的公差分析方法,设计了一套成像光谱仪样机,样机的工作波段为 200~700 nm,在紫外波段和可见光宽波段范围内均实现了像差的校正,狭缝方向上空间分辨率达到 320 pixel,光谱仪的焦距 $f'=100$ mm, F 数为 5.2,全波段光谱分辨力优于 2 nm。

关键词 光学设计;成像光谱仪;公差分析;波长定标

中图分类号 O433.1; TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0330004

Design of Visible-Ultraviolet Cylinder Mirror Imaging Spectrometer

Tang Yi Zhang Zhige Chen Tingai Nan Yibing
Huang Heqing Ni Guoqiang

(Key Laboratory of Photo-Electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China,
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract By adjusting the difference of spectrometer focal power in tangential plane and sagittal plane with cylinder mirror, the astigmatism of the spectrometer is corrected. The sphere aberration and the coma of Czerny-Turner spectrometer is also analyzed. The sphere aberration is controlled by the F number of the optical system. The coma is corrected by adjusting off-axis angles of the collimation mirror and the focus mirror. A prototype of wide band cylinder mirror imaging spectrometer is developed using imaging spectrometer tolerance analysis method based on Monto-Carlo simulation. The prototype works in 200~700 nm, and its aberrations are also corrected in such wide band. The spatial resolution in slit direction is 320 pixel. The focal length of the prototype $f'=100$ mm and its F number is 5.2. The spectral resolution in whole band is smaller than 2 nm.

Key words optical design; imaging spectrometer; tolerance analysis; spectral calibration

OCIS codes 300.6190; 120.4570; 120.6200

1 引 言

成像光谱技术是一种将成像技术和光谱技术相结合的新型多维信息获取技术,它能够得到被探测目标的空间信息和光谱信息。国内外的科研机构 and 学者对光栅色散型成像光谱仪像差校正方法进行了广泛的研究,2002年,Futamata等^[1]提出利用超环面校正 Czerny-Turner 结构的像散,2009年,薛庆生等^[2,3]设计出了紫外波段的成像光谱仪,2010年,Lee等^[4]设计出基于柱面透镜结构的成像光谱仪。近年来基

于 Czerny-Turner 结构的改进型成像光谱仪已应用到远紫外光谱探测领域^[5,6],同时基于凸面光栅结构的成像光谱仪研究也取得了一定的进展^[7]。

本文在上述研究的基础上,提出了运用柱面反射镜校正成像光谱仪系统像散的方法,实现了在 200~700 nm 宽光谱范围内校正系统像散,并最终设计了一套基于柱面反射镜的 200~700 nm 宽波段成像光谱仪系统,同时对系统进行了公差分析。研制出了一套原理样机,对仪器进行了波长定标及

收稿日期: 2012-12-03; **收到修改稿日期**: 2012-12-28

基金项目: 国家 863 计划 (2009AA01Z225)、国家 973 计划 (2009CB724005) 和工业技术基础项目 (J312012B002) 资助课题。

作者简介: 唐 义 (1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事紫外光通信和紫外成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn

分辨率检测。

2 紫外可见光成像光谱仪系统与像差校正

传统的 Czerny-Turner 结构由两块小的凹球面反射镜与一块平面衍射光栅组成,两块小球面反射镜分别作为准直镜和聚焦镜,它们的曲率中心重合,平面衍射光栅位于它们的焦平面附近。入射光经准直镜准直后,由平面光栅色散,最后聚焦镜将狭缝按波长成像在焦平面上。本文设计的成像光谱仪基本光路结构基于 Czerny-Turner 型结构,如图 1 所示。

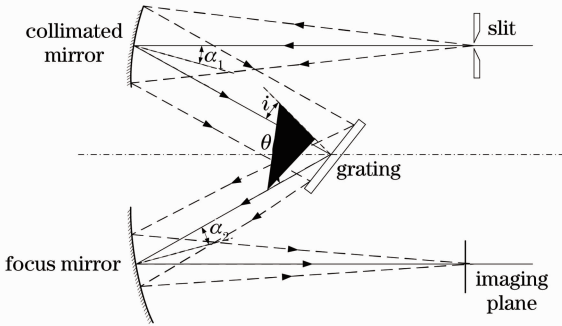


图 1 成像光谱仪结构原理图

Fig. 1 Schematic of the imaging spectrometer

2.1 系统基本参数计算

图 1 中聚焦镜的焦距为 f'_2 ,根据色散方向像面的大小 D_d 和光栅常数 d ,利用光栅线色散方程可计算出聚焦镜的焦距:

$$\frac{f'_2 m}{d \cos \theta} = \frac{D_d}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad (1)$$

式中 m 为光栅的衍射级次, θ 为光栅衍射角, λ_1, λ_3 分别为系统的边缘波长。在像面上得到的各波段图像实际上是光谱仪狭缝的像,光谱仪对狭缝的放大率 β 为

$$\beta = -\frac{f'_1}{f'_2}, \quad (2)$$

式中 f'_1 为光谱仪准直镜的焦距。当狭缝放大率 β 确定时,根据(2)式可得到 f'_1 的取值。狭缝的像宽度直接决定了系统的光谱分辨率。

2.2 系统像差分析与校正

设计系统孔径时,需要考虑系统的 F 数以及系统的球差,在成像光谱仪中将球差校正到允许的范围仅需满足^[8]:

$$f' \leq 256\lambda \cdot F^4, \quad (3)$$

式中 f' 为凹球面反射镜的焦距。Czerny-Turner 型成像光谱仪中的准直反射镜和聚焦反射镜都在离轴

情况下使用,会产生一定的彗差,既降低了光谱分辨率,也容易形成假谱线,因此必须将彗差校正到合理的范围之内。Shafer 等^[9]提出 Czerny-Turner 结构在平行光照射光栅的情况下消彗差的方法,即在特定波长处完全消除彗差只需准直反射镜与聚焦反射镜的离轴角 α_1 与 α_2 满足:

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \left(\frac{\cos i}{\cos \theta} \right)^3 \left(\frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \right)^3, \quad (4)$$

式中 r_1 与 r_2 分别为准直镜与聚焦镜的曲率半径。像散是影响 Czerny-Turner 成像光谱仪像差的最主要因素,而光谱仪系统的像散是由于子午面与弧矢面的光焦度不同造成的。这是由于光谱仪准直反射镜和聚焦反射镜均采用离轴入射方式,而反射镜子午方向曲率半径 r_T 与弧矢方向曲率半径 r_S 相同,因此导致反射镜光焦度在子午面与弧矢面不等。球面反射镜子午面光焦度 φ_T 和弧矢面光焦度 φ_S 可表示为^[10]

$$\varphi_T = 2/(r_T \cos \alpha), \quad (5)$$

$$\varphi_S = (2/r_S) \cos \alpha, \quad (6)$$

式中 α 为反射镜的离轴角。光焦度之差 $\Delta\varphi$ 反映像散的大小,其表达式为

$$\Delta\varphi = \varphi_T - \varphi_S. \quad (7)$$

而整个 Czerny-Turner 型成像光谱仪系统子午面光焦度与弧矢面光焦度之差可表示为

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = (\varphi_{T_1} - \varphi_{S_1}) + (\varphi_{T_2} - \varphi_{S_2}). \quad (8)$$

(8)式说明了整个系统的子午面与弧矢面的光焦度之差与每片离轴球面反射镜子午面与弧矢面的光焦度之差的关系。因此可以通过减小系统在子午面的聚光能力或增大系统在弧矢面的聚光能力以达到校正光谱仪系统像散的目的。加入凹柱面反射镜是可行的方案。凹柱面反射镜可以增加系统在弧矢面的光焦度,从而使 $\Delta\varphi = 0$,达到校正像散的目的。柱面反射镜在弧矢面的光焦度 φ_C 和曲率半径 r_C 可分别表示为

$$\varphi_C = \left(\frac{2}{r_1 \cos \alpha_1} - \frac{2}{r_1} \cos \alpha_1 \right) + \left(\frac{2}{r_2 \cos \alpha_2} - \frac{2}{r_2} \cos \alpha_2 \right), \quad (9)$$

$$r_C = \frac{2}{\varphi_C}. \quad (10)$$

2.3 设计实例

根据上述的设计方法设计了一套工作波段为 200~700 nm 的宽波段成像光谱仪。通过加入柱面反射镜,实现了在紫外波段和可见光波段宽光谱范

围内系统像散的校正。成像光谱仪探测器面阵大小为 $8.2\text{ mm}\times 8.2\text{ mm}$ 。取准直反射镜和聚焦反射镜的曲率半径分别为 $r_1=228.60\text{ mm}$ 、 $r_2=210.73\text{ mm}$ 。利用光学仿真软件 Zemax 对初始设计的参数进行优化,得到的优化后系统的参数如表 1 所示。图 2 为设计系统的最终光路结构图。

表 1 成像光谱仪参数

Table 1 Parameters of the imaging spectrometer

Characteristics	Value
Wavelength range	200~700 nm
Focal length	100 mm
F number	5.2
Slit dimensions	6.0 mm×0.4 mm
Detector array size	512 pixel×512 pixel
Detector pixel size	16 $\mu\text{m}\times 16\text{ }\mu\text{m}$

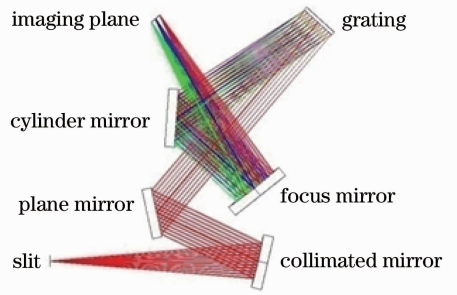


图 2 成像光谱仪光路结构图

Fig. 2 Optical path of the imaging spectrometer

系统各视场点列图半径的均方根值(RMS)随波长的变化如图 3 所示,从图中可以看出在全波段范围内,系统的点列图半径小于 $13\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 4 为设计的成像光谱仪三个波长(237 nm、438 nm和 613 nm)的调制传递函数(MTF)曲线。全视场、全波段 MTF 值在 20 lp/mm 处均在 0.5 以上。

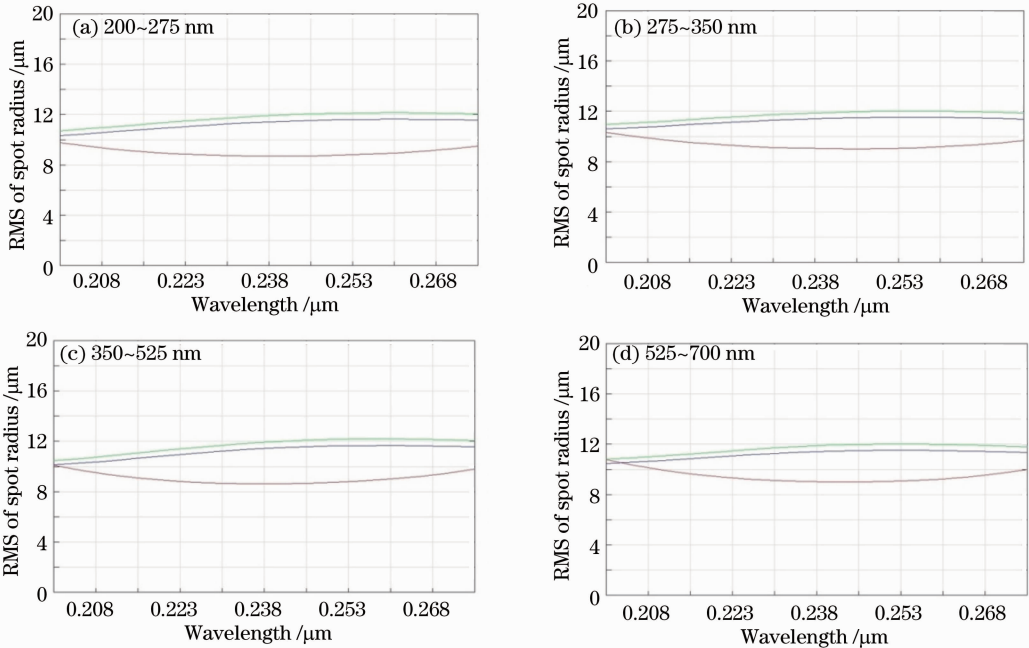


图 3 点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线

Fig. 3 Curves of variation of RMS of spot radius with wavelength

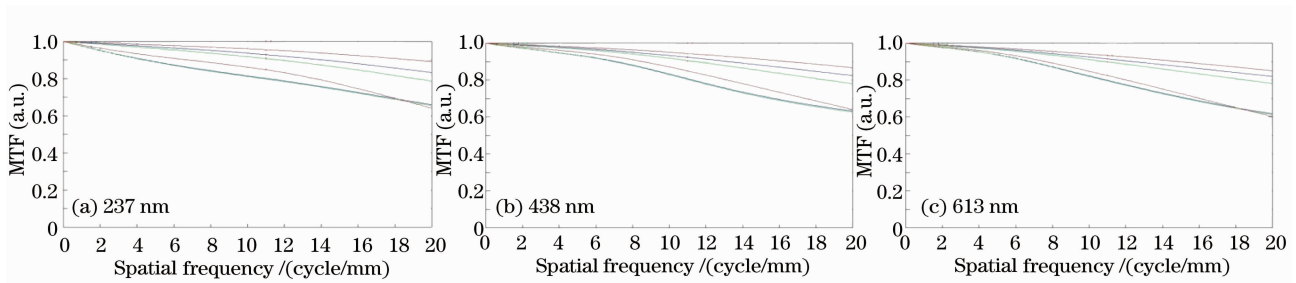


图 4 光学系统的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves of the optical system

2.4 系统公差分析

在成像光谱仪设计过程中要考虑各种误差对仪器工作效果的影响,误差主要分为两类:1)加工误差;2)装调误差。加工误差主要是指各反射镜的加工误差和仪器结构件的加工误差;装调误差主要是指光学件安装固定时空间位置的误差。各种加工误差无法弥补,但是通过合理的结构设计与元件装调,可以有效地减小系统的装调误差。

采用蒙特-卡罗方法^[11]对成像光谱仪系统进行公差分析,其基本思想是随机产生多个成像光谱仪系统,系统之间各元件的公差各不相同,但都在制定的公差范围内,通过分析这些存在公差的系统的工作质量,可以近似地得到实际系统的工作质量。同时确定哪几种公差对系统影响较大。表2为成像光谱仪的公差类型和公差范围。

表2 成像光谱仪公差

Table 2 Tolerance of the imaging spectrometer

Tolerance type	Value
Radius of mirror /mm	0.2
Thickness between elements /mm	1.0
Decentering of elements /mm	0.5
Tilt of elements /($^{\circ}$)	0.5

令所有反射镜半径与样板的偏差为0.2 mm,各元件间的距离误差为1 mm。由于系统为全反射式系统,因此只需考虑元件的旋转误差与偏心误差,不再单独设立反射面的旋转与偏心误差。元件的偏心误差设为0.5 mm,旋转误差设为 0.5° 。使用系统在20 lp/mm处的MTF作为误差系统的评价函数,通过分析就可大致了解成像光谱仪的工作质量。Zemax软件的分析结果给出了对系统影响最大的10种公差以及存在这些公差时系统的MTF,如表3所示。

表3 对系统影响最大的公差

Table 3 Tolerance influencing the system most

Type	Position	Criterion
TETX	collimating mirror	0.042
TETX	focus mirror	0.097
TETX	collimating mirror	0.146
TETY	mirror	0.153
TETY	mirror	0.153
TETY	cylinder mirror	0.177
TETY	cylinder mirror	0.177
TETX	mirror	0.184
TETX	mirror	0.281
TETY	collimating mirror	0.290

TETX: Tolerance on element tilt in $x/(^{\circ})$. TETY: Tolerance on element tilt in $y/(^{\circ})$

由表3可以看出,对仪器影响最大的误差为光学元件的旋转误差,因此在设计各反射镜固定件时,要充分考虑其水平旋转与垂直俯仰的可调性。图5为装调完成的紫外可见光成像光谱仪。

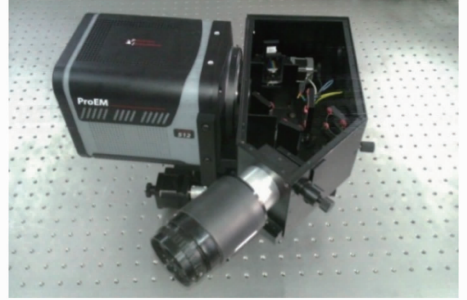


图5 紫外可见光成像光谱仪样机

Fig. 5 Prototype of imaging spectrometer

3 测试与分析

3.1 波长定标

对装调出的成像光谱仪原理样机进行波长定标。波长定标分为谱线选择,谱线与波长配对以及回归分析3个步骤。谱线选择是从拍摄图像中提取多行数据进行分析,从中选取有效谱线。谱线与波长配对是确定谱线响应峰的像元坐标与标准波长的对应关系。定标过程中采用高斯函数作为谱线响应峰的拟合函数,并用其顶点坐标作为谱线响应峰的坐标。进行回归分析,确定像元坐标与波长的对应关系^[12]。用低压汞灯和655 nm激光器对印有黑白间隔条纹的纸板进行照明,通过光谱仪原理样机对纸板进行观察。图6为光谱仪拍摄的4个波段光谱图像,其中图6(a)对应激光器光谱图像,图6(b)~(d)为汞灯光谱图像,对每幅图像第256行的数据进行提取,得到数据如图7所示,其中1号谱线为655 nm激光光谱,其余12条谱线对应汞灯的光谱。

根据谱线筛选条件,选出13条谱线,用高斯函数对这些谱线进行曲线拟合,将拟合曲线顶点作为峰位点,将2号谱线及3号谱线作为汞灯577 nm和579 nm的特征谱线,将汞灯的其他谱线和标准谱线一一对应得到结果如表4所示。

在完成谱线与波长配对后,需要建立波长和CCD行像元序号之间的函数关系,通过该函数模型可以得到像素位置和光谱位置的对应关系,完成波长定标。由于在工作波段范围内光栅线色散变化不大,光谱在CCD上近似成线性排列。因此,考虑建立一元线性回归模型^[13]:

$$\lambda = \beta_0 + \beta_1 i, \quad (11)$$

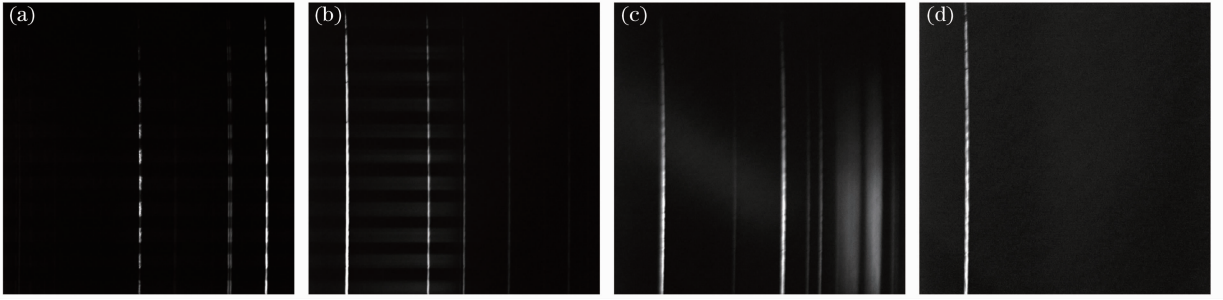


图 6 激光器与汞灯的光谱图像

Fig. 6 Spectral images of laser device and Hg-lamp

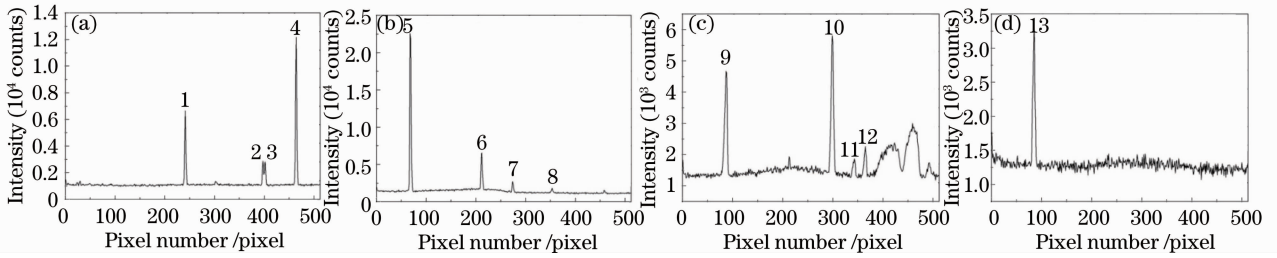


图 7 激光器及汞灯谱线

Fig. 7 Spectral line of laser device and Hg-lamp

表 4 谱线与像素数的关系

Table 4 Relationship of spectral line and pixel number

No.	Wavelength /nm	Pixel number /pixel
1	655.00	241.23
2	579.07	397.00
3	576.96	402.00
4	546.07	464.04
5	507.68	68.59
6	435.84	211.67
7	404.66	274.15
8	364.83	353.26
9	364.83	86.79
10	313.04	298.97
11	302.15	342.39
12	296.76	364.65
13	253.65	84.82

式中 λ 为波长, i 为 CCD 的行像元序号。采用最小二乘法来估计模型中的未知参数 β_0 和 β_1 。图 8 给出了 3 个波段的线性回归结果, 直线是回归直线, 从图中可以看出, 各谱线坐标点基本都在该直线上, 说明该函数模型较为理想。

3.2 光谱分辨力检测

汞灯有两根相邻很近的特征谱线(576.96 nm 和 579.07 nm), 通常通过检测仪器是否能分辨出这两条谱线来评价仪器的光谱分辨力。通过对图 6(a) 中的光谱图像进行部分截取得到图 9(a) 所示的汞灯谱线图, 同时提取其中的一行数据得到图 9(b) 所示谱线图, 从中可以清楚地分辨出汞灯的这两条谱线, 说明仪器的光谱分辨为达到了 2 nm。

3.3 成像分辨率测试

在可见光波段对光谱仪进行了成像分辨率检

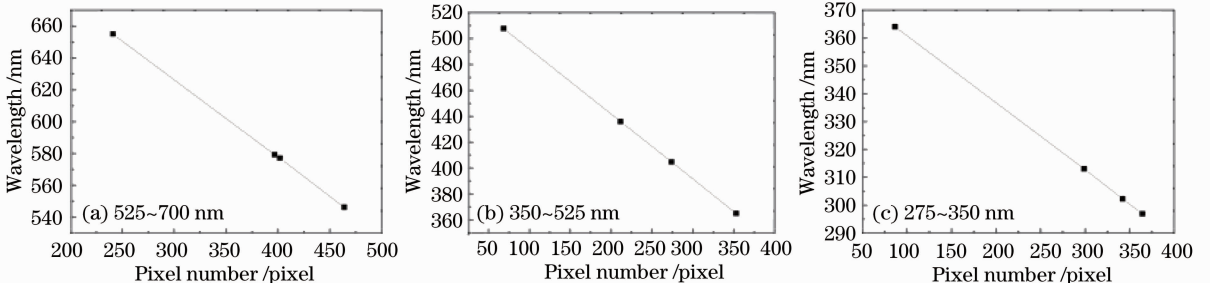


图 8 线性回归分析

Fig. 8 Linear regression analysis

测。使用 655 nm 激光器和白光 LED 同时照明印有黑白条纹的纸板。用光谱仪样机在不同距离对该纸

板进行观测,并拍摄两幅不同空间分辨率的 525~700 nm 一级光谱图像,拍摄结果如图 10 所示。

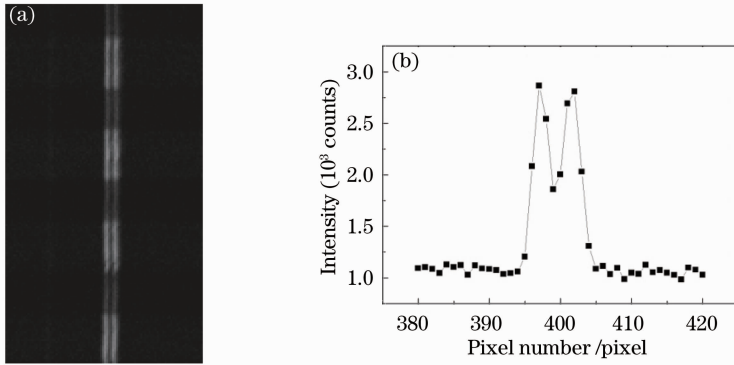


图 9 汞灯 576.96 nm 和 579.07 nm 的(a)光谱图像和(b)谱线

Fig. 9 (a) Spectral image and (b) spectral line of 576.96 nm and 579.07 nm of Hg-lamp

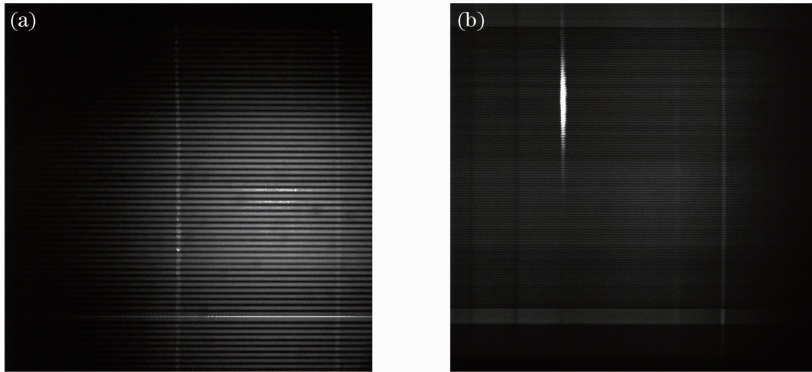


图 10 525~700 nm 一级光谱图像。(a) 128 pixel; (b) 320 pixel

Fig. 10 Spectral image of the first order at 525~700 nm. (a) 128 pixel; (b) 320 pixel

图 10 中的水平黑白条纹反应了白光 LED 的连续光谱,可以看到在各波段范围内光谱仪的成像分辨率都十分清晰。同时激光器的 655 nm 谱线也能在图像中辨别出来。提取两幅图中 655 nm 谱线位置处的两列数据以检测系统成像分辨率,如图 11 所示。经过分析表明图 10(a)的成像分辨率为 128 pixel,图 10(b)的成像分辨率为 320 pixel。由于光谱仪的

像面大小为 8.2 mm×8.2 mm,两幅图能分辨的空间频率分别为 7.8 lp/mm 和 19.5 lp/mm。图像的调制度 M_0 可表示为

$$M_0 = \frac{s_1 - s_0}{s_1 + s_0}, \quad (12)$$

式中 s_1 为峰顶信号强度, s_0 为峰谷信号强度。取多组数据进行计算后得到,仪器在探测 128 pixel 时 $M_0 > 0.3$,仪器在探测 320 pixel 时 $M_0 > 0.1$ 。

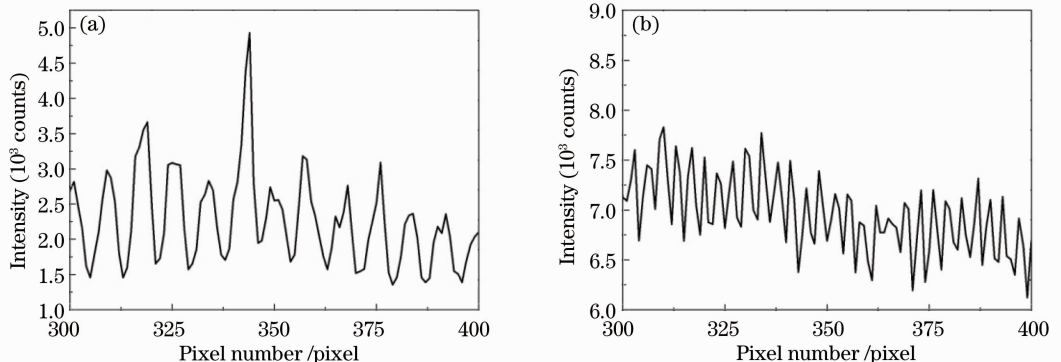


图 11 成像分辨率分析

Fig. 11 Analysis of spatial resolution

4 结 论

给出了 Czerny-Turner 型成像光谱仪的设计方法与像差校正方案。运用柱面反射镜校正了系统像散,通过控制系统 F 数校正了系统球差,控制准直镜离轴角与聚焦镜离轴角的关系校正了系统彗差。同时利用上述方法设计了一套工作波段为 200~700 nm 的宽波段成像光谱仪,并介绍了成像光谱仪公差分析方法,分析出光学元件的旋转误差对仪器的影响最大。最终利用该系统方案加工装调出了一套原理样机,给出了光谱仪波长定标和成像质量检测方法,并进行了相关实验分析,该套定标及检测方案适用于多种结构的成像光谱仪系统。

参 考 文 献

- Masayuki Futamata, Takehiko Takenouchi, Kei-ichi Katakura. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 24~31
- Xue Qingsheng, Wang Shurong, Lu Fengqin. Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 35~40
薛庆生,王淑荣,鲁凤芹. 星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 35~40
- Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1516~1521
薛庆生,王淑荣,李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1516~1521
- Kye-Sung Lee, Kevin P. Thompson, Jannick P. Rolland. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(22): 23378~23384
- Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng *et al.*. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0122001
吴雁,唐义,刘健鹏等. 电离层遥感远紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0122001
- Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112011
于磊,曲艺,林冠宇等. 120~180 nm 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112011
- Tong Yajun, Wu Gang, Zhou Quan *et al.*. Design method of Offner-type imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1148~1152
瞳亚军,吴刚,周全等. Offner 成像光谱仪的设计方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1148~1152
- Lin Zhong, Fan Shifu. Spectrometer [M]. Beijing: Mechanics Industry Press, 1988. 114~115
林中,范世福. 光谱仪器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 114~115
- B. Shafer, Lawrence R. Megiu, Leam Droppleman. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1963, **54**(7): 879~887
- F. A. Jenkins, H. E. White. Fundamentals of Optics [M]. New York: McGraw-Hill, 1950. 92~93
- Liu Lin, Zhang Xingde, He Yiliang. Monte-Carlo simulation and its application in the IR optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(5): 496~499
刘琳,张兴德,贺谊亮. 基于蒙特-卡洛模拟法的红外光学系统公差分析[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(5): 496~499
- Li Cong. Study on Ground Testing and Calibration of Atmospheric Ultraviolet Imaging Spectrograph [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Science, 2010. 30~40
李聪. 大气紫外成像光谱仪地面测试与定标技术研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2010. 30~40
- J. Mirapeix, A. Cobo, A. M. Cubillas *et al.*. In-process automatic wavelength calibration for CCD-spectrometers [C]. *SPIE*, 2008, **7003**: 70031T

栏目编辑: 张 腾