

# 成像光谱仪一体化设计

崔继承<sup>1,2</sup>, 刘玉娟<sup>1,2</sup>, 潘明忠<sup>1</sup>, 唐玉国<sup>1</sup>

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 随着超光谱成像技术的发展, 超光谱成像光谱仪的要求也随之提高, 小型化、高光谱分辨率和高空间分辨率成为发展趋势, 这就要求设计者在进行仪器设计的过程中不断完善和优化设计。提出了成像光谱仪一体化设计的方法, 即不单纯地进行光谱仪分光系统的设计, 而是将光谱仪分光系统置于整体结构中进行整体系统设计和优化, 从而实现超光谱成像光谱仪的最佳设计结果, 并以近年来应用较为广泛的凸面光栅成像光谱仪为例, 较为详细地阐述了成像光谱仪一体化设计方法在系统研制过程中的应用, 并通过对该凸面光栅成像光谱仪的测试验证了该方法的正确性。

**关键词** 成像光谱仪; 小型化; 光谱; 凸面光栅

中图分类号: TH741.4 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)03-0839-05

## 引言

超光谱成像光谱仪是光谱成像技术的基本设备, 它是在传统光谱分析仪器基础上发展而成的遥感仪器。利用它可以在遥感平台上以高空间分辨率和高光谱分辨率获取物质光谱图像, 即获取被观测区域(或物体)的表现图像信息及理化生物等物质构成光谱信息, 是传统光谱分析技术(即定性、定量分析)向现代光谱分析技术(即定性、定量、定时、定位分析)发展的重要载体, 在军事侦察、资源勘查、自然灾害监控、环境污染评估、医学诊断治疗等诸多领域具有广阔的应用前景。自从 Goetz<sup>[1]</sup> 提出超光谱成像的概念至今经过 20 多年的发展, 各国已经在超光谱成像领域研制出了多种成像光谱仪<sup>[2,3]</sup>, 比较具有代表性的有 AVIRIS<sup>[4]</sup>, HYDICE<sup>[5]</sup> 和 CASI<sup>[6]</sup> 等, 这些超光谱成像光谱仪主要应用在机载和星载的有效载荷当中。近年来我国在军事、民用等领域对超光谱成像光谱仪的需求也呈上升趋势, 各种用途的超光谱成像光谱仪被广泛地应用于国民经济建设和国防建设当中, 对于超光谱成像技术的研究也越来越深入和广泛<sup>[7-9]</sup>。

随着超光谱成像技术的发展, 对超光谱成像光谱仪的要求也随之提高, 小型化、高光谱分辨率和高空间分辨率成为发展趋势, 这就要求设计者要不断完善和优化设计。正是在这样一个背景下, 提出了成像光谱仪一体化设计的方法, 即不单纯地进行光谱仪分光系统的设计, 而是将光谱仪分光系

统置于整体结构中进行整体系统设计和优化, 从而实现超光谱成像光谱仪的最佳设计, 以近年来应用较为广泛的凸面光栅成像光谱仪为例, 介绍了整个设计过程和测试, 验证了该设计思想的正确性。

## 1 凸面光栅成像光谱仪一体化设计过程

### 1.1 凸面光栅成像光谱仪基本原理

凸面光栅成像光谱仪系统由前端望远系统和后端分光系统组成, 其中分光系统是从同心 Offner 三反射镜光学系统演变而来的, 将其中的第二反射镜改为凸面光栅, 既保留了 Offner 系统对称消像差的特点又能实现光谱分离, 因此该结构也称为 Offner 成像光谱仪<sup>[10-12]</sup>, 其结构如图 1 所示。

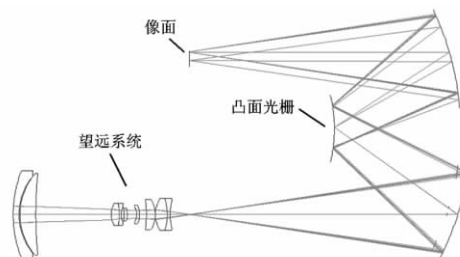


Fig 1 Offner spectrum imaging system of convex grating

凸面光栅成像光谱仪工作原理如图 2 所示。沿狭缝方向

收稿日期: 2011-07-04, 修订日期: 2011-10-09

基金项目: 国家创新方法工作专项项目(2008IM040700), 吉林省科技支撑计划项目(20106011)资助

作者简介: 崔继承, 1976 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员 e-mail: jicheng\_cui@yahoo.com.cn

的探测目标条带经望远系统成像在狭缝上,后经凸面光栅分光系统分光形成光谱像并被探测器接收。通过空间连续推扫方式获得目标的成像数据立方,对目标进行空间分析和光谱成分识别。与传统成像光谱仪相比,凸面光栅成像光谱仪的分光系统仅有三个光学元件组成,具有无象散、谱线弯曲小、色畸变小等优点且结构简单、易于实现小型化,被广泛应用于航空遥感平台上<sup>[13-15]</sup>。

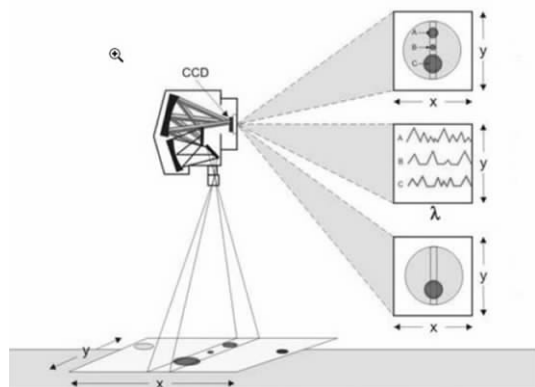


Fig 2 Schematic of the imaging spectrometers with convex grating

## 1.2 凸面光栅成像光谱仪设计指标

凸面光栅成像光谱仪的指标是根据使用环境、被测物的光谱信息及空间分辨率等综合要求并考虑到凸面光栅制造水平而制定的。本设计实例中凸面光栅成像光谱仪的设计指标如表 1 所示,凸面光栅是选用作者所在实验室自行设计制作的,其参数如表 2 所示,接收器件选用一款环境适应性较好的面阵 CCD,其技术参数如表 3 所示。

Table 1 Parameters of imaging spectrometers with convex grating

光谱范围/nm	光谱分辨率/nm	焦距/mm	$F^\#$	谱线弯曲/%	色畸变/%
400~800	2.4	30	3.5	小于 0.1	小于 0.8

Table 2 Parameters of convex grating

光谱范围/nm	使用级次	刻线密度/( $l \cdot \text{mm}^{-1}$ )	曲率半径/mm
400~800	-1	150	73.33

Table 3 Parameters of the CCD

像素数	像元大小/ $\mu\text{m}$	帧频/Hz	动态范围/dB	光谱响应范围/nm
1 004×1 004	7.4	50	60	400~1 000

## 1.3 凸面光栅成像光谱仪前端光学系统设计

根据凸面光栅成像光谱仪所使用的光谱范围及仪器小型化的要求,前端望远系统采用透射式同时保证像方远心,后端光谱仪的入射光狭缝依据所选探测器像元的大小而确定大小,狭缝为  $7 \text{ mm} \times 0.022 \text{ mm}$ ,狭缝长度方向为空间维方向,狭缝宽度方向为光谱维方向。前端光学系统的视场角为  $\omega = \frac{l}{2f'}$ ,其中  $l$  为狭缝长度,  $f'$  为光学系统焦距,本系

统中,  $l = 7 \text{ mm}$ ,  $f' = 30 \text{ mm}$ ,因此光学系统的视场角为  $2\omega = 2 \times 6.66^\circ$ ,最终得到前端光学系统的设计参数如:光学系统焦距:  $f' = 30 \text{ mm}$ ;光学系统相对孔径:  $D/f' = 1:3:5$ ;光学系统视场角:  $2\omega = 2 \times 6.66^\circ$ 。

前端光学系统选用双高斯复杂化结构,可以有效地控制彗差、畸变及轴向色差;复杂化的目的是为了提提高相对孔径和成像质量,由于采用的是透射式光学系统,不可避免地带来轴向色差的影响,因此在设计前端光学系统的时候要尽量地控制轴向色差及色球差,为最后的一体化设计降低难度。前端光学系统结构如图 3 所示。

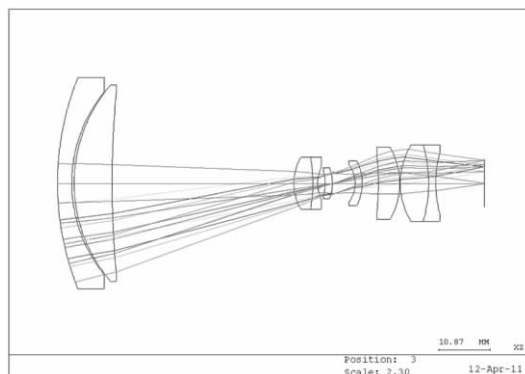


Fig 3 Front optical system

前端光学系统的像差曲线如图 4 所示。

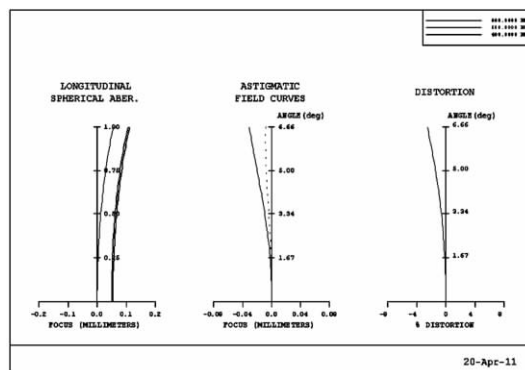


Fig 4 Aberration curve of the front optical system

从前端光学系统像差图中可以看出,轴向色差得到了较好的控制,同时系统的色球差也得到了较好的校正。

## 1.4 凸面光栅成像光谱仪分光系统设计

凸面光栅成像光谱仪分光系统采用同心结构和罗兰圆配置虽然在中心波长实现了零像散,但在边缘波长像散较大。为了实现在整个波段范围内成像质量的均匀,对传统 Offner 结构进行改进,使狭缝和像面偏移并倾斜微小角度,实现边缘波长与中心波长成像质量的均衡,很好地控制了系统球差、象散和场曲。图 5 为分光光学系统整体图,凸面光栅成像光谱仪的光学系统像差曲线如图 6 所示,从图中可以看出采用了 Offner 结构的凸面光栅成像光谱仪分光系统的球差、象散和畸变均得到了很好的结果。

## 1.5 凸面光栅成像光谱仪一体化设计结果

经过凸面光栅成像光谱仪前端望远系统和分光系统的初

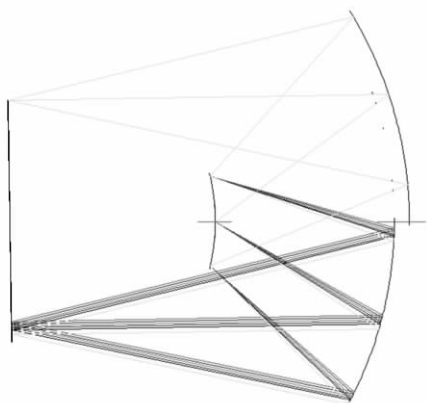


Fig 5 Dispersion system of the imaging spectrometer with convex grating

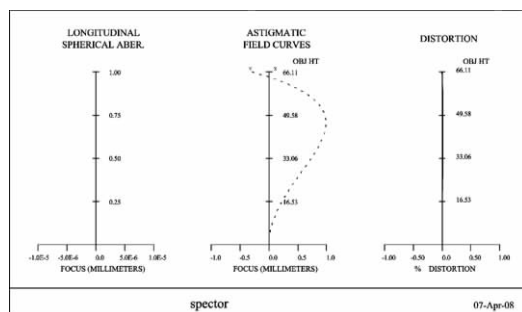


Fig 6 Aberration of the dispersed system

步设计, 分别得到了初始结构。为了使提高成像光谱仪的成像质量就必须将两个初始结构进行一体化设计, 所谓一体化设计就是将前端望远系统和后端分光系统结合起来, 作为一个整体系统进行光学系统的优化, 在优化的过程中, 合理分配两个系统的像差, 最终提高整体系统的成像质量。在优化过程中使用多重结构设置, 在应用波段范围内取 400, 600, 800 nm 三个波段, 由于望远系统是透射式系统, 系统中不可避免的有轴向色差的影响, 采取倾斜像面的办法实现三个参考波长共像面。在光谱维方向为了增加光通量, 采用三个像元合并的办法, 光谱维宽度为:  $d = 3 \times 7.4 \mu\text{m} = 22.2 \mu\text{m}$ , 因此, 系统的调制传递函数为  $1/2 \times d \approx 24(l\text{p} \cdot \text{mm}^{-1})$ 。光

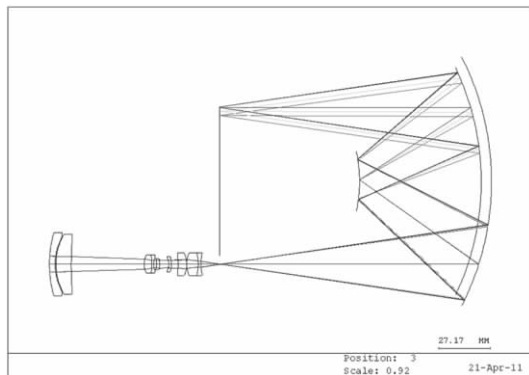


Fig 7 Optical system of the imaging spectrometer with convex grating

学系统结构图如图 7 所示, 系统调制传递函数如图 8 所示。从图 8 可以看出, 运用一体化设计的思想各个参考波长均得到了较为理想的结果。

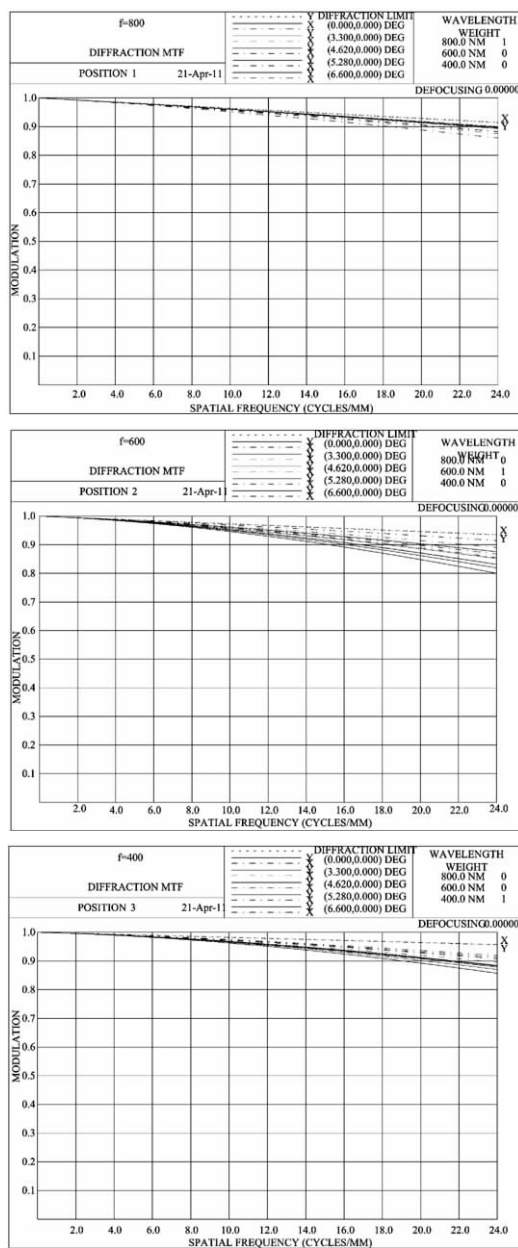


Fig 8 (a) MTF curves of 800 nm; (b) MTF curves of 600 nm; (c) MTF curves of 400 nm

## 2 凸面光栅成像光谱仪测试结果

利用一体化设计方法及上述设计结果, 研制了一台凸面光栅成像光谱仪, 其内部结构如图 9 所示, 并对该台仪器分别进行了光谱分辨率测试、谱线弯曲测试和色畸变测试。

### 2.1 光谱分辨率测试

光谱分辨率测试使用标准汞灯光源对所研制的凸面光栅成像光谱仪进行测试, 光谱探测器采集到的汞灯 400~800 nm 光谱曲线如图 10 所示。从图中可以看出, 凸面光栅成像

光谱仪在采集到的汞灯光谱中可分辨 577.0 和 579.1 nm 两条谱线, 因此可以推断成像光谱仪在波长 578.0 nm 处光谱分辨率为 2.1 nm, 满足设计要求。



Fig. 9 Imaging spectrometer with convex grating

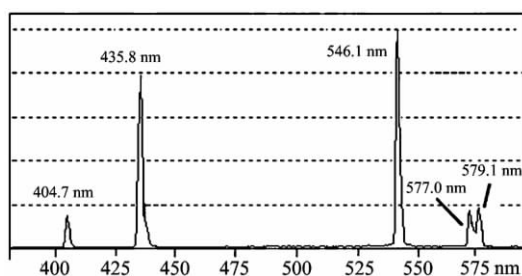


Fig. 10 Spectral line of Hg-lamp

## 2.2 谱线弯曲和色畸变测试

谱线弯曲是指光谱仪入射狭缝所成的光谱图像与理想图像的偏离, 色畸变是指光谱仪入射狭缝不同波长的光谱图像由于放大倍率的差异而引起的同一视场图像像高的不一致, 谱线弯曲和色畸变会为数据处理带来一定的困难<sup>[15]</sup>。在实际应用中系统总是存在一定的谱线弯曲和色畸变, 这就需要

在设计时加以考虑, 并使之不影响光谱成像应用。用所研制的凸面光栅成像光谱仪对 400, 600 和 800 nm 三个波段的参考光进行全视场探测, 得到的光谱曲线如图 11 所示, 虚线为理想光谱分布, 实线为实际光谱分布, 经过计算得出光谱谱线弯曲为 0.09%, 色畸变为 0.6%, 可见系统的谱线弯曲和色畸变都达到了设计要求。

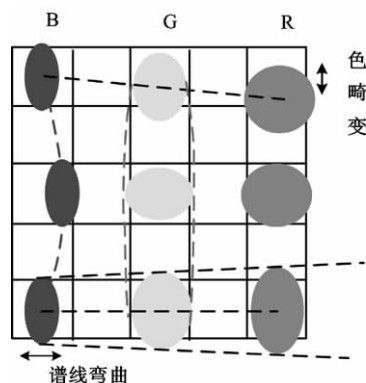


Fig. 11 Imaging spectrum received on detector

## 3 结 论

当今, 成像光谱仪的设计趋向小型化、高光谱分辨率和高空间分辨率, 这就要求设计者要不断完善和优化设计, 不断更新设计方法, 成像光谱仪一体化设计方法正顺应了这种趋势。以凸面光栅成像光谱仪这个近年来应用较为广泛的成像光谱仪为例, 较为详细地介绍了一体化设计方法的应用过程, 并利用该方法研制了一台凸面光栅成像光谱仪, 通过光谱分辨率、谱线弯曲和色畸变测试证明了该成像光谱仪达到了设计指标要求, 从而验证了一体化设计方法是可以应用到高光谱分辨率和高空间分辨率成像光谱仪设计的。如何进一步完善和提高成像光谱仪一体化设计方法将是作者接下来要开展的工作。

## References

- [1] Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, et al. Science, 1985, 228: 1147.
- [2] WANG Jian-yu(王建宇). Characteristic Analysis and Development Status of Airborne Imaging Spectrometer: New Progress and Development Strategy of Remofe Sensing(机载成像光谱仪性能分析和发发展现状: 遥感新进展与发展战略). Beijing: China Science and Technology Press(北京: 中国科技出版社), 1996. 99.
- [3] ZHENG Yu-quan(郑玉权). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2005, 13(6): 650.
- [4] Green R O, Chrien T G, Niei Son I J, et al. SPIE, 1993, 1937: 180.
- [5] Rickard L J, Basedow R W, Zalewski E F, et al. SPIE, 1993, 1937: 173.
- [6] Babey S K, Anger C D. SPIE, 1993, 1937: 152.
- [7] ZHENG Yu-quan, WANG Hui, WANG Yi-fan(郑玉权, 王慧, 王一帆). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2009, 17(11): 2629.
- [8] HUANG Yuan-shen, NI Zheng-ji, ZHUANG Song-lin(黄元申, 倪争技, 庄松林). Optical Instruments(光学仪器), 2005, 27(6): 38.
- [9] HUANG Yuan-shen, CHEN Jia-bi(黄元申, 陈家璧). Optical Instruments(光学仪器), 2007, 29(6): 40.
- [10] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, et al. Optics Express, 2006, 14(20): 9156.
- [11] Beutler H. Journal of Opt. Soc. Am., 1945, 35: 311.
- [12] Lobb D R. Appl. Opt., 1994, 33: 2648.
- [13] Welford W T. Progress in Optics, Vol. IV, North-Holland, Amsterdam, 1965. 241.
- [14] Peng Y K, Lu R F. Biology and Technology, 2007, 8753:1.

[15] Lobb D R. SPIE, 1997, 3118: 339.

## The Integrative Design for Imaging Spectrometer

CUI Ji-cheng<sup>1, 2</sup>, LIU Yu-juan<sup>1, 2</sup>, PAN Ming-zhong<sup>1</sup>, TANG Yu-guo<sup>1</sup>

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The hyperspectrum imaging spectrometer will achieve miniaturization and high spectrum resolution and high space resolution along with development of the hyperspectrum imaging technology that is becoming a trend. This trend requires the designers to improve and optimize their designing constantly in designing the instruments. The present paper carried out a method of integrative design for imaging spectrometer. This method suggested that the design and optimization work of the disperse systems of imaging spectrometers would take into account the whole systems, but not consider themselves only. It would get a perfect result by using this method. This paper also explained in details how the method can be used in the design course of imaging spectrometer with convex grating which has been used widely recently. Finally, this paper validated the method by testing the imaging spectrometer with convex grating, which was developed using this method.

**Keywords** Imaging spectrometer; Miniaturization; Spectrum; Convex grating

(Received Jul. 4, 2011; accepted Oct. 9, 2011)