

文章编号 1004-924X(2015)01-0015-07

## 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪

陈 伟, 郑玉权, 薛庆生\*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**根据宽视场大相对孔径成像光谱仪的应用要求和技术指标,采用离轴 Schwarzschild 望远成像系统和双 Schwarzschild 光谱成像系统匹配的结构型式,设计了一个视场为  $28^\circ$ 、相对孔径为  $1/2.5$ 、工作波段为  $0.4\sim 1\ \mu\text{m}$  的机载成像光谱仪光学系统;根据双 Schwarzschild 光谱成像系统的像散校正条件计算了初始结构参数。然后,利用光学设计软件 ZEMAX-EE 进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行了分析与评价。结果显示:光谱成像系统中心波长和边缘波长 88% 以上的能量集中在一个探测器像元内;谱线弯曲和谱带弯曲均小于像元的 5%,便于光谱和辐射定标;成像光谱仪全系统在各个波长的光学传递函数均达到 0.59 以上,完全满足设计指标要求。该成像系统体积小、重量轻,非常适合航空遥感应用。

**关键词:**光学设计;成像光谱仪;离轴 Schwarzschild 望远成像系统;双 Schwarzschild 光谱成像系统;海洋水色

**中图分类号:**TP73;TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0015

## Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture

CHEN Wei, ZHENG Yu-quan, XUE Qing-sheng\*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: qsh.xue2006@163.com

**Abstract:** According to the requirements of an airborne imaging spectrometer for the wide angle and large relative-aperture, an optical system for the airborne imaging spectrometer was designed using an off-axis Schwarzschild telescopic system and a double-Schwarzschild spectral imaging system. The imaging spectrometer has specifications by a field of view of  $28^\circ$ , a relative-aperture of  $1/2.5$ , and working waveband from  $0.4\ \mu\text{m}$  to  $1\ \mu\text{m}$ . Based on the astigmatism-correction condition of double-Schwarzschild spectral imaging system, the initial parameters were calculated. Then, the ray tracing and optimization design were performed by ZEMAX software. The analysis and evaluation on the design show that 88% of the encircled energy for centric and edge wavelengths is within one pixel; both smile and keystone are less than 5% of the size of one pixel, so it is easy for spectral and radiation calibrations. Moreover, the MTF of imaging spectrometer is more than 0.59 for different wavelengths, which satisfies the requirements of specifications. As the spectrometer has a smaller volume and lower mass, it is suitable for airborne remote sensing.

**Key words:** optical design; imaging spectrometer; off-axis Schwarzschild telescopic imaging system; double-Schwarzschild spectral imaging system; ocean colour

收稿日期:2014-02-15;修订日期:2014-04-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41105014);中国科学院长春光学精密机械与物理研究所知识创新工程领域前沿资助项目

## 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基础上发展起来的一种新型航空、航天光学遥感仪器。它能同时获取目标的高光谱分辨率和高空间分辨率的信息,在海洋、陆地和大气遥感等航空和航天领域的应用越来越广泛<sup>[1-4]</sup>。

目前,国际上具有代表性的机载成像光谱仪有美国的便携式海洋探测成像光谱仪 (PHILIS)<sup>[5]</sup> 和先进航空成像光谱仪系统 (AAHIS)<sup>[6]</sup> 等,PHILIS 的相对孔径为 1/4,工作波段为 400~1 000 nm,AAHIS 的相对孔径为 1/3,工作波段为 390~840 nm,视场为 20°。这些成像光谱仪在航空遥感中发挥了重要作用,但其缺点是视场覆盖宽度和相对孔径小、集光能量弱。近年来,随着航空遥感应用的不断发展,人们对成像光谱仪的视场覆盖宽度和相对孔径的要求也越来越高。这是由于视场覆盖宽度越大,回访周期越短,仪器的时间分辨率就越高。另外,成像光谱仪的像面照度与相对孔径的平方成正比,相对孔径越大,仪器的集光能力就越强,信噪比就越高。在海洋水色遥感等领域,目标的反射率较低,在保证光学系统的光谱分辨率为 2 nm、地面像元分辨率为 5 m、信噪比大于 200 的条件下,成像光谱仪的相对孔径要大于 1/3,另外,视场覆盖宽度要大于 26°。而现有的成像光谱仪的视场最大(如 AAHIS)仅为 20°,不能满足海洋遥感的应用需求。因此迫切需要解决现有成像光谱仪光学系统视场覆盖范围较小、相对孔径较小、集光能力较弱的问题。此外,航空遥感应用还要求成像光谱仪具有小型化和轻量化的特点。

成像光谱仪的光学系统由望远成像系统和光谱成像系统组成,二者通过入射狭缝连接在一起<sup>[7]</sup>。目标的一个条带先经望远成像系统成像在入射狭缝上,入射狭缝经光谱成像系统色散后分波长成像在面阵焦平面探测器上,再随平台运行方向推扫得到图谱合一的图像。在成像光谱仪的研制过程中,光学系统设计直接影响着整个成像光谱仪的性能、结构、质量和体积等。

本文根据宽视场大相对孔径成像光谱仪的应用要求和技术指标,采用离轴 Schwarzschild 望远成像系统和双 Schwarzschild 光谱成像系统匹配

的结构形式设计了机载宽视场大相对孔径成像光谱仪的光学系统。根据双 Schwarzschild 光谱成像系统像散的校正条件计算初始结构参数,然后利用光学设计软件 ZEMAX-EE 进行了优化设计,并对设计结果进行了分析与评价。

## 2 机载成像光谱仪的主要技术指标

机载成像光谱仪要求在 0.4~1 μm 光谱范围内对海洋水色进行高分辨率成像光谱探测,飞行轨道高度  $H$  为 10 km 时,要求刈幅宽度  $GW=5$  km,地面像元分辨率  $GSD=5$  m,光谱分辨率  $\leq 2$  nm,信噪比大于 200,探测器采用英国 e2V 公司生产的 CCD 探测器,CCD 探测器的像元数为  $1\ 024 \times 1\ 024$ ,像元尺寸  $p$  为 13 μm。根据以上要求,成像光谱仪光学系统的主要技术指标如表 1 所示。根据飞行高度  $H$  和地面像元分辨率  $GSD$  的要求,确定成像光谱仪全系统的焦距  $f'_s$  为:

$$f'_s = \frac{p \cdot H}{GSD} = 26 \text{ mm}. \quad (1)$$

光谱成像系统的变倍比取 1/1,则望远成像系统的焦距  $f'_t$  也为 26 mm。根据飞行高度  $H$  和刈幅宽度的要求,确定成像光谱仪的视场 FOV 为:

$$\text{FOV} = 2 \arctan \left( \frac{GW}{2H} \right) = 28^\circ. \quad (2)$$

根据海洋目标的光谱辐射特性和 CCD 探测器的性能参数,确定成像光谱仪光学系统的相对孔径为 1/2.5。

表 1 成像光谱仪光学系统主要技术指标

Tab. 1 Specifications of optical system in imaging spectrometer

Parameter	Value
Field of View (FOV)/(°)	28
Focal length of telescope $f'_t$ /mm	26
Focal length of system $f'_s$ /mm	26
Relative aperture	1/2.5
Entrance diameter/mm	10.4
Detector array size/pixel	1 024×1 024
Detector pixel size/μm	13×13
MTF	$\geq 0.5 @ 38.5 \text{ lp/mm}$
Spectral resolution	$\leq 2$

### 3 Schwarzschild 望远成像系统设计

从技术指标可以看出,望远成像系统是一个宽视场( $28^\circ$ )、大相对孔径(1/2.5)、宽波段(400~1 000 nm)的光学系统,其成像质量的要求很高。与折射系统相比,反射系统可以避免色差,不会对光谱成像系统的谱带弯曲造成影响。Schwarzschild 结构可以获得大相对孔径<sup>[8]</sup>,将它看作一个倒置的 Cassegrain 结构。Rosin 研究了球面同轴 Schwarzschild 结构,但球面同轴 Schwarzschild 存在较大的遮拦,这限制了它的应用。

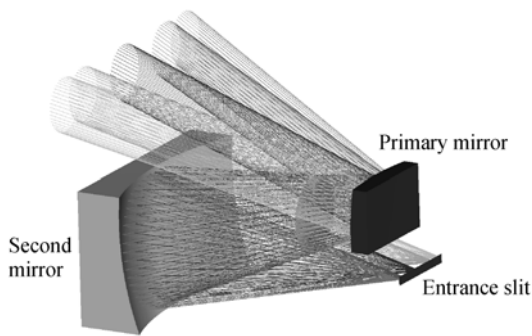


图 1 Schwarzschild 望远成像系统的光学结构图  
Fig. 1 Optical path of Schwarzschild telescope

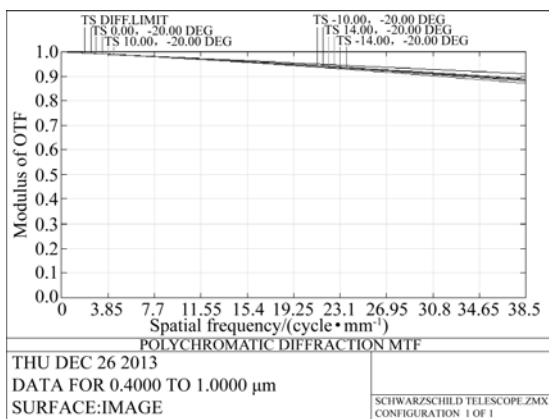


图 2 Schwarzschild 望远成像系统的光学传递函数曲线  
Fig. 2 OTFs of Schwarzschild telescope

在综合权衡各种望远成像系统方案的基础上,本设计选择全反射离轴 Schwarzschild 结构作为望远成像系统的结构形式(如图 1 所示)。它由一个离轴非球面主镜和一个离轴非球面次镜组成,主镜为凸二次曲面,次镜为凹二次曲面,为了与光

谱成像系统实现光瞳匹配,要求望远成像系统为像方远心。图 2 为 Schwarzschild 望远成像系统的光学传递函数曲线,可以看出各视场在 Nyquist 频率 38.5 lp/mm 处的光学传递函数大于 0.87。

### 4 双 Schwarzschild 光谱成像系统设计

从技术指标可以看出,光谱成像系统是一个大相对孔径、宽波段成像系统,其光谱分辨率高,因此在设计方案上优先考虑双 Schwarzschild 光谱成像系统。该系统由 Schwarzschild<sup>[9]</sup>型准直和成像镜及平面衍射光栅组成,与 Offner<sup>[10]</sup>光谱成像系统相比,它没有使用制作困难、价格昂贵的凸面光栅,却获得了大相对孔径。图 3 为双 Schwarzschild 光谱成像系统的初始结构原理图,从入射狭缝出射的光束依次经过球面反射镜 1 和球面反射镜 2 变成准直光束入射到平面衍射光栅上,经平面衍射光栅色散后再次经过球面反射镜 2 和球面反射镜 1 聚焦成像在像面上。与 Offner 光谱成像系统相比,相当于用一个凸面镜和一个平面光栅来代替 Offner 光谱成像系统的凸面光栅。与 Offner 光谱成像系统的像差校正原理类似,也是用一个凹面镜和一个凸面镜组合校正像差,平面光栅起色散作用,不产生像差。在 Schwarzschild 光谱成像系统中,像散对成像质量的影响最大。从图 3 可以看出,准直系统和成像系统的结构完全相同,均为 Schwarzschild 结构,因此分析像散校正条件时,只需分析准直系统即可。

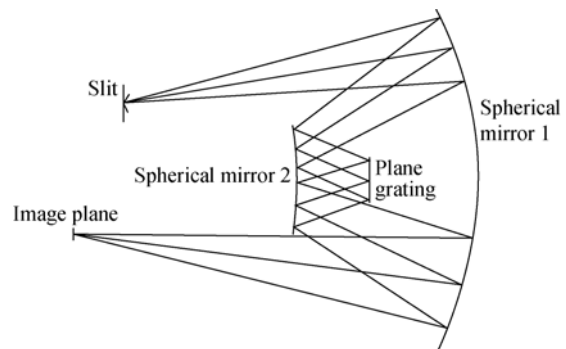


图 3 双 Schwarzschild 光谱成像系统初始结构原理图  
Fig. 3 Schematic diagram of initial configuration for double-Schwarzschild spectral imaging system

准直系统的结构示意图如图 4 所示,入射狭缝上的物点以离轴量  $h$  入射到球面反射镜 1 上,对球面反射镜 1 的离轴入射角为  $\theta_1$ ;经球面反射镜 1 反射后入射到球面反射镜 2 上,对球面反射镜 2 的离轴入射角为  $\theta_2$ ;再经球面反射镜 2 反射后准直出射,球面反射镜 1 和球面反射镜 2 共光轴。由几何关系可知:

$$\theta_2 = 2\theta_1. \quad (3)$$

离轴量  $h$  为:

$$h = R_1 \sin \theta_1, \quad (4)$$

式中:  $R_1$  为球面反射镜 1 的曲率半径。根据罗兰圆理论推导出像散的校正条件为<sup>[11]</sup>:

$$R_2 = \frac{2R_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = R_1 / \cos \theta_1, \quad (5)$$

其中:  $R_2$  为球面反射镜 2 的曲率半径。图 4 中,对三角形  $BC_1E_2$  运用正弦定理得:

$$|C_1E_2| = \frac{R_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_2} = R_2 / 2. \quad (6)$$

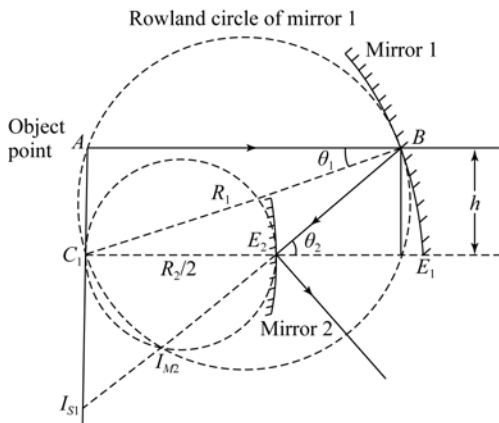


图 4 Schwarzschild 准直系统的结构原理图

Fig. 4 Schematic diagram of Schwarzschild collimating system

根据图 4 中的几何关系,球面反射镜 1 和球面反射镜 2 之间的距离  $E_1E_2$  为:

$$d_1 = R_1 - R_2 / 2 = \frac{R_1 (2 \cos \theta_1 - 1)}{2 \cos \theta_1}. \quad (7)$$

把球面反射镜 1 和球面反射镜 2 看作两个相隔距离为  $d_1$  的透镜,则总焦距  $f'$  为:

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 + d_1}, \quad (8)$$

式中:  $f'_1 = -R_1/2$  为球面反射镜 1 的焦距,  $f'_2 = -R_2/2$  为球面反射镜 2 的焦距。把式(5)和式

(7)代入式(8)得:

$$f' = \frac{R_1}{2(\cos \theta_1 - 2)}. \quad (9)$$

平面衍射光栅的入射角和衍射角满足光栅方程:

$$\sin \alpha + \sin \beta = m\lambda g, \quad (10)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  分别为平面光栅的入射角和衍射角,  $\lambda$  为衍射波长,  $g$  为光栅刻线密度。式(10)两边对波长  $\lambda$  求微分得角色散率  $d\beta/d\lambda$  为:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{mg}{\cos \beta}. \quad (11)$$

$\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段内的光谱辐射在像面上形成的谱段宽度  $\Delta p$  为:

$$\Delta p = f' \cdot \frac{mg}{\cos \beta} \cdot (\lambda_2 - \lambda_1), \quad (12)$$

其中:衍射级次  $m$  一般取 1。

根据本系统的要求,  $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 1000 \text{ nm}$ ,色散宽度  $\Delta p = 10 \text{ mm}$ ,选择光栅刻线密度  $g = 150 \text{ gr/mm}$ ,光栅衍射角  $\beta = 38^\circ$ 。根据式(12)求出焦距  $f'$ ,根据式(10)求解平面光栅的入射角  $\alpha = 30.71^\circ$ ;然后选择离轴角  $\theta_1$ ,保证无遮挡,根据式(9)确定半径  $R_1 = -181.08 \text{ mm}$ ,根据式(4)求解出离轴量  $h = 46.87 \text{ mm}$ ,根据式(5)求解出半径  $R_2 = -187.48 \text{ mm}$ ,最后根据式(7)求解出  $d_1 = -87.34 \text{ mm}$ 。

将初始结构参数导入光学设计软件 ZEMAX-EE 中进行光线追迹和优化设计。优化设计时,为进一步提高成像质量,把球面反射镜 1 和球面反射镜 2 非球面化。图 5 为优化设计的双 Schwarzschild 光谱成像系统的光学结构图。

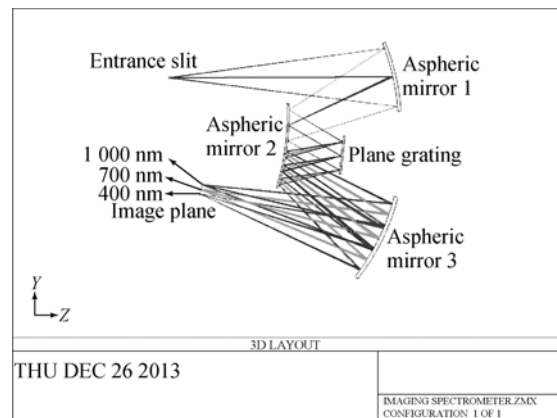
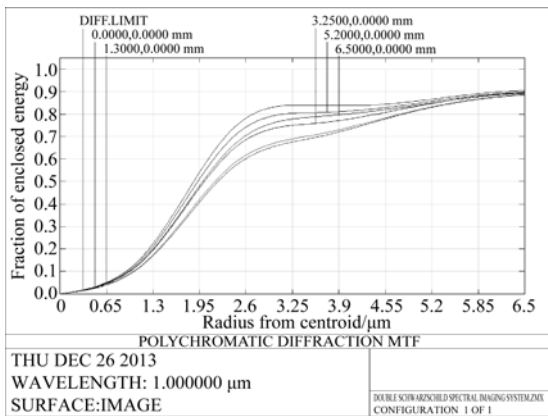


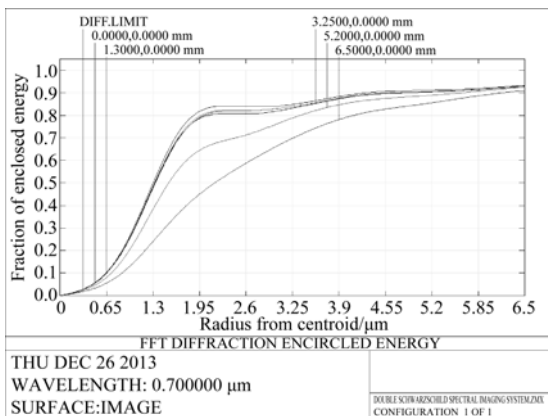
图 5 优化设计的双 Schwarzschild 光谱成像系统的光学结构图

Fig. 5 Optical configuration of optimized double-Schwarzschild spectral imaging system



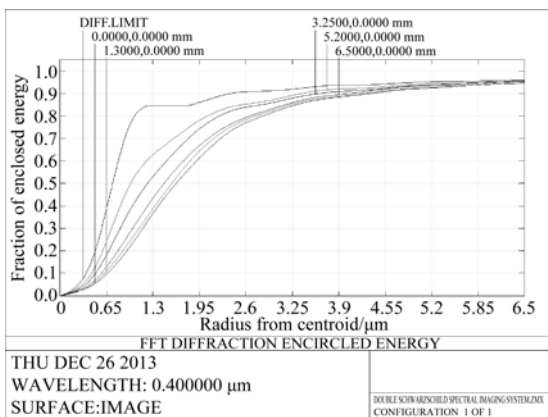
(a) 边缘波长为 1 000 nm

(a) Edge wavelength of 1 000 nm



(b) 中心波长为 700 nm

(b) Central wavelength of 700 nm



(c) 边缘波长为 400 nm

(c) Edge wavelength of 400 nm

图 6 双 Schwarzschild 光谱成像系统中心和边缘波长的能量集中度曲线

Fig. 6 Encircled energy curves of double-Schwarzschild spectral imaging system for central and edge wavelengths

图 6 为中心波长和边缘波长的能量集中度曲线。从图 6 可以看出,中心波长和边缘波长 88% 以上的能量集中在一个探测器像元内,在工作波段内同时获得了良好的成像质量。成像光谱仪的光谱分辨率由光谱成像系统决定,工作波段在 400~1 000 nm 内的光在探测器上的色散宽度  $\Delta p$  为 10 mm,光谱分辨率为:

$$\Delta\lambda = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{\Delta p} \cdot 2a, \quad (13)$$

其中:  $a=13 \mu\text{m}$  为探测器的像元尺寸。由式(13)计算得光谱分辨率  $\Delta\lambda$  为 1.6 nm,满足光谱分辨率  $\leq 2 \text{ nm}$  的指标要求。

光谱成像系统的畸变可以用谱线弯曲和谱带弯曲来表示<sup>[12]</sup>。谱线弯曲是指不同波长的狭缝弯曲图像与直线的偏离程度;谱带弯曲为入射狭缝上同一视场点所成的不同波长的像点与垂直于狭缝的直线的偏离程度。图 7 为不同波长的谱线弯曲,图 8 为不同波长的谱带弯曲。从图 7 可以看出,谱线弯曲量关于中心视场对称;随着波长的减小,谱线弯曲量增大,但最大谱线弯曲量仅为 4.7% 个像元。从图 8 可以看出,谱带弯曲量随着视场的增大而增大;同一视场,边缘波长的谱带弯曲量大于中心波长的谱带弯曲量,最大谱带弯曲量小于 1.6% 个像元,在光谱和辐射定标时可忽略。从分析结果可以看出,双 Schwarzschild 光谱成像系统在整个工作波段内的成像质量良好。

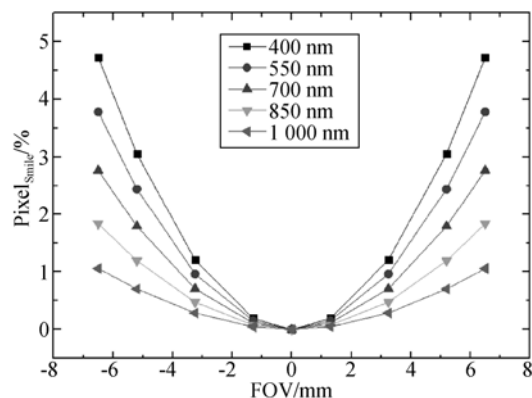


图 7 双 Schwarzschild 光谱成像系统不同波长的谱线弯曲

Fig. 7 Total smiles of double-Schwarzschild spectral imaging system for central and edge wavelengths

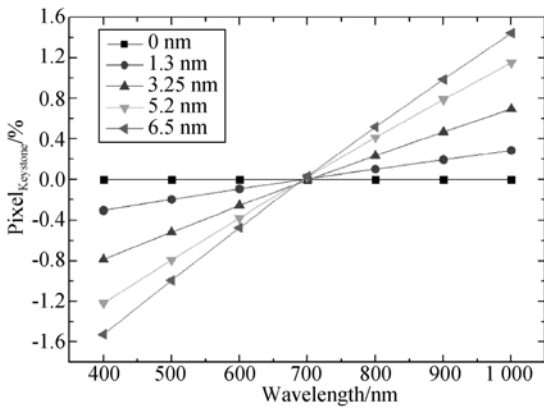


图 8 双 Schwarzschild 光谱成像系统不同视场的谱带弯曲

Fig. 8 Keystones of double-Schwarzschild spectral imaging system for different fields of view

### 5 成像光谱仪全系统设计

将离轴 Schwarzschild 望远成像系统和双 Schwarzschild 光谱成像系统连接,得到宽视场大相对孔径成像光谱仪全系统的光学结构如图 9 所示。它的体积仅为  $280\text{ mm} \times 210\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ , 具有小型化和轻量化的特点,特别适合航空遥感应用。成像光谱仪的空间分辨率由成像光谱仪全系统的性能决定,成像光谱仪全系统不同波长的光学传递函数曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,高光谱成像仪全系统不同波长的光学传递函数均达到 0.59 以上,高于  $\text{MTF} > 0.5 @ 38.5\text{ lp/mm}$  的指标要求,可满足航空海洋遥感的需求。

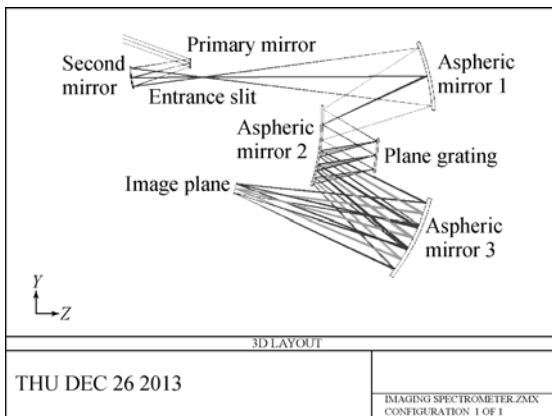
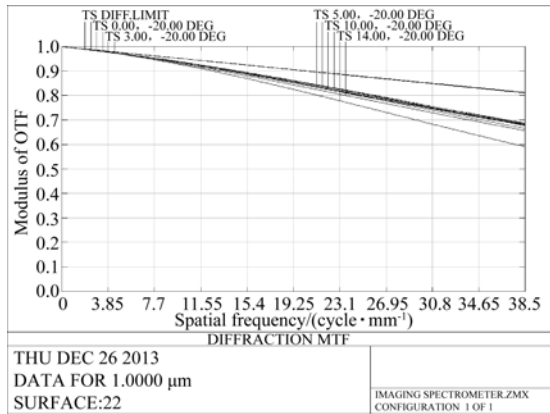


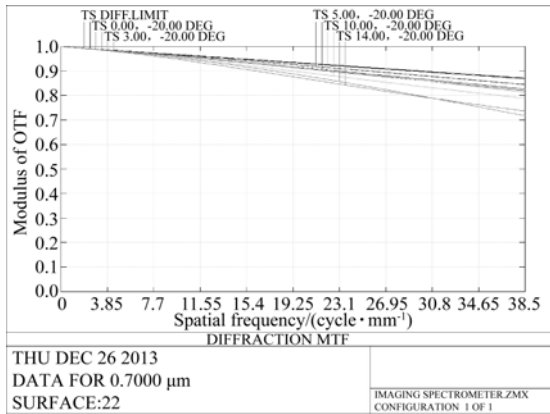
图 9 成像光谱仪全系统光学结构图

Fig. 9 Optical configuration of imaging spectrometer



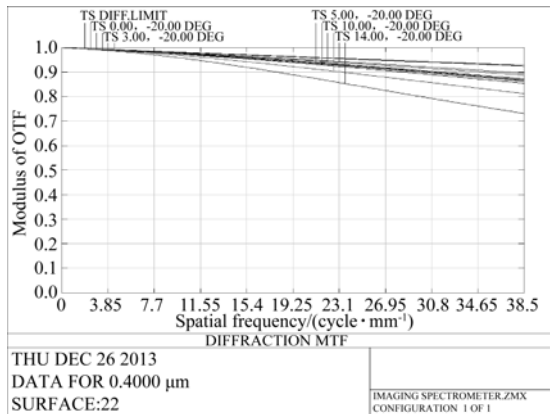
(a) 边缘波长为 1 000 nm

(a) Edge wavelength of 1 000 nm



(b) 中心波长为 700 nm

(b) Central wavelength of 700 nm



(c) 边缘波长为 400 nm

(c) Edge wavelength of 400 nm

图 10 成像光谱仪全系统不同波长的光学传递函数

Fig. 10 MTFs of imaging spectrometer for different wavelengths

### 6 结 论

本文采用离轴 Schwarzschild 望远成像系统和双 Schwarzschild 光谱成像系统匹配的结构形

式,设计了一个视场为 $28^\circ$ 、相对孔径为 $1/2.5$ 、工作波段在 $0.4\sim 1\ \mu\text{m}$ 、光谱分辨率为 $1.6\ \text{nm}$ 的成像光谱仪光学系统,并用光学设计软件 ZEMAX-EE 对设计结果进行了优化和分析。分析结果表明,该光学系统各波长的光学传递函数均在 $0.59$

以上,完全满足成像质量要求;谱线弯曲和谱带弯曲均小于 $5\%$ 个像元,便于光谱和辐射定标。本文设计的成像光谱仪结构紧凑,适合航空遥感应用,为它下一步在海洋航空遥感领域中的应用奠定了技术基础。

#### 参考文献:

- [1] 郑玉权,高志良.  $\text{CO}_2$  探测仪光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2645-2653.  
ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of  $\text{CO}_2$  sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2645-2653. (in Chinese)
- [2] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状 [J]. 中国光学, 2011, 4(6): 546-561.  
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 546-561. (in Chinese)
- [3] 赵敏杰,司福祺,江宇,等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 567-574.  
ZHAO J M, SI F Q, JIANG Y, *et al.*. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 567-574. (in Chinese)
- [4] 赵慧洁,程宣,张颖. 用于火星探测的声光可调谐滤波器成像光谱仪 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1945-1952.  
ZHAO H J, CHENG X, ZHANG Y. Design of acousto-optic imaging spectrometer for mars exploration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1945-1952. (in Chinese)
- [5] MILES T, JOEL P, ANDREW S, *et al.*. Advanced airborne hyperspectral imaging system [J]. *SPIE*, 2002, 4816: 1-11.
- [6] DAVIS C O, JEFFE B, ROBERT A L, *et al.*. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration [J]. *Optics Express*, 2002, 10(4): 210-221.
- [7] 安岩,孙强,刘英,等. 交叉型消像散 Czerny-Turner 结构光谱仪设计 [J]. 中国光学, 2012, 5(5): 470-475.  
AN Y, SUN Q, LIU Y, *et al.*. Design of astigmatism-free crossed Czerny-Turner spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 470-475. (in Chinese)
- [8] SEYMOUR R. Inverse Cassegrainian systems [J]. *Applied Optics*, 1968, 7(8): 1483-1497.
- [9] 胡大伟,李艳秋,刘晓林. 超高数值孔径 Schwarzschild 投影光刻物镜的光学设计 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122004-1-7.  
HU D W, LI Y Q, LIU X L. Optical design of hyper numerical-aperture Schwarzschild projection lithographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122004-1-7. (in Chinese)
- [10] 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 hyperspectral imagers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2629-2637. (in Chinese)
- [11] TAE H K, HONG J K, TAE H K, *et al.*. Design and fabrication of a  $900\text{--}1\ 700\ \text{nm}$  hyper-spectral imaging spectrometer [J]. *Optics Communication*, 2010, 283(3): 355-361.
- [12] PANTAZIS M. Spectral and spatial uniformity in pushbroom imaging spectrometers [J]. *SPIE*, 1999, 3753: 133-141.

#### 作者简介:



陈伟(1963—),女,吉林长春人,工程师,主要从事光学设计,计算机管理等方面的研究。E-mail: xue\_ciomp@163.com

#### 通讯作者:



薛庆生(1979—),男,山东梁山人,博士,副研究员,硕士生导师,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计、航空和航天遥感成像光谱技术及光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: qshxue2006@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)