

编码孔径成像光谱仪光学系统设计*

裴琳琳 吕群波[†] 王建威 刘扬阳

(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

(2014年5月19日收到; 2014年6月23日收到修改稿)

本文设计了一种以双 Amici 棱镜为分光元件的成像光谱系统, 该系统主要包括前置望远物镜、编码板、双 Amici 棱镜、准直镜和成像镜. 此类光学系统可以获得很高的衍射效率, 相比于狭缝结构的成像光谱系统, 该光谱仪为二维空间扩展的视场, 无疑增加了设计难度. 后期的数据反演算法对一次像面编码板的成像效果过于依赖, 基于此, 对光学系统的像差校正提出了更高的要求. 本文设计、分析了基于双 Amici 棱镜的成像光谱仪的原理及特点, 设计了一套完整的成像光谱系统. 前置望远物镜的设计为像方远心, MTF 在 39 线对处, 达到 0.8, 成像质量良好. 创新性的将前置望远物镜倒置用做准直系统. 全系统各个波长在 39 线对处的 MTF 值均在 0.65 以上. 对室外目标景物进行推扫成像, 从获得的成像数据判断, 本文设计的编码孔径成像光谱仪原理可行, 衍射效率高, 全视场成像质量良好, 全谱段光谱数据可信.

关键词: 成像光谱仪, 光学设计, 双 Amici 棱镜**PACS:** 07.60.Rd, 42.15.Eq, 42.79.Bh**DOI:** 10.7498/aps.63.210702

1 引言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代发展起来的, 因其可以同时获得目标的二维空间信息和一维光谱信息, 即数据立方体, 故在地质分析、地面测绘、矿产勘探、医疗器械、军事监测、自然灾害预警等方面有着很重要的应用^[1]. 成像光谱仪有多种分类方式, 分光元件是光谱成像仪的核心部件, 按照分光原理可以分为光栅色散型、棱镜色散型、滤光片型、干涉型和计算层析型. 不同分光原理的成像光谱仪有不同的优势, 并在特定的领域发挥重要作用^[2]. 其中, 棱镜色散和光栅色散型成像光谱仪的原理简单, 性能稳定, 目前应用最广泛. 最早的棱镜色散采用单棱镜色散的方式, 由于材料本身的性质, 使得光谱分辨率存在非线性问题; 空间方向的不同视场角对应的空间入射角不同, 带来谱线弯曲; 不同谱段的角放大率不同, 引起色畸变. 为了改善图谱质量出现了复合棱镜, 如双 Amici 结构, 可以规避单棱镜色散存在的问题.

本文针对编码孔径成像光谱仪的特性, 采用双 Amici 棱镜作为色散原件, 通过对光学系统的优化, 设计了一套完整的成像光谱仪系统, 并进行了像质评价. 通过对研制仪器的推扫实验, 验证成像光谱仪获取图谱质量良好.

2 编码孔径成像光谱仪

本文设计的系统是一种色散型的成像光谱仪, 该系统由六部分组成: 前置物镜、编码板、准直镜、色散棱镜、成像镜和 CCD 探测器^[3]. 光学原理: 目标通过前置物镜成像在一次像面, 编码板正处于一次像面处, 再通过准直镜变为平行光, 进入色散棱镜色散, 最后通过成像镜将编码并色散开的光线成像于探测器靶面, 如图 1 所示.

编码板位于系统的一次像面处, 该系统的准直镜与成像镜结构完全相同, 即 CCD 对编码板 1:1 成像, 编码板的尺寸大小由选定的 CCD 探测器的接受面尺寸确定. 探测器像面中的每一像元, 为不同空间位置点不同波段信息的叠加结果.

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2012AA0055) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: lvqunbo@aoe.ac.cn

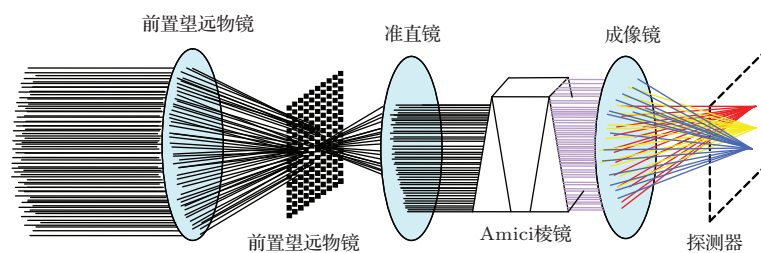


图1 (网刊彩色) 编码孔径成像光谱仪系统

3 成像光谱仪光学系统设计

3.1 系统设计指标

根据实验室已有探测器, 选用索尼 GRAS-I4S3M/C, 像元尺寸为 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$, 像元数为 1384×1036 , 而光学系统中一次像面位置的编码板是 512×512 码元, 故采用双像元合并的方法, 即 2×2 的像元对应一个码元, 换算即得等效像元尺寸为 $12.9 \mu\text{m} \times 12.9 \mu\text{m}$, 有效像元数为 692×518 .

波段范围 $450\text{--}900 \text{ nm}$, 光谱分辨率为 5 nm , 则光谱通道数为 90 . 系统要求瞬时视场为 0.258 mrad , 故计算得到物镜焦距为 50 mm , 编码板尺寸为 $6.6 \text{ mm} \times 6.6 \text{ mm}$, 而双阿米西棱镜对光线有偏折, 经过多次计算并模拟, 确定系统的视场角为 $2\omega = 10.6^\circ$, $F/\#$ 为 5 .

3.2 双 Amici 棱镜设计

双阿米西棱镜是一种由三个棱镜构成的完全对称的结构, 如图 2, 第一块为中等的冕牌玻璃, 第二块为高色散的火石玻璃, 第三块玻璃材料与第一块一致^[4]. 平行光线经过该棱镜结构能增加光线的色散角度, 且能够平行出射. 根据色散要求, 模拟

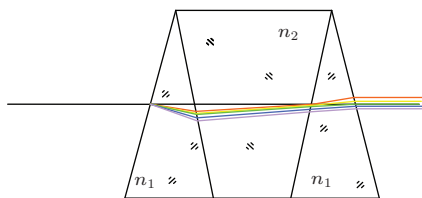


图2 (网刊彩色) 双阿米西棱镜

计算确定棱镜的材料、倾角参数^[5].

3.3 前置望远物镜的设计

该成像光谱仪系统的成像原理是光线经过前置物镜, 经过编码板编码之后通过准直镜准直, 再通过棱镜色散开, 最后通过成像镜成像在探测器上. 系统的关键是通过准直镜之后能够使光线尽量准直的通过棱镜, 故本系统采用像方远心的前置望远物镜结构^[6,7], 且准直镜为前置望远物镜的倒置, 完全对称的结构能够自动校正彗差、畸变和垂轴色差^[8]. 成像镜设计参数: 焦距 $f = 50 \text{ mm}$, 视场角为 $2\omega = 10.6^\circ$, $f/\# = 5$.

选用如图 3 所示的三个双胶合透镜为初始前置望远物镜结构, 系统具体参数如表 1 所示. 对该初始结构进行优化设计, 并得到最终的设计结果.

表1 前置望远物镜系统初始结构参数

面序号	半径/mm	厚度/mm	材料	半高度/mm	
1	81.6	4	TF3	7	
2	12.267	8	H-ZK7	7	
3	-100	11.6		7	
4	40	6	BAF2	7	
5	90	4	H-ZBAF3	7	
6	13	11		7	
7	-234.1	4	TF3	8	
8	19.435	10	F5	8	
9	-21.38	15.52		8	
				像面	4.67

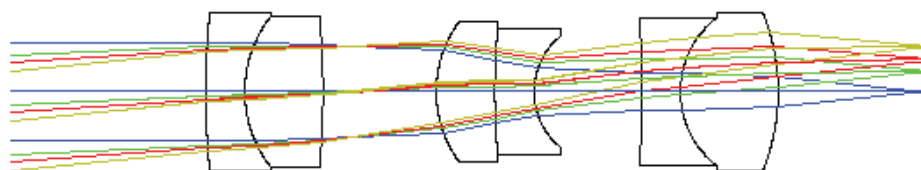


图3 (网刊彩色) 前置望远物镜初始结构

前置望远物镜全谱段MTF值在39 lp/mm处,均在0.8左右,接近衍射极限,成像质量好. 结构场曲和畸变都很小,全谱段的点列图RMS值均在6.45 μm以内. 综上所述,可知该前置望远结构成像质量好,满足光学指标.

3.4 成像光谱仪系统的设计

将前置望远物镜倒置即为物方远心结构^[9],可以作为本设计系统的准直镜结构,即前置望远物镜与准直镜关于编码板完全对称,该部分结构固定. 在整个系统对成像镜进行优化,选用初始结构参数如表2所示的镜组结构为成像镜,最终优化获得成像光谱仪系统结构如图4所示.

通过MTF对整个波段进行评价,在39 lp/mm处,波长450 nm, 500 nm, 600 nm和900 nm的MTF曲线如图5所示,大部分波长的MTF值在0.65以上,所有谱段的MTF值均在0.6以上. 图6为典型视场0, 0.5, 0.7及1视场的全谱段色散点列图,色散距离为1.161 mm,各个视场色散均匀. 从图7可以

看出,点列图RMS半径随波长的变化均小于0.21,该棱镜型成像光谱仪系统的像差校正得较好,满足像差校正的要求,在整个波段内同时获得了良好的成像质量.

表2 成像系统参数

面序号	半径/mm	厚度/mm	材料	半高度/mm
1	120.65	7	H-ZBAF3	9
2	-74.7	5	H-QF8	9
3	17.4	2		9
4	15.82	10	H-QF6	9
5	-13.552	4	TF3	9
6	126	2.6		9
7	20	10	H-LAK2	9
8	-31	4	TF3	9
9	195.43	27.56		9
像面				4.2

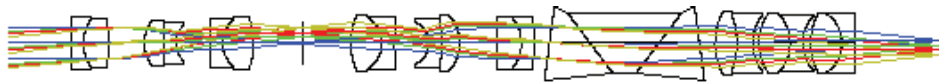


图4 (网刊彩色) 成像光谱仪系统结构

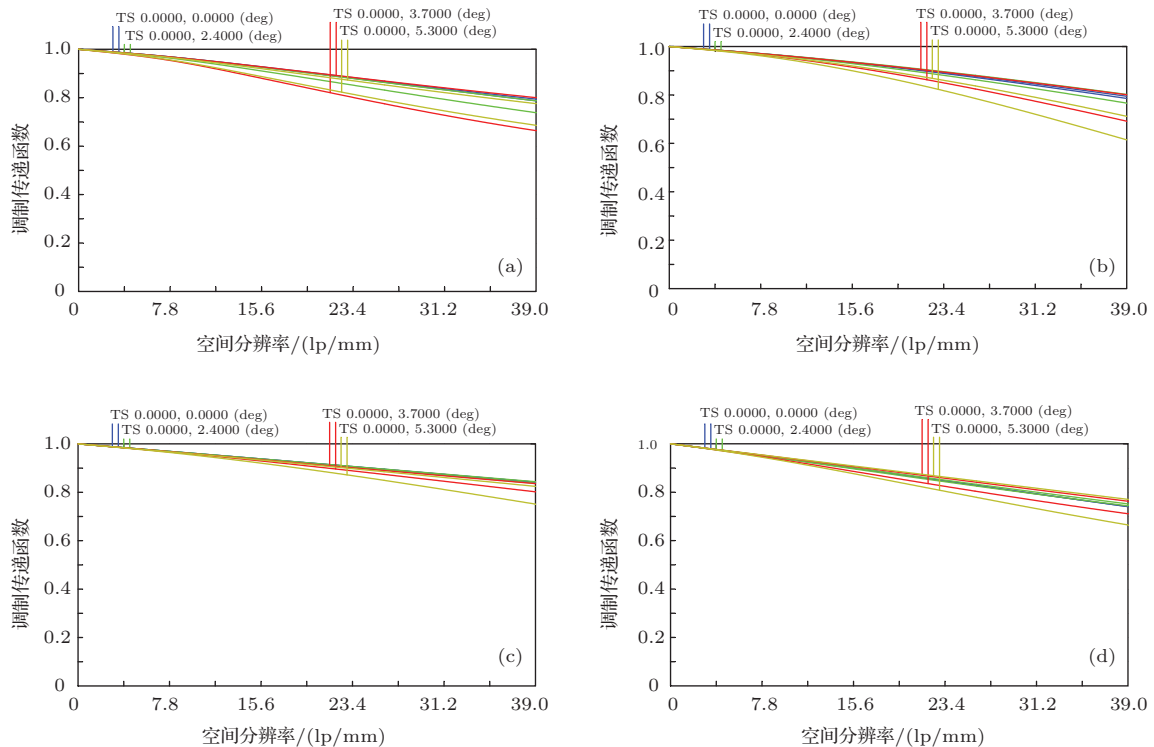


图5 (网刊彩色) 全系统不同波长MTF值 (a) 450 nm; (b) 500 nm; (c) 600 nm; (d) 900 nm

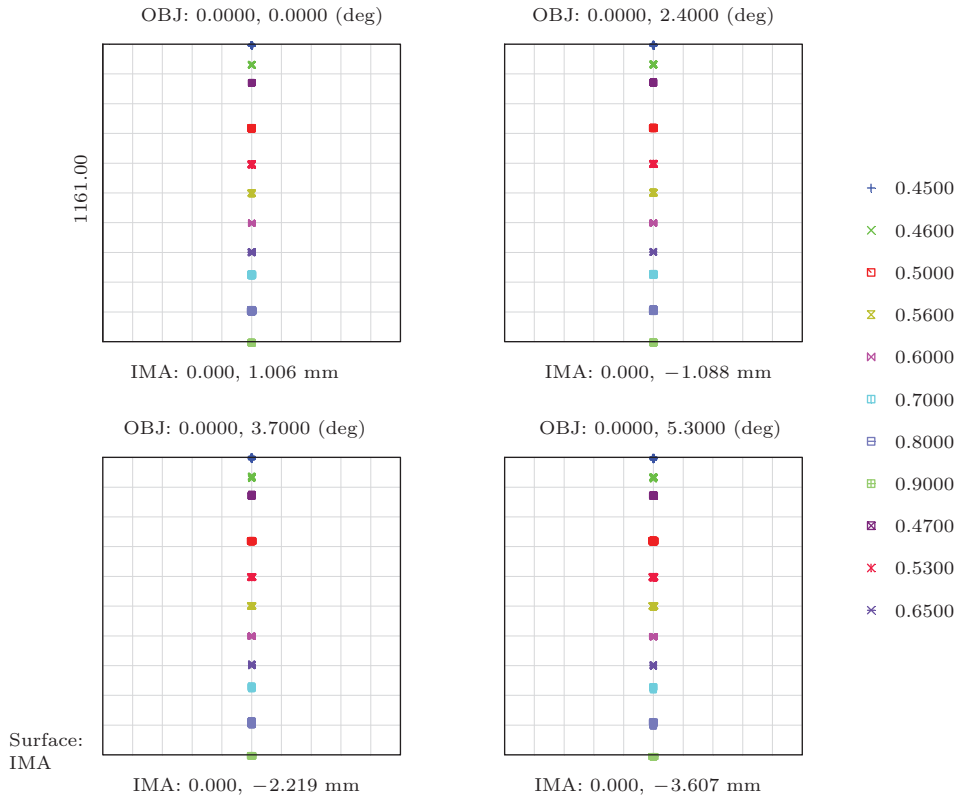


图6 (网刊彩色) 全系统全谱段色散点列图

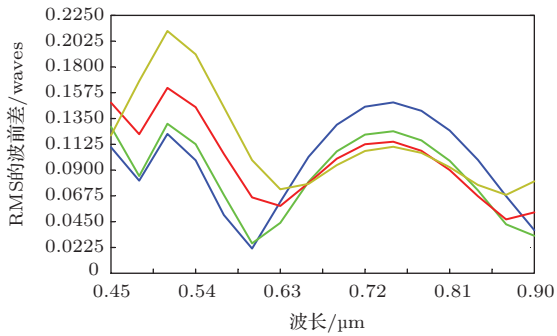


图7 (网刊彩色) 点列图RMS半径随波长的变化

成像光谱仪最终获取的数据信息包含两维图

像信息和一维光谱信息, 从光谱信息的角度来看, 棱镜色散常常会带来谱线弯曲(smile)和谱带弯曲(frown)两大问题, 会给后续数据处理带来较大麻烦, 所以光学系统需要满足一定的谱线弯曲和谱带弯曲要求. 一般需要在光学系统设计时把这两项畸变控制在0.5个像元以内.

本系统的谱线弯曲和谱带弯曲值分别如表3和表4所示, 其中谱带弯曲是以560 nm波长的像为基准计算的. 从中可以看出, 谱线弯曲值控制在0.33个像元以内, 谱带弯曲控制在±0.1个像元以内, 能很好的满足要求.

表3 准单色光谱线弯曲值(μm)

Field	450 nm	470 nm	500 nm	600 nm	660 nm	730 nm	800 nm	900 nm
0.7	2.3	2.3	2.2	1.9	1.8	1.8	1.72	1.6
1	4.2	4.1	3.9	3.4	3.1	2.9	2.8	2.6

表4 准单色光谱带弯曲值(μm)

Field	450 nm	470 nm	500 nm	600 nm	660 nm	730 nm	800 nm	900 nm
0.7	0.06	0.4	0.4	-0.2	-0.4	-0.3	-0.4	-0.8
1	0.17	0.6	0.7	-0.4	-0.6	-0.6	-0.7	1.4

3.5 光谱仪特点

本文设计的成像光谱仪具有以下特点:

1) 直视性; 整个系统采用透射装置, 各光学元件保证共轴, 按照所定的中心波长, 设计棱镜实现中心波长的无偏折成像, 这对于整个机械结构和装调都是十分有利的.

2) 对称性; 系统的前置望远物镜和准直镜采用对称装置, 放大率为 -1 , 这种设计对于垂轴像差的校正十分有利.

3) 紧凑性; 各光学元件之间衔接紧密, 利于光

谱仪小型化和轻量化设计, 而且仪器的小型化也是光谱仪发展的一个方向.

4 成像光谱仪实验

对上述成像光谱仪结构进行常规公差分析, 并合理分配误差, 指导加工、装调、检测^[10]. 如图8(a)所示, 为加工完成的整机结构. 该成像光谱仪的一次像面处放置编码模板, 如图8(b)所示编码结构形式, 将箱体放置在旋转平台上, 对室外目标进行退扫成像.

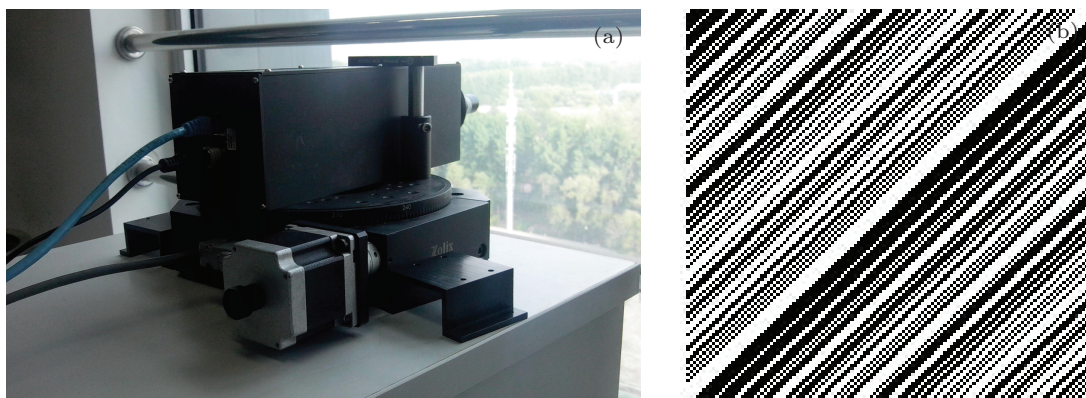


图8 (网刊彩色) 成像光谱仪整机及编码板形式 (a) 成像光谱仪推扫; (b) 编码板

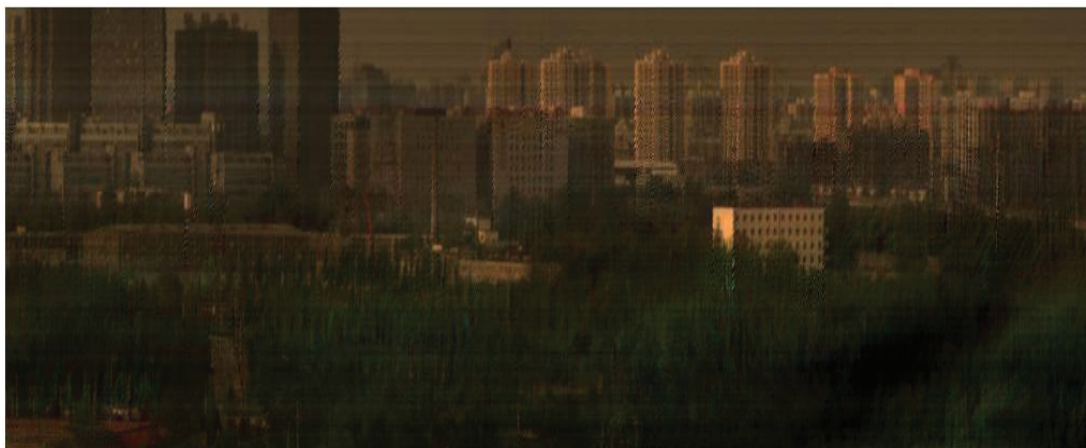


图9 (网刊彩色) 推扫数据反演结果

经过数据处理之后得到如图9所示的反演数据, 相比于数码相机拍摄的目标景物如图10所示(远处楼房), 显然成像光谱仪的成像效果良好, 从数据图像中获得该成像光谱仪通光波长为450—900, 其光谱通道为90个, 如图11所示, 其

中图11(a)墙体光谱数据, 图11(b)为植被光谱数据, 获得的光谱数据是未经过定标的, 但是从光谱趋势判断, 光学系统获取的光谱数据可信^[11]. 综上所述, 该成像光谱系统成像质量良好, 光谱数据完整, 满足设计指标要求.



图10 (网刊彩色) 数码相机对目标景物成像

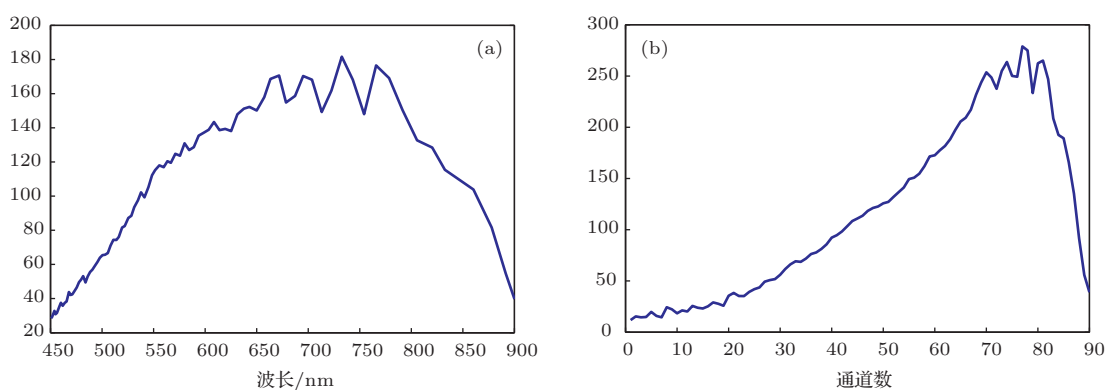


图11 成像光谱仪通光波长及光谱通道数 (a) 墙体光谱; (b) 绿植光谱

5 结 论

在分析 Amici 棱镜分光原理的基础上, 给出了棱镜的设计参数. 按照所要求的设计指标, 给出了一个波段在 450—900 nm 的设计结果, 全系统总长度为 250.8 mm 的成像光谱仪系统. 整个光学系统采用透射式对称结构, 这对于镜座设计和装调都是非常方便的. 通过计算, 首先设计了系统的前置望远物镜结构, 再将整个系统组合到软件中进行优化设计, 光谱分辨率为 5 nm, 系统的 MTF 在各个视场和波段内基本在 0.7 附近, 接近衍射极限, 系统点列图 RMS 值随波长的变化均小于 0.21, 且谱线弯曲与谱带弯曲控制在应用范围内设计结果满足设计指标. 整个光学系统结构简单, 像差校正能力强, 结构尺寸较小.

参考文献

- [1] Wang J Y, Shu R, Liu Y N, Ma Y H 2011 *Introduction to the Imaging Spectrum Technology* (1st Ed.) (Beijing: Science Press) p259-262 [王建宇, 舒嵘, 刘银年, 马艳华 2011 成像光谱技术导论 (第一版) (北京: 科学出版社) 第 259—262 页]
- [2] Yuan Y 2005 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [袁艳 2005 博士学位论文 (北京: 北京航空航天大学)]
- [3] Wagadarikar A, John R, Willett R, Brady D 2008 *Appl. Opt.* **47** 44
- [4] Hagen N, Tkaczyk T S 2011 *Appl. Opt.* **50** 4998
- [5] Pei L L, Huang M, Lü Q B 2013 *Acta Optica Sinica* **33** 122003 (in Chinese) [裴琳琳, 黄旻, 吕群波 2013 光学学报 **33** 122003]
- [6] Sun Q, Yu B, Wang Z Q, Mu G G, Lu Z W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 756 (in Chinese) [孙强, 于斌, 王肇圻, 母国光, 卢振武 2004 物理学报 **53** 756]
- [7] Song Y F, Shao X P, Xu J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6298 (in Chinese) [宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军 2008 物理学报 **57** 6298]

- [8] Sun J X, Pan G Q, Liu Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094203
 [9] Li D X, Lu Z W, Sun Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5766 (in Chinese) [李东熙, 卢振武, 孙强 2007 物理学报 **56** 5766]
 [10] Dong K Y, Sun Q, Li Y D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4602 (in Chinese) [董科研, 孙强, 李永大 2006 物理学报 **55** 4602]
 [11] Liu Y J 2012 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: The Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science) (in Chinese) [刘玉娟 2012 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]

Optical system design of the coded aperture imaging spectrometer*

Pei Lin-Lin Lü Qun-Bo[†] Wang Jian-Wei Liu Yang-Yang

(Academy of Opto-Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

(Received 19 May 2014; revised manuscript received 23 June 2014)

Abstract

The coded aperture imaging spectrometer system based on the double-Amici-prism is designed in this paper, which includes the telescope objective, the coded template, the double-Amici-prism, the collimator lens and the imaging lens. This optical system can obtain a high diffraction efficiency. Compared to the imaging spectrometer system with a slit for this kind of system, the field of view is a two-dimensional spatial expansion, increasing the difficulty of design. For the subsequent data inversion algorithm, perfect imaging is needed, and based on this, the optical aberration of the system should be corrected carefully widely. In this paper, we design and analyse the features of the imaging spectrometer system based on the double-Amici-prism, then the complete imaging spectrometer system. Telescope objective is designed to be telecentric, its MTF at 39 line pairs is 0.8, implying that good images can be obtained. Innovatively, an inverted telescope objective is used as a collimation system. The imaging spectrometer system's MTF at 39 line pairs is higher than 0.65. The imaging of the outdoor target scene, obtained by the coded aperture imaging spectrometer, proves that the design principle is feasible, the system is of high diffraction efficiency, the full-field imaging is of good quality, and the full spectrum of data is creditable.

Keywords: imaging spectrometer, optical system design, the double-Amici-prism

PACS: 07.60.Rd, 42.15.Eq, 42.79.Bh

DOI: 10.7498/aps.63.210702

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA0055).

[†] Corresponding author. E-mail: lvqunbo@aoe.ac.cn