

文章编号 1004-924X(2017)04-0867-08

大孔径面视场 PG 成像光谱仪的光学设计

杨 晋^{1,2}, 张 锐^{1,2*}, 潘明忠¹, 崔继承¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对成像光谱仪通过狭缝进行线视场成像时存在的孔径较小、光学透过率较低等问题,研究了一种基于棱镜-光栅型分光结构的大孔径面视场成像光谱仪。该棱镜-光栅成像光谱仪采用表面浮雕型透射光栅,极大地降低了光栅的制作难度与成本。大孔径面视场的成像光谱仪相较于线视场成像光谱仪有较高光学效率和时间效率。但是面视场成像光谱仪的色畸变与谱线弯曲较难校正。本文将前端望远系统与分光系统进行一体化设计,满足远心光路匹配和孔径匹配,较好地校正了面视场光谱成像系统中的谱线弯曲和色畸变。并且通过加入非球面反射镜及校正镜很好的校正了由于大孔径面视场所引入的非对称性离轴像差。结果表明,设计的大孔径面视场 PG 成像光谱仪光谱波段范围 400~1 000 nm,光学调制传递函数达到 0.65 以上,光谱分辨率达 2.5 nm,全谱段不同视场的谱线弯曲小于 5 μm ,色畸变小于 8 μm 。

关键词:成像光谱仪;大孔径;面视场;谱线弯曲;色畸变

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172504.0867

Optical design of PG imaging spectrometer with large aperture and surface field

YANG Jin^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2*}, PAN Ming-zhong¹, CUI Ji-cheng¹

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangrui_grating@163.com*

Abstract: As linear field imaging by slit led to small aperture and low optical transmittance in imaging spectrometers, a large aperture imaging spectrometer based on prism-grating (PG) component was proposed. The PG imaging spectrometer employed a surface-relief type grating which can reduce the cost and fabrication difficulty of gratings. Although the large aperture imaging spectrometer had higher optical efficiency and time efficiency, the color aberrations and spectral line curvature were difficult to correct. Thereby, the telescope system was unified with the optical splitting system, which enabled the telocentric optical path match and the aperture match with the perfect correction of spectral line curvature and color aberrations. In addition, an aspheric mirror and correction mirror were mounted to compensate the asymmetry aberration. The results demonstrate that the spectral range of the PG

收稿日期:2016-08-30;修订日期:2016-09-15.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2014YQ120351);国家重大科研装备研制项目(No. ZDYZ2008-1);国家自然科学基金资助项目(No. 61505204);吉林省科技发展计划项目(No. 20140203011GX)

imaging spectrometer is 400—1000 nm, the Modulation Transfer Function(MTF) is greater than 0.65 and the spectral resolution is 2.5 nm. The spectral line curvature is less than $5\ \mu\text{m}$, and color aberrations were less than $8\ \mu\text{m}$ in full spectrum.

Key words: imaging spectrometer; large aperture; surface field; spectral line curvature; color aberration

1 引言

成像光谱仪将光谱技术和成像技术相结合,可同时获得目标的空间信息和光谱信息,因此被广泛应用于医疗、军事探测、水质检测、环境勘测等领域^[1-3]。按照成像技术,成像光谱仪可分为摆扫型、推扫型以及凝视型 3 种类型。摆扫型成像光谱仪一般安装在飞行平台上,采用点视场成像,通过轨道方向上推扫以及垂直于飞行轨道方向上的摆扫完成空间维成像。这种成像光谱仪易于制作与定标,但其积分时间短,因此只在低飞行速度时适用。推扫型成像光谱仪采用线视场成像,通过在飞行轨道方向推扫能够获得较摆扫型成像光谱仪更高的空间分辨率与光谱分辨率。不过这两种成像光谱仪需在运动状态拍摄目标,这种工作状态增加了整个光谱仪测量的不确定性;并且载荷在轨道上的观测时间是有限的,分时工作方式不仅效率较低,而且大气扰动对它的干扰也较大。传统凝视型成像光谱仪通过可调谐滤光片完成目标不同波长的扫描,最终将视场内目标直接成像于面阵探测器上。与摆扫型和推扫型采用分光组件对目标信息进行分光不同,滤光片的使用极大地限制了仪器的光谱分辨率与空间分辨率^[4-6]。因此,具有高系统通光能量、高光学效率和时间效率的大孔径面视场成像光谱仪的研究成为成像光谱仪主要的研究方向之一^[7-9]。

在成像光谱仪中,分光系统的选择与设计会直接影响仪器的整体性能。目前,较为常用的分光系统结构有采用平面反射光栅或平面棱镜的 Czerny-Turner 型^[10-11]、采用球面反射光栅或 Fény 棱镜同心结构的 Offner 型^[12-13]和 Dyson 型^[14-15],以及采用透射式光栅的棱镜-光栅-棱镜(Prism-Grating-Prism, PGP)型和棱镜-光栅(Prism-Grating, PG)型^[16-17]。其中, Czerny-Turner 型的分光系统难以校正像散和离轴像差,

因此系统的视场和孔径都较小。采用同心结构的分光系统的孔径较大, F 数最大可达 $2.5\sim 3$ ^[1,18],但是该类成像光谱仪存在装调难、体积大等缺点。Offner 型和 Dyson 型成像光谱仪采用的宽波段高效率球面光栅难以制作,目前国内尚不能制造出满足使用要求的光栅。而 PGP 成像光谱仪由于必须采用研制难度较大的体全息透射光栅,与球面光栅面临同样的制作难题,整台仪器的成本很高^[16-17,19]。

鉴于目前成像光谱仪存在的问题,本文提出了一种采用棱镜-光栅(PG)作为分光模块的大孔径面视场成像光谱仪。作为分光模块的 PG,由于其光栅一端开放,可以采用较为容易制作的表面浮雕型透射光栅,极大地降低了整个光谱仪的制作成本。并且,棱镜与光栅的联合使用及校正镜的加入很好地校正了系统的谱线弯曲和色畸变。在设计整个光谱仪的光学系统时,将采用非对称性设计的前端望远系统与分光系统进行一体化设计,可满足远心光路匹配、孔径匹配以及倾斜的一次像面匹配。并且前端望远系统非球面反射镜及校正镜的加入很好地校正了大孔径面视场引入的非对称性离轴像差。

2 大孔径面视场 PG 成像光谱仪基本原理

2.1 光谱仪结构

大孔径面视场 PG 成像光谱仪的光学结构如图 1 所示, YZ 为色散平面(即色散主截面,子午面), XZ 为空间平面(弧矢面)。一般的成像光谱仪为线视场成像,即在 YZ 平面上点入射,色散后产生光谱维,线视场的 XZ 平面为空间维,通过扫描获取二维空间图像。而面视场成像光谱仪在 YZ 平面也是线视场成像,通过微快门阵列、可调节微透镜阵列或哈达玛变换等方式解决空间信息

与光谱信息相重叠的问题,实现面视场光谱成像。

地物目标通过前端望远系统成像于一次像面上,采用微快门阵列、可调节微透镜阵列等方式对一次像面进行切割,在色散方向上通过微透镜阵列的整列选通或微快门阵列的整列开合完成空间方向的视场扫描,由此实现无需扫描镜的凝视型成像光谱仪的研制。当微透镜阵列或微快门阵列以非扫描方式工作时,可直接产生光谱重叠的面视场图像。如图1所示,通过孔径编码技术和哈达玛变换可以还原不同波长的原始图像^[20]。并且,同时成像(相对于扫描分时成像)的特点还减小了大气扰动对图像的影响。

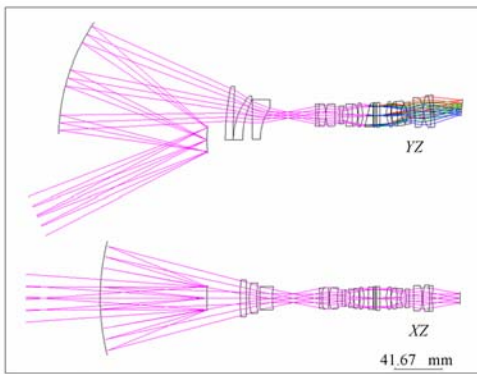


图1 大孔径面视场PG成像光谱仪的光学结构

Fig. 1 Optical structure of PG imaging spectrometer with large aperture and surface field

2.2 光谱仪PG组件及其分光原理

PG相较于PGP,舍弃了较难制作的体全息透射光栅,而采用成本较低的表面浮雕型透射光栅,在保证光栅效率的同时降低了成像光谱仪分光组件的成本。PG结构由棱镜、光栅以及400~1000 nm的带通滤光片构成,如图2所示。入射YZ平面的光束,中心波长通过棱镜色散后以接近布拉格角进入透射光栅。

一般成像光谱仪中,地物目标以狭缝像的形式经过分光系统的光学前组入射至PG组件中。在(YZ平面内的)狭缝像中心的光谱直接入射至棱镜与光栅的主截面上,而其它位置的光谱入射至非主截面内色散。在棱镜中,非主截面的色散顶角大于主截面内的色散顶角。设主截面内的色散顶角为 δ ,非主截面的色散顶角为 δ' ,即有:

$$\delta < \delta'. \quad (1)$$

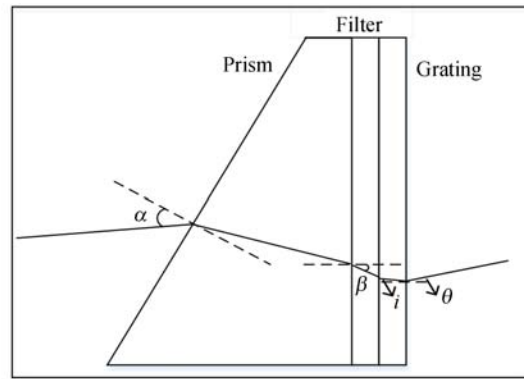


图2 分光组件的光路结构

Fig. 2 Optical structure of splitting components

根据棱镜角色散公式:

$$\frac{d\theta_p}{d\lambda} \propto \sin \delta \cdot \frac{dn}{d\lambda}, \quad (2)$$

其中: λ 为入射光波长, n 为折射率, θ_p 为棱镜色散角。棱镜对短波的色散能力较长波强,因此,经过棱镜的光线谱线弯曲弯向短波。同理,光线在光栅非主截面上色散时满足:

$$d(\sin i + \sin \theta) = \frac{m\lambda}{\cos \epsilon}. \quad (3)$$

光栅的角色散公式为:

$$\frac{d\theta_g}{d\lambda} = \frac{m}{d(\cos \theta) \cdot (\cos \epsilon)}, \quad (4)$$

其中: d 为光栅常数, i 为光线入射至光栅的角度在主截面上的投影, θ 为出射角在主截面上的投影, m 为光栅级次, λ 为入射光波长, ϵ 为入射光束与主截面之间的夹角(YZ平面上, $\epsilon=0$), θ_g 为光栅衍射角。所以,谱线弯曲弯向长波,在光栅非主截面色散的光线的角色散率更高,光栅对长波的色散能力更强。因此,棱镜与光栅的谱线弯曲方向正好相反,将光栅与棱镜组合使用可以很好地校正系统的谱线弯曲。

3 大孔径面视场PG成像光谱仪光学设计

3.1 设计指标

大孔径面视场成像光谱仪由于采用PG的分光形式,不仅具有较高的光学效率,而且易于实现较大的孔径。它结合离轴望远系统可以实现面视

场成像,详细设计参数如表 1 所示。

表 1 大孔径面视场 PG 成像光谱仪的设计参数

Tab. 1 Design parameters of PG imaging spectrometer with large aperture and surface field

设计参数	参数值
波段/nm	400~1 000
焦距/mm	55
F 数	2.8
光谱分辨率/nm	2.5
视场/(°)	8×6.24
探测器单像元尺寸/ μm^2	7.4×7.4
4×4 像元合并后的像元尺寸/ μm^2	29.6×29.6
探测器尺寸/ mm^2	14.0×7.0

3.2 光学系统设计

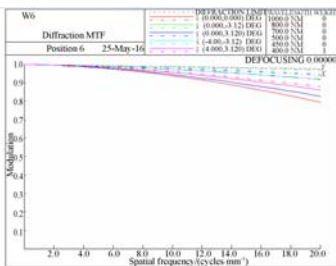
单波长不同视场的狭缝像在物像平面上有不同的横向放大率,因此,狭缝像在像面内产生弯曲。此外,不同视场的狭缝像在色散元件上的非主截面色散,由此引起的色散率变化也会产生谱线弯曲。色畸变是由不同波长的狭缝像的横向放大率差异引起的,在像面上表现为离轴视场点经过光谱成像系统所成的不同波长的像点与物点不在与狭缝长度方向垂直的一条直线上,而是形成一条斜线。面视场成像光谱仪通过微快门阵列或可调微透镜阵列的方式,连接前端望远系统和后端分光系统。通过微快门阵列或可调微透镜阵列的依序整列开合或选通实现对一次像面的切割,该一次像面可以看作由多个狭缝组成,每个狭缝都存在谱线弯曲和色畸变。因此,与一般成像光

谱仪相比,面视场成像再次提高了分光系统中谱线弯曲和色畸变的校正难度,而且还引入更大的非对称性和离轴像差,从而加大了望远系统和分光系统的大孔径设计难度。

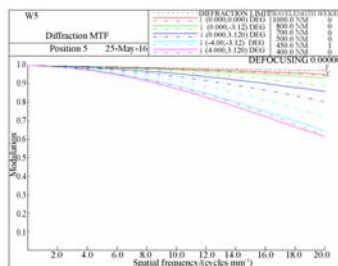
大孔径面视场 PG 成像光谱仪的前端望远系统采用离轴两反的形式。离轴两反系统是由同轴两反的初始设计演化而来,即把同轴系统在 YZ 平面上离轴化。非球面镜作为主镜与次镜,能较好地校正系统的球差、像散等像差。离轴结构引入的非对称性使一次像面在 YZ 平面内倾斜, XZ 平面是对称像面不存在倾斜,更容易满足前后系统匹配,同时还避免了中心遮拦的问题。在前端望远系统中加入一组校正透镜,很好地平衡了非对称像差,并且实现了与分光系统的物方远心光路匹配。分光系统采用 PG 的结构形式,前组准直系统和后组成像系统采用消色差设计,分别产生平行光进入 PG 分光元件并完成二次成像。系统的入射端(即前端望远系统成像的一次像面)在色散方向引入一定倾斜,校正了面视场色散的谱线弯曲和色畸变,实现了面视场的高质量成像。

3.3 系统的成像质量

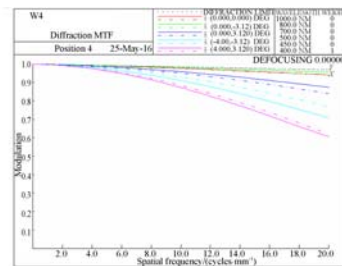
为了实现面视场的高质量成像,以及谱线弯曲和色畸变的校正,将前端望远系统与分光系统进行一体化设计,以满足前后系统的匹配。设计的大孔径面视场 PG 成像光谱仪在 400,450,500,700,800,1 000 nm 处的光学调制传递函数曲线如图 3 所示,在截频位置全波段全视场的光学调制传递函数(CCD 采用 4×4 像元合并)均能达到 0.65 以上,满足设计要求。



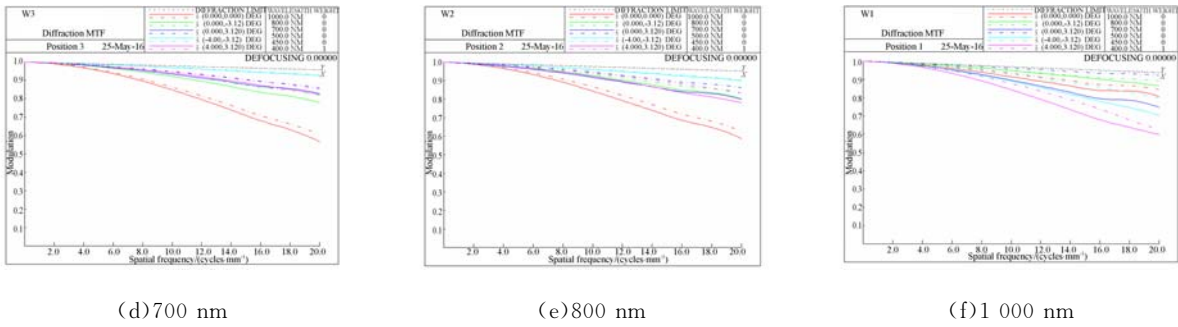
(a) 400 nm



(b) 450 nm



(c) 500 nm



(d)700 nm

(e)800 nm

(f)1 000 nm

图 3 各波长处 PG 成像光谱仪光学系统的调制传递函数

Fig. 3 MTFs of optical system of PG imaging spectrometer at different wavelengths

目前,已完成大孔径面视场 PG 成像光谱仪分光系统的加工与装调,分光系统整机及测试现场分别如图 4 及图 5 所示。

系统全视场全谱段的谱线弯曲和色畸变校正情况分别如图 6 和图 7 所示。通过一体化设计使分光系统的入射端(即前置望远系统的成像端)在色散方向上有一定倾斜,很好地校正了色散和离轴引入的非对称性像差。棱镜-光栅的组合有效地补偿了谱线弯曲,并且分光系统前后的透镜组

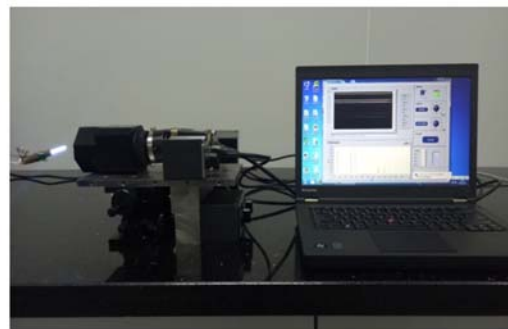


图 5 分光系统测试图

Fig. 5 Testing of splitting system

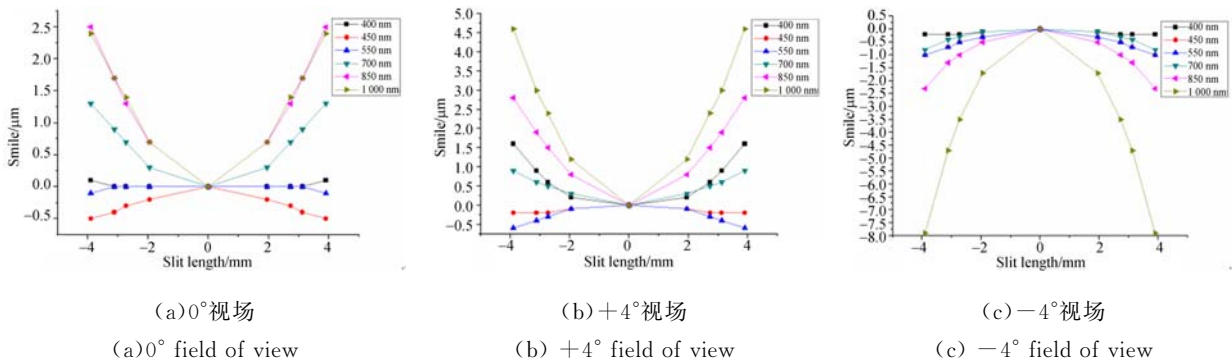


图 4 分光系统整机图

Fig. 4 Picture of splitting system

可以进一步校正谱线弯曲和色畸变。整个系统全谱段的谱线弯曲均小于 $5 \mu\text{m}$,色畸变均小于 $8 \mu\text{m}$,满足系统的高质量成像要求。

图 8(a)为积分时间为 0.6 ms 时短波处的汞灯光谱图。图 8(b)为积分时间为 20 ms 时长波处的汞灯光谱图。根据汞灯特征波长的反演计算可得仪器在短波处的实际分辨率优于 2.297 nm,长波处的分辨率优于 2.471 nm,因此,全谱段分辨率优于 2.5 nm。



(a)0° 视场

(a)0° field of view

(b)+4° 视场

(b)+4° field of view

(c)-4° 视场

(c)-4° field of view

图 6 全视场不同波长的谱线弯曲

Fig. 6 Smiles for different wavelengths in full field of view

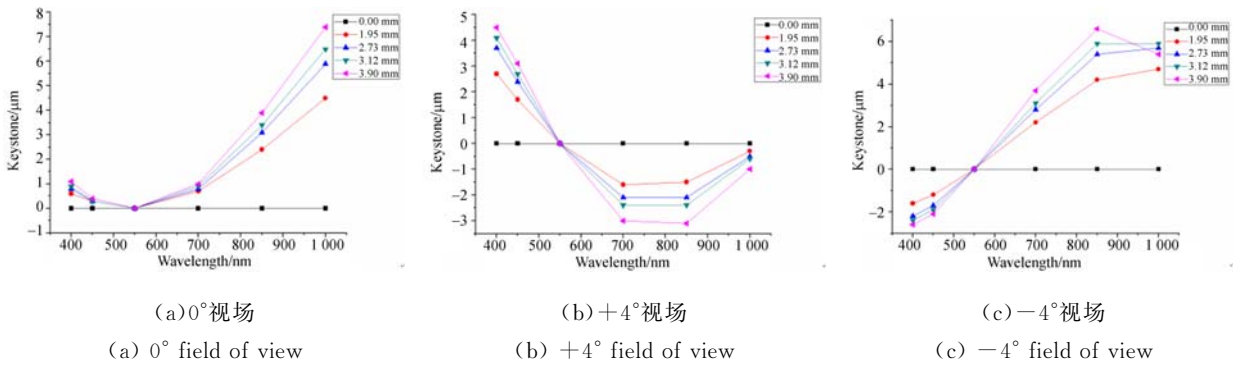


图 7 全视场不同缝高的色畸变

Fig. 7 Keystones for different slit heights in full field of view

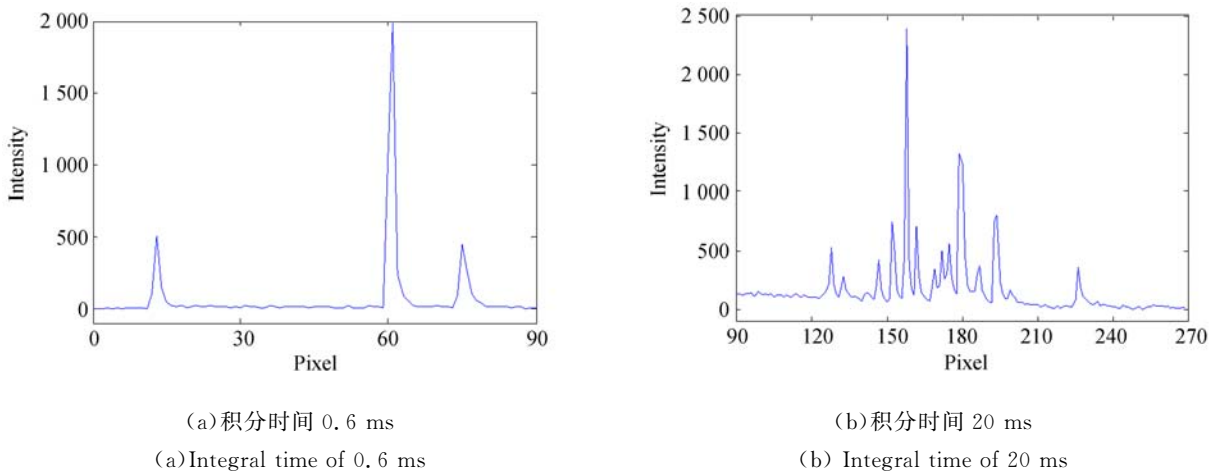


图 8 PG 成像光谱仪拍摄的汞灯光谱图

Fig. 8 Spectra of Hg lamp recorded by PG imaging spectrometer

4 结 论

本文设计了一种基于 PG 分光的大孔径面视场成像光谱仪,有效地提高了系统的光学效率和工作效率。该光谱仪采用一体化的设计方式,满足系统匹配的要求。通过棱镜与光栅的相互作用

以及校正透镜组的加入,很好地校正了系统的谱线弯曲和色畸变,整个系统的谱线弯曲小于 $5 \mu\text{m}$,色畸变小于 $8 \mu\text{m}$ 。光谱仪的视场达 $8^\circ \times 6.24^\circ$, F 数为 2.8,波段为 $400 \sim 1\,000 \text{ nm}$,分辨率达 2.5 nm ,全谱段全视场的光学调制传递函数值均大于 0.65,满足大孔径、面视场及高成像质量的设计要求。

参考文献:

- [1] 郑玉权,王慧,王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2629-2637.
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyper-

- spectral imagers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2629-2637. (in Chinese).
[2] 崔毅. 推扫式宽视场 CCD 成像光谱技术研究[D]. 上海: 中科院上海技术物理研究所, 2014.
CUI Y. *Study of Large Field Push-broom Imaging Spectrometer Using CCD Detector* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics

- of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [3] 张晶. 临边成像光谱仪的发展现状与进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 692-700.
ZHANG J. Status and development of limb imaging spectrometers[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 692-700. (in Chinese)
- [4] 刘玉娟. 基于同心光学系统的新型成像光谱仪研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
LIU Y J. *The Study on Newly Imaging Spectrometers Based on Concentric Optics* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, 2012. (in Chinese)
- [5] 撤芃芃. 成像光谱仪同心光学系统的研究[J]. 中国光学, 2009, 2(2): 157-162.
HAN P P. Research of concentric optical systems of imaging spectrometers[J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(2): 157-162. (in Chinese)
- [6] 陈洪福. 棱镜-光栅型光谱仪成像技术研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
CHENG H F. *Study of Spectral Imaging Technology Based on Prism-grating Component* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, 2014. (in Chinese)
- [7] MANSUR D J, DUPUIS J R, VAILLANCOURT R V. Fiber optic snapshot hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 2012, 8360: 836007.
- [8] LEE D, BARLOW J, VICK A, *et al.*. PERSIST-Prototype Earth observing System using Image Slicer Mirrors [J]. *SPIE*, 2012, 8533: 85330T.
- [9] KRIESEL J, SCRIVEN G, GAT N. Snapshot hyperspectral fovea vision system (hyper video) [J]. *SPIE*, 2012, 8390: 28-33.
- [10] BLECHIN GER B, HARNISCH B, KUNKEL B P. Optical concepts for high-resolution imaging spectrometers [J]. *SPIE*, 1995, 2480: 165-179.
- [11] 于磊, 林冠宇, 曲艺. 高分辨率星载真空紫外成像光谱仪设计与研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(12): 3417-3422.
YU L, LIN G Y, QU Y. Design and study of a high resolution vacuum ultraviolet imaging spectrometer carried by satellite[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(12): 3417-3422. (in Chinese)
- [12] CUTTER M A, LOBB D R, COCKSHOTT R A. Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS) [J]. *Acta Astronautica*, 2000, 46(2-6): 263-268.
- [13] FOLKMAN M A, PEARLMAN J, LIAO L B, *et al.*. EO-11 Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration [J]. *SPIE*, 2001, 4151: 40-51.
- [14] MOUROULIS P, GREEN R O, WILSON D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(12): 9087-9096.
- [15] 杨晋, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 基于Dyson同心光学系统的消色差Féry棱镜高光谱成像仪的设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1130003.
YANG J, TANG Y G, BAYANHESHIG, *et al.*. Design of Dyson concentric optical hyperspectral imaging system with achromatized Féry prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1130003. (in Chinese)
- [16] 杨增鹏. 棱镜-光栅型高光谱成像光谱仪优化设计及集成技术研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
YANG Z P. *Optimization Design Method and Integration Technology for Prism-grating Hyperspectral Imaging Spectrometer* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, 2015. (in Chinese)
- [17] 吴从均, 颜昌翔. 棱镜-光栅-棱镜型光谱成像系统光学设计[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 37-43.
WU CH J, YAN CH X. Imaging spectrometer optical design based on prism-grating-prism dispersing device [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 37-43. (in Chinese)
- [18] LOBB D R. Imaging spectrometers using concentric optics [J]. *SPIE*, 2011, 3118: 339-347.
- [19] 何天博, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 棱镜-光栅-棱镜分光模块整体化设计及衍射特性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 279-284.

HE T B, BAYANHESHIG, LI W H, *et al.*. Integration design and diffraction characteristics analysis of prism-grating-prism [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(1): 279-284. (in Chinese)

[20] WU Y H, ARCE G R, PRATHER D W. Experi-

mental demonstration of an NIR compressive sensing hyper-spectral imaging system [C]. *Imaging and Applied Optics Technical Papers*, OSA Technical Digest, *Optical Society of Optics*, 2012: ATH1A. 4.

作者简介:



杨 晋(1988—),男,广东惠州人,博士研究生,助理研究员,2010年于中国科技大学获得学士学位,2013年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事分光系统光学设计及杂散光的研究。E-mail: yang_jin1988@163.com

通讯作者:



张 锐(1990—),女,甘肃兰州人,博士研究生,2013年于兰州大学获得学士学位,主要从事光谱仪器研发及光谱信息处理技术的研究。E-mail: zhangrui_grating@163.com