

# 宽视场大相对孔径高光谱成像仪光学系统设计

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** 宽视场大相对孔径高光谱成像仪已成为航空海洋水色遥感等领域的应用需求。根据宽视场和大相对孔径的研究目标,采用离轴 Schwarzschild 望远成像系统和改进型 Dyson 光谱成像系统匹配的结构型式,设计了一个视场为  $40^\circ$ 、相对孔径为  $1/1.8$ 、工作波段为  $0.35\sim 1.05\ \mu\text{m}$  的航空遥感高光谱成像仪光学系统。基于像差理论,分析了改进型 Dyson 光谱成像系统球差校正原理,运用光学设计软件 Zemax 对高光谱成像仪光学系统进行了光线追迹和优化,并对设计结果进行了分析。分析结果表明,设计的光学系统在各个波长的光学传递函数均不小于  $0.82$ ,谱线弯曲和谱带弯曲均小于像元尺寸的  $5\%$ 。这便于光谱和辐射定标,完全满足设计指标要求,且系统体积小、重量轻,适合于航空遥感应用。

**关键词** 光学设计;高光谱成像仪;Schwarzschild 望远成像系统;Dyson 光谱成像系统;海洋水色

**中图分类号** O433.1; TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0222003

## Optical System Design of Wide Field of View and Large Relative-Aperture Hyperspectral Imager

Xue Qingsheng

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

**Abstract** Airborne ocean colour remote sensing requires wide angle and large relative-aperture hyperspectral imager. Based on the research objective of wide angle and large relative-aperture, an airborne hyperspectral imager optical system is designed using an off-axis Schwarzschild telescope and a modified Dyson spectral imaging system. The field of view of hyperspectral image is  $40^\circ$ , relative-aperture is  $1/1.8$ , and working waveband is  $0.35\sim 1.05\ \mu\text{m}$ . Based on the aberration theory, the principle of spherical aberration correcting is analyzed in modified Dyson spectral imaging system. Ray tracing, optimization and analysis are performed by Zemax software. Results show that the modulation transfer functions for all wavelengths are bigger than  $0.82$ ; both smile and keystone are less than  $5\%$  of the pixel size. It is convenient for spectral and radiation calibration. The designed optical system satisfies the requirements of specifications, and it is small and light, suitable for airborne remote sensing.

**Key words** optical design; hyperspectral imager; Schwarzschild telescope system; Dyson spectral imaging system; ocean colour

**OCIS codes** 220.483; 120.4820; 280.4788

## 1 引 言

高光谱成像仪是 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,能同时获取目标的高光谱分辨率信息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得到了越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。

目前国际上具有代表性的机载高光谱成像仪有美国的便携式海洋探测成像光谱仪(PHILIS)<sup>[4]</sup>和先进航空成像光谱仪系统(AAHIS)<sup>[5]</sup>等。PHILIS 的相对孔径为  $1/4$ ,工作波段( $400\sim 1000\ \text{nm}$ )处于可见-近红外波段,AAHIS 的相对孔径为  $1/3$ ,工作波段为  $390\sim 840\ \text{nm}$ ,视场为  $20^\circ$ 。这些高光谱成像

**收稿日期**: 2013-06-24; **收到修改稿日期**: 2013-09-03

**基金项目**: 国家自然科学基金(41105014)

**作者简介**: 薛庆生(1979—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光学系统设计、航天和航空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

仪在航空遥感中发挥了重要作用,但缺点是视场覆盖宽度小,相对孔径小、集光能量弱。近年来,随着航空遥感应用发展的不断深入,高光谱成像仪对视场宽度和相对孔径的要求也越来越高。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。高光谱成像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,信噪比也就越高。在海洋水色遥感等领域,由于目标的反射率很低,在保证光学系统光谱分辨率为 3 nm、地面像元分辨率为 10 m、信噪比大于 200 的条件下,要求高光谱成像仪的相对孔径大于 1/2,并且要求视场覆盖宽度大于 30°。而现有高光谱成像仪的视场最大(如 AAHIS)也仅为 20°,不能满足遥感应用需求。因此需要解决现有高光谱成像仪光学系统视场覆盖范围小、相对孔径小、集光能力弱的问题。另外,航空遥感应用还要求高光谱成像仪具有小型化和轻量化的特点。

高光谱成像仪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>[6]</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,再经随平台运行方向推扫得到图谱合一的图像。在高光谱成像仪的研制过程中,光学系统的选择和设计直接影响着整个高光谱成像仪的性能、结构的复杂程度、重量和体积等。

本文根据宽视场大相对孔径高光谱成像仪的应用要求和技术指标,采用离轴 Schwarzschild 望远成像系统和改进型 Dyson 光谱成像系统匹配的结构型式设计了航空遥感高光谱成像仪光学系统。基于像差理论,分析了改进型 Dyson 光谱成像系统球差校正方法,利用光学设计软件进行了优化设计,并对设计结果进行了分析与评价。

## 2 应用要求及主要技术指标

航空遥感高光谱成像仪要求在 0.35~1.05  $\mu\text{m}$  光谱范围内对海洋水色进行高光谱成像探测,飞行轨道高度  $H=10$  km,要求刈幅宽度  $W_G>7$  km,地面像元分辨率  $R_{\text{GSD}}=10$  m,光谱分辨率  $R_s\leq 3$  nm,信噪比大于 200。探测器采用英国 e2V 公司生产的 CCD 探测器,像元数为 1024 pixel(空间维) $\times$ 512 pixel(光谱维),像元尺寸  $p=26$   $\mu\text{m}$ 。根据以上要求,确定高光谱成像仪光学系统的主要技术指标如表 1 所示。根据飞行高度和地面像元分辨率的要求,可确定高光谱成像仪全系统的焦距  $f'_s$  为

$$f'_s = \frac{pH}{R_{\text{GSD}}} = 26 \text{ mm}. \quad (1)$$

光谱成像系统的变倍比取 1/1,则望远成像系统的焦距  $f'_t$  亦为 26 mm。根据飞行高度和刈幅宽度的要求,确定高光谱成像仪的视场(FOV) $V_F$  为

$$V_F = 2\arctan\left(\frac{W_G}{2H}\right) = 38.6^\circ. \quad (2)$$

考虑到一定余量,取  $V_F$  为 40°。根据海洋目标的光谱辐射特性和 CCD 探测器的性能参数,确定高光谱成像仪光学系统的相对孔径为 1/1.8。

表 1 高光谱成像仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of hyperspectrometer optical system

Spectral range / $\mu\text{m}$	0.35~1.05
Field of view /( $^\circ$ )	40
Focal length of telescope $f'_t$ /mm	26
Focal length of system $f'_s$ /mm	26
Relative aperture	1/1.8
Entrance diameter /mm	14.45
Detector array size /pixel	1024 $\times$ 512
Detector pixel size / $\mu\text{m}^2$	26 $\times$ 26
Modulation transfer function @19.2 lp/mm	$\geq 0.5$
Spectral resolution	$\leq 2.73$

## 3 Schwarzschild 望远成像系统设计

由表 1 所示技术指标可知,望远成像系统是一个宽视场(40°)、大相对孔径(1/1.8)、宽波段(350~1050 nm)的光学系统,要求具有高成像质量。反射系统与折射系统相比,可以避免色差,避免对光谱成像系统的谱带弯曲造成影响。Rosin 对球面同轴 Schwarzschild 结构进行了研究<sup>[7]</sup>,发现 Schwarzschild 结构可以获得大相对孔径,并且它可以看作是一个倒置的 Cassegrain 结构,但球面同轴 Schwarzschild 存在较大的遮拦,这限制了它的应用。

在综合权衡各种望远成像系统方案的基础上,选择全反射离轴 Schwarzschild 结构作为望远成像系统的结构型式(如图 1 所示)。它由一个离轴非球面主

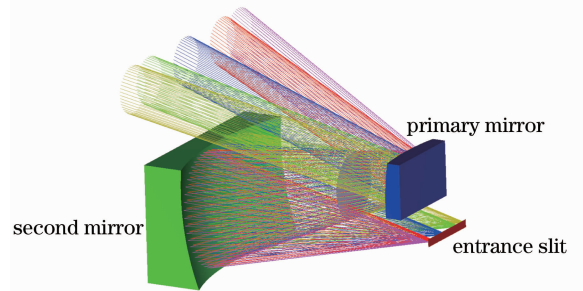


图 1 Schwarzschild 望远成像系统光学结构图  
Fig. 1 Optical path of Schwarzschild telescope

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,要求望远成像系统像方远心。图2为Schwarzschild望远成像系统的光学传递函数(MTF)曲线,可知各视场在Nyquist频率19.2 lp/mm处的光学传递函数约大于0.95。

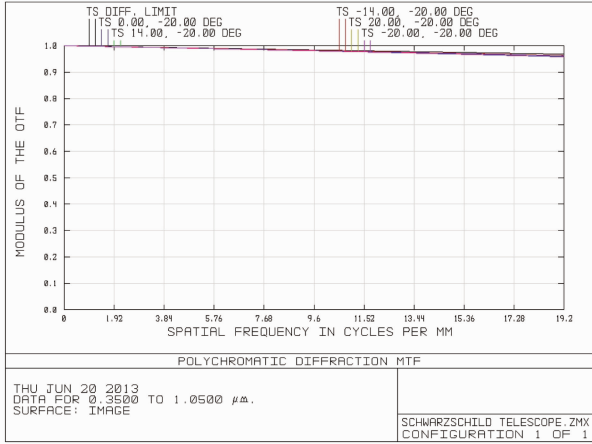


图2 Schwarzschild望远成像系统光学传递函数曲线  
Fig.2 MTF curves of Schwarzschild telescope

#### 4 改进型Dyson光谱成像系统设计

由技术指标可知,光谱成像系统是一个大相对孔径、宽波段成像系统。在设计方案上优先考虑Dyson光谱成像系统<sup>[8-9]</sup>,其Dyson透镜和凹面光栅的同心结构可以实现大相对孔径和宽波段光谱成像。传统的Dyson光谱成像系统(如图3所示)的缺点在于入射狭缝和焦面均位于Dyson透镜的平面上,因此入射狭缝和探测器的放置非常困难,且无法放置级次选择滤光片,限制了Dyson光谱成像系统的应用。

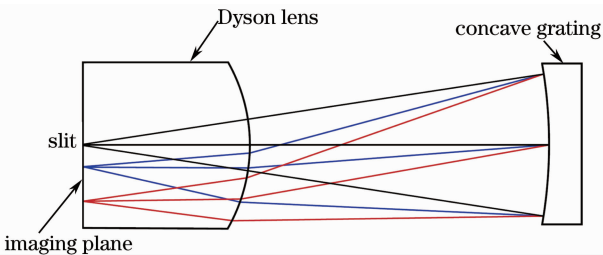


图3 传统Dyson光谱成像系统光学结构图  
Fig.3 Optical path of classical spectral imaging system

对传统的Dyson光谱成像系统进行了改进:首先,增加入射狭缝和焦面与Dyson透镜的平面的距离,便于入射狭缝的放置;其次,Dyson透镜增加一个全反射表面,将焦面与入射狭缝在横向上分开,便于焦平面探测器和级次选择滤光片的放置。由于入射

狭缝与理想位置偏离引入的球差 $E_{LSA}$ 可以表示为

$$E_{LSA} = \frac{tn_1(1-n_1^2)}{8N_F^2}, \quad (3)$$

式中 $t$ 为入射狭缝到Dyson透镜平面的距离, $n_1$ 为Dyson透镜的折射率, $N_F$ 为Dyson光谱成像系统的 $F$ 数。产生的球差可以通过非球面光栅进行校正,非球面光栅与球面光栅相比产生的附加球差可表示 $\Delta S_1$ 为

$$\Delta S_1 = \frac{-2k}{R_2^3} \cdot \left(\frac{R_2}{4N_F}\right)^4, \quad (4)$$

式中 $k$ 为二次曲面系数, $R_2$ 为凹面光栅的曲率半径。根据(3)式和(4)式,得到球差校正条件为

$$\Delta S_1 + E_{LSA} = \frac{-2k}{R_2^3} \cdot \left(\frac{R_2}{4N_F}\right)^4 + \frac{tn_1(1-n_1^2)}{8N_F^2} = 0. \quad (5)$$

根据(5)式求解得到二次曲面系数 $k$ 为

$$k = \frac{16tn_1(1-n_1^2)}{R_2} \cdot N_F^2. \quad (6)$$

考虑到非球面光栅加工的困难,在靠近凹面光栅处插入一个非球面校正透镜进行球差校正,非球面校正透镜的前后工作表面分别为球面和二次曲面,其中后工作表面靠近凹面光栅。

入射狭缝尺寸为 $19 \text{ mm} \times 26 \mu\text{m}$ ;Dyson透镜的光学材料和非球面校正透镜的光学材料均为熔石英,在中心波长 $700 \text{ nm}$ 处的折射率 $n_1$ 为1.45, $N_F=1.8$ ;凹面光栅的曲率半径 $R_2=200 \text{ mm}$ ,刻线密度为 $128 \text{ g/mm}$ 。入射狭缝与Dyson透镜平面的距离 $t=4 \text{ mm}$ ,为入射狭缝放置留出了足够的空间。根据(6)式计算得到非球面校正透镜的后工作表面的二次曲面系数 $k=-0.544$ 。图4为改进型Dyson光谱成像系统的光学结构图,由于光谱成像系统的工作波段宽( $350 \sim 1050 \text{ nm}$ ),在焦面前增加了级次选择滤光片来消除带外杂光的影响。级次选择滤光

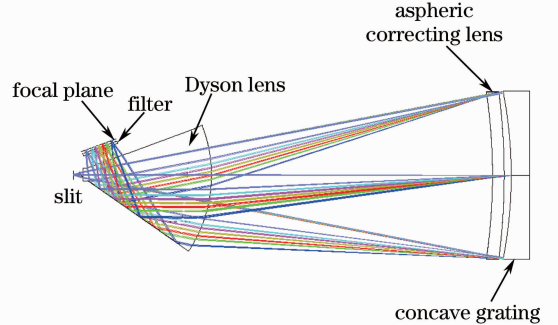


图4 改进型Dyson光谱成像系统光学结构图  
Fig.4 Optical path of modified Dyson spectral imaging system

片厚度为 1 mm, 级次选择滤光片到焦面的距离为 1 mm, 级次选择滤光片与 Dyson 透镜出射面的距离为 5.5 mm, 为焦平面和级次选择滤光片的放置留出了足够的空间。非球面校正镜后工作表面与凹面光栅的中心间距为 3 mm。改进型 Dyson 光谱成像系统的孔径光阑位于凹面光栅上, 形成物方和像方双远心, 便于与像方远心望远成像系统实现光瞳匹配。光栅采用的衍射级次为 -1 级, 光栅的轮廓结构采用三角槽型以获得高衍射效率和低偏振灵敏度。

图 5 为改进型 Dyson 光谱成像系统不同波长和不同视场的点列图分布。由图 5 可知, 不同波长和不同视场的弥散斑尺寸均小于 1 个像元尺寸 (26  $\mu\text{m}$ )。图 6 为中心波长和边缘波长的能量集中度曲线。由图 6 可知, 中心波长和边缘波长 95% 以上的能量集中在一个探测器像元内, 在工作波段内可同时获得良好的成像质量。高光谱成像仪的光谱分辨率由光

谱成像系统决定, 工作波段 350~1050 nm 内的光在探测器上的色散宽度为 13.3 mm, 光谱分辨率为 2.73 nm, 满足光谱分辨率  $R_s \leq 3 \text{ nm}$  的指标要求。

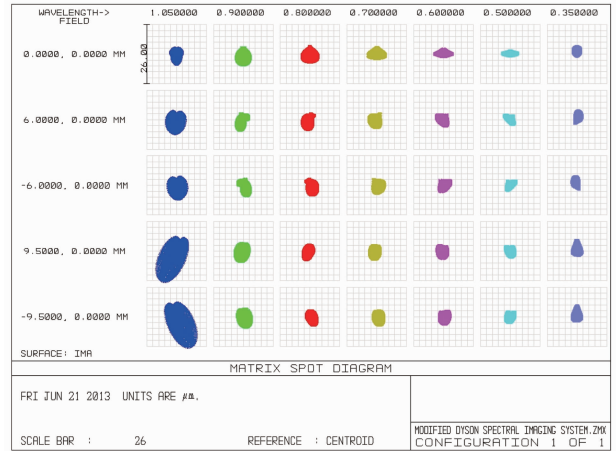


图 5 改进型 Dyson 光谱成像系统不同波长和不同视场的点列图分布

Fig. 5 Spot diagram of modified Dyson spectral imaging system for different wavelengths and fields of view

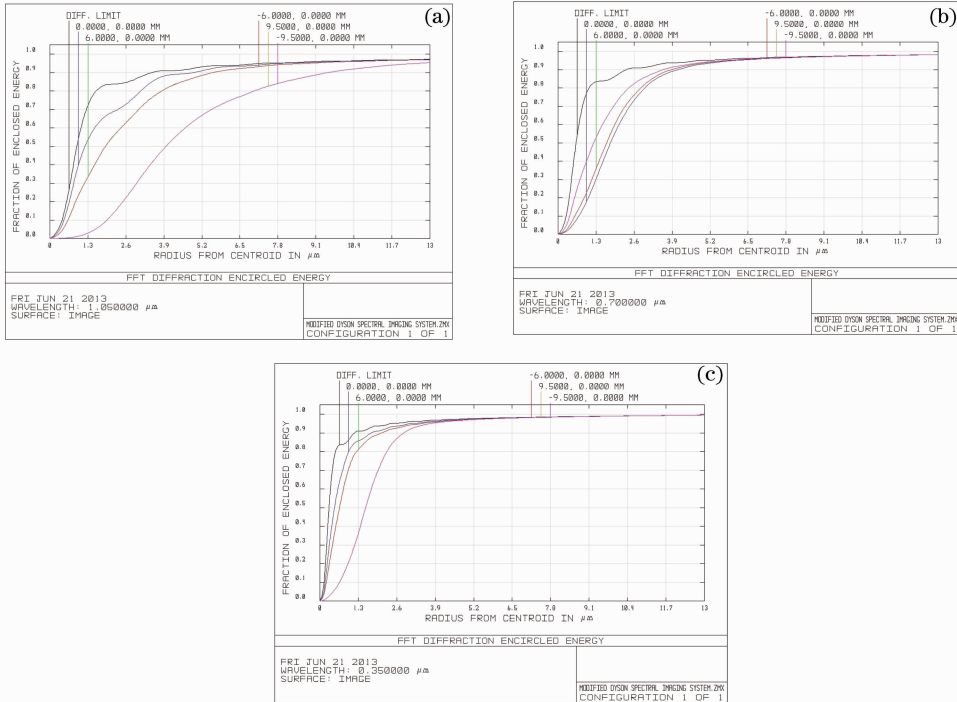


图 6 改进型 Dyson 光谱成像系统中心和边缘波长的能量集中度曲线。(a)边缘波长 1050 nm 处; (b)中心波长 700 nm 处; (c)边缘波长 350 nm 处

Fig. 6 Encircled energy of modified spectral imaging system for central and edge wavelengths. (a) Edge wavelength of 1050 nm; (b) central wavelength of 700 nm; (c) edge wavelength of 350nm

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>[10-11]</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的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。由图 7 可知, 谱线弯曲量关于中心视场对称, 随着波长的增加, 谱线弯曲量也增加, 最大谱线弯曲量仅为一个像元尺寸的



4.43%。由图 8 可知,随着视场的增大,谱带弯曲量也增大,最大谱带弯曲量小于一像元尺寸的4.27%,在光谱和辐射定标时可忽略。由分析结果可知,改进型 Dyson 光谱成像系统在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量,也证明了前文提出的像差校正方法是可行的。

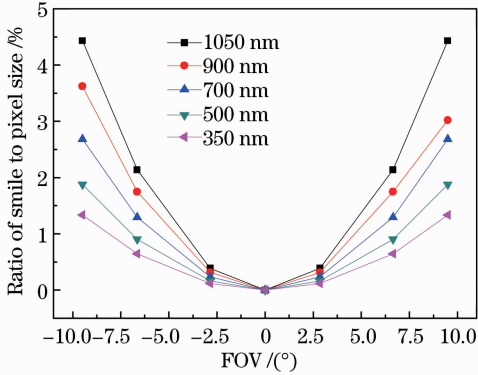


图 7 改进型 Dyson 光谱成像系统不同波长的谱线弯曲  
Fig. 7 Total smiles of modified Dyson spectral imaging system for different fields of view

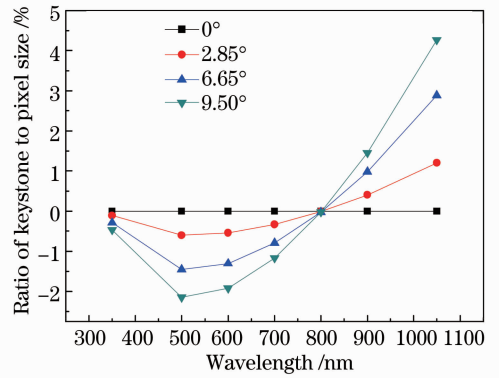


图 8 改进型 Dyson 光谱成像系统不同视场的谱带弯曲  
Fig. 8 Keystone of modified Dyson spectral imaging system for different wavelengths

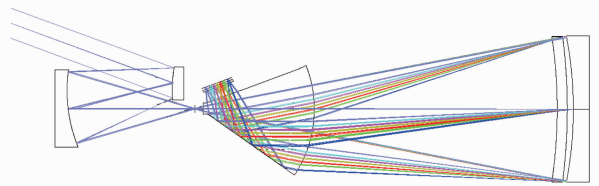


图 9 高光谱成像仪全系统光学结构图

Fig. 9 Optical construction for hyperspectral imager  
大相对孔径高光谱成像仪全系统的结构如图 9 所示,体积仅为 255 mm×70 mm×70 mm,具有小型化和轻量化的特点,适合于航空遥感应用。高光

## 5 高光谱成像仪全系统设计

将前文设计的离轴 Schwarzschild 望远成像系统和改进型 Dyson 光谱成像系统连接,得到宽视场

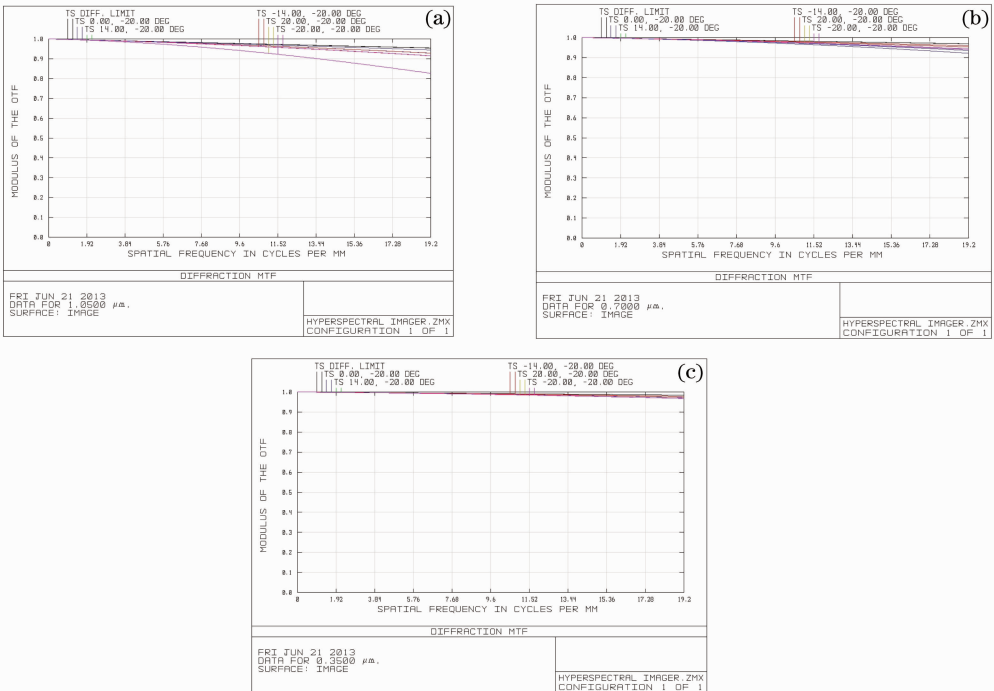


图 10 高光谱成像仪全系统不同波长的光学传递函数曲线。(a)边缘波长 1050 nm 处；(b)中心波长 700 nm 处；(c)边缘波长 350 nm 处

Fig. 10 MTF curves of hyperspectral imager for different wavelengths. (a) Edge wavelength of 1050 nm; (b) central wavelength of 700 nm; (c) edge wavelength of 350 nm

谱成像仪的空间分辨率由高光谱成像仪全系统的性能决定,高光谱成像仪全系统不同波长的光学传递函数曲线如图 10 所示。由图 10 可知,高光谱成像仪全系统不同波长的光学传递函数均达到 0.82 以上,远高于 Nyquist 频率为 19.2 lp/mm 时 MTF 值大于 0.5 的指标要求,可满足航空海洋遥感的需求。

## 6 结 论

根据宽视场大相对孔径高光谱成像仪的要求,采用离轴 Schwarzschild 望远成像系统和改进型 Dyson 光谱成像系统匹配的结构型式,设计了一个视场为  $40^\circ$ 、相对孔径为 1/1.8、工作波段为  $0.35 \sim 1.05 \mu\text{m}$ 、光谱分辨率为 2.73 nm 的高光谱成像仪光学系统。使用光学设计软件 Zemax 进行了优化设计,并对设计结果进行了分析。分析结果表明,各波长的光学传递函数均达到 0.82 以上,满足成像质量要求。谱线弯曲和谱带弯曲均小于像元尺寸的 5%,便于光谱和辐射定标,并且结构紧凑,适合航空遥感应用。

## 参 考 文 献

- 1 Xue Qingsheng. Optical system design of a spaceborne broadband far ultraviolet hyperspectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0322001.  
薛庆生. 星载宽波段远紫外高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光

- 学学报, 2013, 33(3): 0322001.
- 2 Yang Jin, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Design of Dyson concentric optical hyperspectral imaging system with achromatized Féry prisms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1130003.  
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.
- 3 Liu Jianpeng, Tang Yi, Huang Gang, *et al.*. Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322007.  
刘健鹏, 唐 义, 黄 刚, 等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322007.
- 4 Miles Topping, Joel Pfeiffer, Andrew Sparks, *et al.*. Advanced airborne hyperspectral imaging system [C]. SPIE, 2002, 4816: 1-11.
- 5 Curtiss O Davis, Jeffrey Bowles, Robert A Leathers, *et al.*. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration [J]. *Opt Express*, 2002, 10(4): 210-221.
- 6 Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2629-2637.  
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.
- 7 Seymour Rosin. Inverse Cassegrainian systems [J]. *Appl Opt*, 1968, 7(8): 1483-1497.
- 8 J Dyson. Unit magnification optical system without Seidel aberration [J]. *J Opt Soc Am*, 1959, 49(7): 713-716.
- 9 R M H New, G Owen, R F W Pease. Analytic optimization of Dyson optics [J]. *Appl Opt*, 1992, 31(10): 1444-1449.
- 10 M Pantazis. Spectral and spatial uniformity in pushbroom imaging spectrometers [C]. SPIE, 1999, 3753: 311-350.
- 11 Zheng Yuquan. Design of compact offner spectral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(6): 650-657.  
郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 650-657.

栏目编辑: 张 腾