

星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究

薛庆生^{1,2} 王淑荣¹ 鲁凤芹³

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100039; ³ 上海理工大学理学院, 上海 200093)

摘要 为克服传统的车尔尼-特纳型光谱仪像差较大、空间分辨率低等缺点,提出了一种星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正方法。具体分析了解差校正的原理和方法,利用这种方法设计了视场角为 2.3° , 焦距为 114.18 mm, F 数为 3.81, 工作波段为 540~850 nm 星载车尔尼-特纳型成像光谱仪光学系统,运用光学设计软件 Zemax 对成像光谱仪总的光学系统进行光线追迹和优化,并对设计结果进行分析。结果表明,该系统的像差得到充分校正,全视场调制传递函数值在 540~850 nm 波段达 0.58 以上,完全满足设计指标要求,也证明了所提出的像差校正方法的可行性。

关键词 光谱学; 成像光谱仪; 光学设计; 像差校正; 车尔尼-特纳

中图分类号 O433.1; TH744.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20092901.0035

Aberration Correction of Czerny-Turner Imaging Spectrometer Carried by Satellite

Xue Qingsheng^{1,2} Wang Shurong¹ Lu Fengqin³

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract To avoid the problems of the classical Czerny-Turner imaging spectrometer, such as large aberration and low spatial resolution, a novel method of aberration correction for Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite is developed. The principle and method of aberration correction are deduced in detail. A design example operating in 540~850 nm wavelength band with 2.3° field of view, 114.8 mm focal length, 3.81 F number is designed. The ray tracing and optimization for the optical system are carried out with Zemax software. The results demonstrate that the aberration of the optical system is substantially corrected, and the modulation transfer function of total field of view is more than 0.58, which satisfies the requirement, and proves the feasibility of the method.

Key words spectroscopy; imaging spectrometer; optical design; aberration correction; Czerny-Turner

1 引言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代开始在多光谱遥感成像技术的基础上发展起来的新一代光学遥感仪器,它是遥感技术的进步和发展,能够以高光谱分辨率获取景物和目标的超多谱段图像,在大气、海洋和陆地观测中正在得到广泛的应用^[1~3]。

成像光谱仪是成像技术与光谱技术的有机结

合,它的光学系统一般由望远系统和光谱仪系统组成。其中光谱仪系统为核心,采用的分光技术直接影响整个成像光谱仪的性能、结构的复杂程度、重量和体积等。以平面衍射光栅作为色散元件的成像光谱仪具有高色散率、高光谱分辨率、光谱均排性等优点,受到极大关注^[4]。在传统的平面光栅光谱仪中,采用最多的是车尔尼-特纳型结构,因为它用两块小

收稿日期: 2008-03-24; 收到修改稿日期: 2008-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(40675083)资助课题。

作者简介: 薛庆生(1979-),男,博士研究生,主要从事空间紫外遥感仪器及光学系统设计方面的研究。

E-mail: qshxue2006@163.com

作者简介: 王淑荣(1961-),女,研究员,博士生导师,主要从事空间紫外遥感仪器及成像光谱技术方面的研究。

E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

球面反射镜分别作为准直镜和聚焦镜来代替 Ebert-Fastie 型结构中的大凹面反射镜,两块反射镜曲率中心重合,中间分开,这样通过合理的设计两块反射镜的口径,不仅可以避免二次衍射和多次衍射,同时也方便反射镜的加工与装调。传统的车尔尼-特纳型光谱仪是以光电倍增管等单通道探测器作为光电转换器件,通过转动光栅输出不同波长的光谱,通常只对中心波长校正像差,由于不要求仪器的空间分辨率,对像差校正要求不严格。但车尔尼-特纳型成像光谱仪作为星载的遥感仪器,以面阵 CCD 探测器作为成像探测器,光栅不动,以高光谱分辨率获取景物和目标的超多谱段图像,不但要求高光谱分辨率,而且还要求具有一定的空间分辨率,不但中心波长的像差校正要求比传统的光谱仪高,而且还要校正边缘波长的像差,因此就对车尔尼-特纳型成像光谱仪的像差校正提出了更高的要求。

本文基于反射式光学系统的几何光学像差理论,详细分析了车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的原理和方法,运用该方法设计了一个星载车尔尼-特纳型成像光谱仪光学系统,并对设计结果进行了分析与评价。

2 像差校正原理及校正方法

2.1 球差

球差对称地扩展谱线宽度,用凹球面反射镜作为准直镜时,必须控制球差在像差容限以内,使仪器尽可能达到最高的分辨率。根据瑞利准则,由球差所产生的波像差应小于 $\lambda/4$ ^[5],即

$$W_{S(\max)} = y_{\max}^4 / (8r^3) \leq \lambda/4, \quad (1)$$

其中 W_S 为由球差产生的波像差, r 为球面镜的曲率半径, y_{\max} 为球面镜的半口径。由(1)式可得球面镜的焦距与许可的 $F(F = f/D)$ 之间的关系,如(2a)式和(2b)式所示:

$$f \leq 256 \cdot \lambda \cdot F^4, \quad (2a)$$

$$D \leq 256 \cdot \lambda \cdot F^3. \quad (2b)$$

2.2 彗差

车尔尼-特纳型结构的光学系统原理图如图 1 所示。从图 1 可以看出,在车尔尼-特纳型结构中,由于光线对反射镜离轴入射而产生彗差。彗差不仅使谱线轮廓增宽,而且使谱线单边扩散,成为不对称的模糊像,严重影响分辨率。在车尔尼-特纳型结构中,消彗差条件应满足 Shafer 方程^[6],如(3)式所示:

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

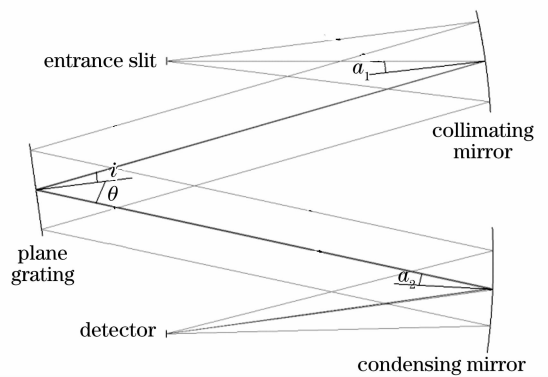


图 1 车尔尼-特纳型结构成像光谱仪光学系统原理图

Fig. 1 Optical setup of the Czerny-Turner imaging spectrometer

其中 α_1, α_2 分别为中心光线对准直镜和聚焦镜的离轴角, i, θ 分别为对光栅的入射角和衍射角, r_1, r_2 分别为准直镜和聚焦镜的曲率半径。(3)式中,由于离轴角 α_1 (通常 $5 \sim 8^\circ$), α_2 (通常 $8 \sim 10^\circ$) 较小,所以 $\cos^3 \alpha_1 \approx \cos^3 \alpha_2 \approx 1$, 故(3)式可近似表示为

$$\sin \alpha_2 = (r_2^2 / r_1^2) (\cos i / \cos \theta)^3 \sin \alpha_1. \quad (4)$$

根据(4)式,先选定 $\alpha_1, r_1, r_2, i, \theta$, 通过优化对聚焦镜的入射角 α_2 来校正彗差。其中 i 和 θ 由光栅刻线数和光栅的几何结构决定,满足色散方程(5)

$$d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda, \quad (5)$$

式中 m 为衍射级次, λ 为波长, d 为光栅常数。

2.3 像散

在采用两个球面反射镜的传统车尔尼-特纳型光谱仪中,由于像散,狭缝像沿狭缝高度方向上被扩展到几毫米。然而,这在传统的光谱仪中通常是可以忽略的,因为单通道探测器(例如光电倍增管)的光敏面直径(通常大于等于 20 mm)远大于狭缝像在狭缝高度方向上的扩展。但是,这种情况对运用 CCD 作为成像探测器的成像光谱仪而言是不可接受的,因为 CCD 探测器的像元尺寸只有几到几十微米。像散的存在主要由于反射镜在子午方向和弧矢方向的焦长不同,子午和弧矢方向的焦长可分别用(6)式和(7)式表示^[7]:

$$f_{T_n} = (r_{T_n} / 2) \cos \alpha_n, \quad (6)$$

$$f_{S_n} = r_{S_n} / (2 \cos \alpha_n), \quad (7)$$

其中 $n = 1, 2$ 分别表示准直镜和聚焦镜。从(6)式和(7)式可以看出,弧矢面内的光线比子午面内的光线具有更长的焦长。所以沿弧矢面的扩展焦长 Δf 可以表示为

$$\Delta f = (f_{S_1} f_{T_1}) + (f_{S_2} f_{T_2}), \quad (8)$$

从(8)式可见,用一个超环面聚焦镜来校正像散,它

在子午方向和弧矢方向产生不同的焦距,即 $f_{s_2} < f_{T_2}$,从而使 $\Delta f \approx 0$ 。像散校正不依赖于波长,但依赖于对准直镜和聚焦镜的入射角。然而校正彗差时的最佳入射角度依赖于入射角和衍射角,所以也就与波长相关。通过控制对聚焦镜的入射角 α_2 和聚焦镜的弧矢焦距 f_{s_2} 来分别校正彗差和像散,这样就可以得到基本的光学结构参数。

2.4 中心波长和边缘波长像差

已叙述的对彗差和像散的校正都是对中心波长而言。但不同波长的光线从光栅出射的衍射角不同,从而不同波长的光线对聚焦镜的入射角度 α_2 不同。好像不能对不同波长的光线同时校正像差,因为不同波长的光线具有不同的校正像差的最佳条件。然而通过采用一个特殊的光学结构,中心波长和边缘波长像差可以同时得到校正。Masayuki Futamata^[8]提出并证明当光栅到聚光镜的距离 $L_{g-cd} = r_{T_2} \cos \alpha_2$ 时,探测器中心和边缘波长光线对聚焦镜的入射角 α_2 近似相同,而且这种关系不依赖于探测器的尺寸、光栅刻线密度、聚焦镜的焦长,从而探测器中心和边缘波长可以得到同时校正。这种光学结构比传统的车尔尼-特纳结构尺寸大,但它适用于短焦距、高分辨率的成像光谱仪。

3 设计实例和设计结果分析

3.1 设计实例

根据已叙述的像差校正原理和方法,设计了一个星载车尔尼-特纳型成像光谱仪光学系统。它由前置望远系统和光谱仪系统组成,中心波长(695 nm)和边缘波长(540 和 850 nm)的光路如图 2 所示。轨道高度为 277.8 km,仪器与临边观测点的距离为 1903 km,整个系统总焦距为 114.18 mm,系统 F 数为 3.81。仪器主要特性参数如表 1 所示。面阵 CCD 作为成像探测器,CCD 探测器像元尺寸为 $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$,对应的奈奎斯特频率为 20 lp/mm。为减小成像光谱仪整体的体积和重量,前置望远系统采用由三片分离透镜组成的折射系统,材料为熔石英和 CaF_2 。前置望远系统的球差、彗差、色差等像差都得到很好的校正,狭缝处的点列图分布如图 3 所示。光谱仪系统采用车尔尼-特纳型光学结构,准直镜采用球面反射镜,为校正系统像散,聚焦镜采用超环面反射镜。光栅采用平面衍射光栅,经准直镜准直的平行光束对光栅的入射角 $i = -3^\circ$,取衍射级次 $m = 1$,对中心波长 $\lambda = 695 \text{ nm}$,由(5)式求得衍射角 $\theta = 15.12^\circ$ 。

表 1 成像光谱仪特性参数

Spatial resolution /km	0.8
Target spial coverage /km	0~75 (above the earth surface)
Spectral coverage /nm	540~850
Spectral resolution /nm	0.7
Instrument FOV /($^\circ$)	2.3
Diameter of entrance pupil /mm	30
Telescope focal length /mm	120
Grating density / g/mm	300
CCD array size /pixel	1024 (spectrum) \times 200 (space)
CCD pixel size / μm	24 \times 24

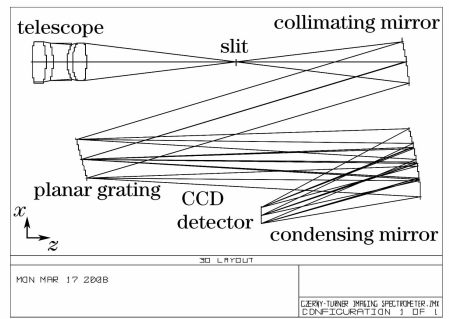


图 2 中心波长和边缘波长光路图

Fig. 2 Light path for the central wavelength and marginal wavelength in the designed imaging spectrometer

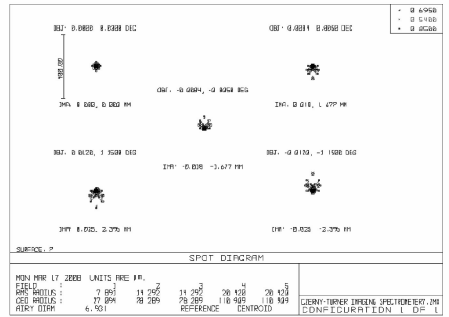


图 3 狭缝处点列图分布

Fig. 3 Spot diagram at the slit

3.2 设计结果分析

先根据(4)式校正彗差,用一个球面聚焦镜来显示由于像散而使像沿狭缝高度方向的扩展。如图 4(a)所示,物空间一点在像面上成的扩展像的大小近似为 $200 \mu\text{m}$ (狭缝宽度方向) \times 1 mm (狭缝高度方向)。然后根据(5)式和(6)式,用超环面聚焦镜来校正像散,并调节像面位置。如图 4(b)所示,此时像的大小近似为 $100 \mu\text{m}$,像散得到充分校正,从而也证明了这种利用超环面校正像散的方法的可行性。为表明光栅到聚焦镜的距离 L_{g-cd} 对中心波长和边缘波长像差校正的影响,将 L_{g-cd} 取不同数值来分析比较

系统的像差特性。当 $L_{g-cd} = r_{T_2} \cos \alpha_2$ 时,如图 5(a)~图 5(c)所示,中心波长(695 nm)和边缘波长(540 nm 和 850 nm)均得到近似圆形的点像,即中心波长和边缘波长的像差均得到较好的校正。当 $L_{g-cd} = r_{T_2} \cos \alpha_2 \pm 100$ mm 时,如图 6(a)~图 6(c)和图 7(a)~图 7(c)所示,中心波长(695 nm)的像差得到较好的校正而边缘波长(540 nm 和 850 nm)仍有明显的像差,应该指出的是,图 5(a)~图 5(c),图 6(a)~图 6(c)

和图 7(a)~图 7(c)中的点列图是对中心波长 695 nm 优化的,但并不是整个成像光谱仪系统最终优化的结果,对其比较只是为了说明 L_{g-cd} 的取值对中心波长和边缘波长的像差差异有重要影响。所以要使中心波长和边缘波长(即整个工作波段)的像差均得到较好的校正,距离 L_{g-cd} 的取值是至关重要的。光谱仪系统像差校正过程的光学结构参数如表 2 所示。

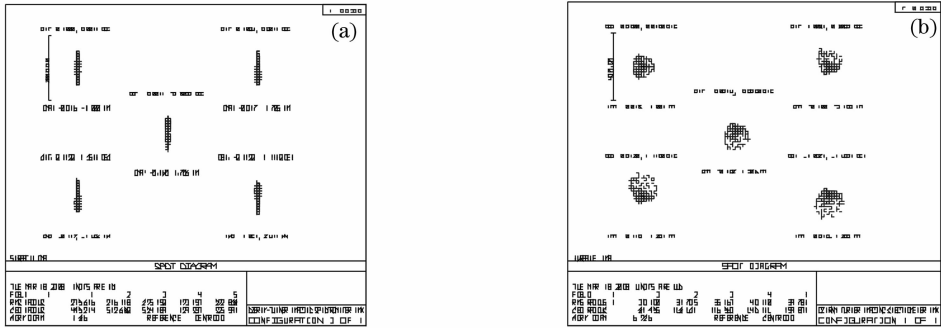


图 4 像面点列图分布 (a) 两个球面镜分别作为准直镜和聚焦镜; (b) 球面镜作为准直镜,超环面镜作为聚焦镜
Fig. 4 Spot diagrams at the image plane (a) with two spherical mirrors as collimating and condensing mirrors and (b) with a spherical collimating mirror and a toroidal condensing mirror

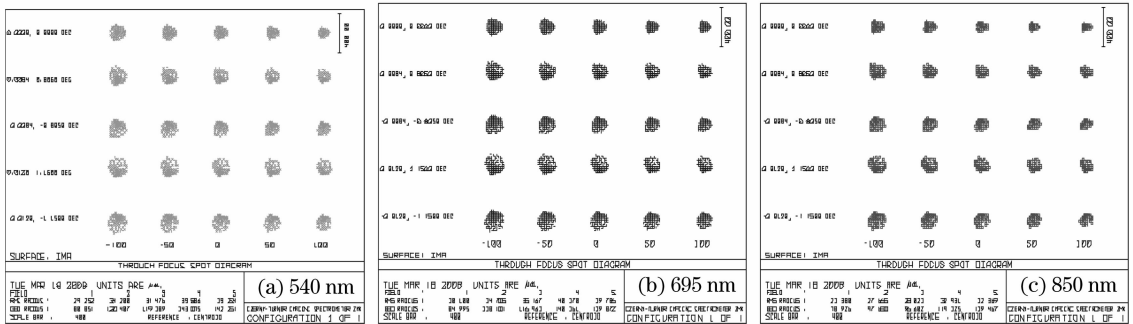


图 5 $L_{g-cd} = r_{T_2} \cos \alpha_2$ 时,中心波长和边缘波长的点列图
Fig. 5 Spot diagram of the central and marginal wavelengths for the optimized $L_{g-cd} = r_{T_2} \cos \alpha_2$

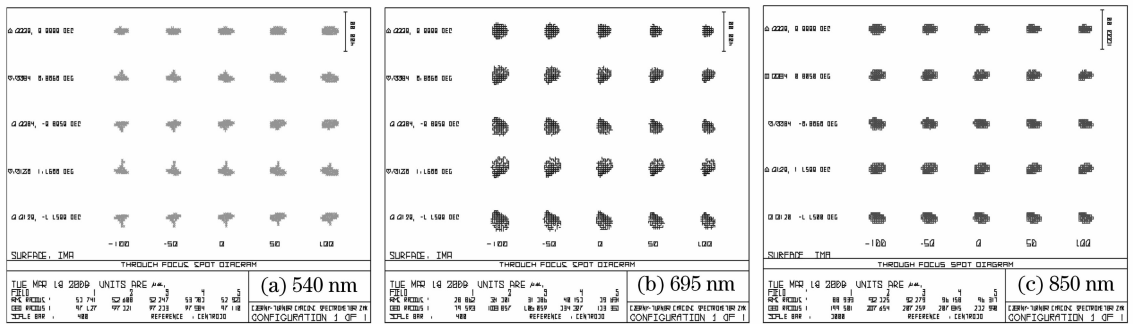


图 6 $L_{g-cd} = r_{T_2} \cos \alpha_2 - 100$ 时,中心波长和边缘波长的点列图

Fig. 6 Spot diagram of the central and marginal wavelength for $L_{g-cd} = r_{T_2} \cos \alpha_2 - 100$

运用光学设计软件 ZEMAX 对成像光谱仪总的光学系统进行光线追迹和优化,优化后的光谱仪

系统的光学结构参数如表 2 所示。中心波长和边缘波长的调制传递函数(MTF)曲线如图 8(a)~8(c)

所示,从中可以看出,设计的成像光谱仪光学系统在空间频率为 20 lp/mm(所用 CCD 的奈奎斯特频率)时,全视场调制传递函数(MTF)值在 540~850 nm 波段达 0.58 以上,完全满足设计指标要求。

表 2 光谱仪系统的光学参数

Table 2 Optical parameters of the designed spectrometer system

Specifications	Coma-corrected spectrometer	Astigmatism-corrected spectrometer	Optimized spectrometer
$r_{T_1} = r_{S_1} = r_{T_2} / \text{mm}$	240	240	240
r_{S_2} / mm	240	230.919	231.432
$\alpha_1 / (^\circ)$	7.5	7.5	7.5
$\alpha_2 / (^\circ)$	8.3	8.3	8.0
$L_{g\text{-cd}} / \text{mm}$	237.486	237.486	237.664

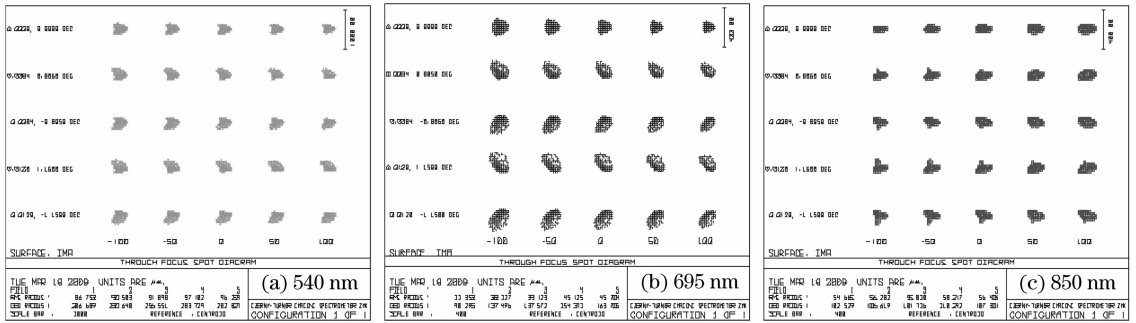


图 7 $L_{g\text{-cd}} = r_{T_2} \cos \alpha_2 + 100$ 时,中心波长和边缘波长的点列图

Fig. 7 Spot diagram of the central and marginal wavelength for $L_{g\text{-cd}} = r_{T_2} \cos \alpha_2 + 100$

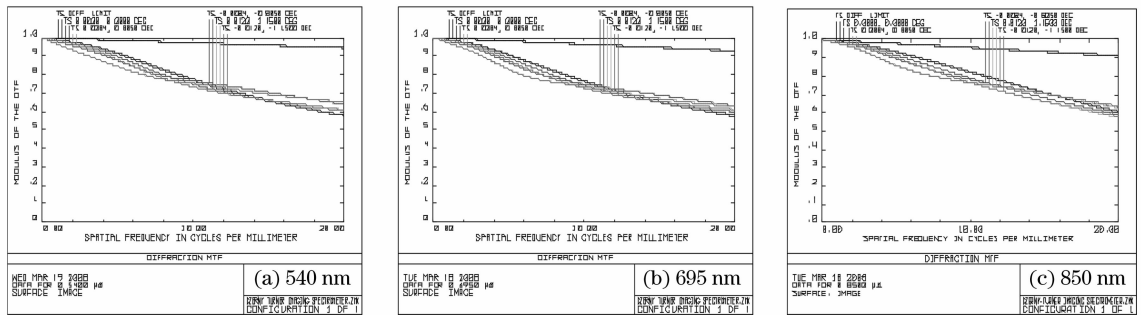


图 8 中心波长和边缘波长的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF of the central and marginal wavelengths

4 结 论

提出了星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正方法,根据瑞利判据选择准直镜的 F 数,把球差控制在像差容限以内,通过调节对聚焦镜的入射角来校正彗差,用超平面聚焦镜来校正像散,恰当选择光栅与聚焦镜的距离来校正中心波长和边缘波长像差。利用这种方法设计了视场角为 2.3° ,焦距为 114.18 mm, F 数为 3.81,工作波段为 540~850 nm 的星载车尔尼-特纳型成像光谱仪,用光学设计软件 Zemax 进行优化,并对设计结果进行分析,分析结果表明,所设计的成像光谱仪光学系统像差得到充

分校正,全视场调制传递函数(MTF)值在 540~850 nm 波段达 0.58 以上,完全满足成像质量要求。本文提出的像差校正方法对星载车尔尼-特纳成像光谱仪的研究、研制和工程化提供了重要的理论依据和实践指导。

参 考 文 献

1 Jian Xiaohua, Zhang Chunmin, Sun Yao *et al.*. Novel polarization interference imaging spectrometer with adjustable lateral displacement Savart polariscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 643~646
 简小华,张淳民,孙尧等.一种可调横向剪切量的新型偏振干涉成像光谱仪[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 643~646
 2 Peng Zhihong, Zhang Chunmin. Influence of depth of field on

- resolution of a microscope polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 239~243
- 彭志红, 张淳民. 显微偏振干涉成像光谱仪中景深对系统分辨力的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 239~243
- 3 Zhang Chunmin, Wang Wei, Xiangli Bin *et al.*. Interference of imaging spectroscopy for upper atmospheric wind field measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 234~239
- 张淳民, 王伟, 相里斌等. 利用干涉成像光谱技术测量大气风场[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 234~239
- 4 Zheng Yuquan, Yu Bingxi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. *J. Remote Sensing*, 2002, **6**(1): 75~80
- 郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. *遥感学报*, 2002, **6**(1): 75~80
- 5 Lin Zhong, Fan Shifu. *Spectral Instruments*[M]. Beijing: China Machine Press, 1988, 115~116
- 林中, 范世福. *光谱仪器学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988, 115~116
- 6 Arthur B. Shafer, Lawrence R. Megill, Leann Droppleman. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**: 879~887
- 7 Peter Lindblom. Theory of two-mirror plane-grating spectrograph[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**: 756~762
- 8 Masayuki Futamata, Takehiko Takenouchi, Kei-ichi Katakura. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4655~4665