

星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计

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 高分辨率大相对孔径宽视场成像光谱仪已成为星载海洋水色遥感等领域的迫切需求,根据大相对孔径和宽视场的研究目标,采用折叠 Schmidt 望远成像系统与改进型 Dyson 光谱成像系统匹配的结构型式,设计了一个相对孔径 1/1.2、视场 3.9° 、工作波段 $0.35\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 的航天遥感成像光谱仪光学系统。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 对成像光谱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,光学系统在各个波长的光学传递函数均达到 0.77 以上,谱线弯曲和谱带弯曲均小于 6% 像元,便于光谱和辐射定标,完全满足设计指标要求,且结构紧凑,非常适合应用于航天遥感。

关键词 光学设计;成像光谱仪;Schmidt 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/CJL201441.0316003

Optical System Design of Large Relative-Aperture and Wide Field of View Spaceborne Imaging Spectrometer

Xue Qingsheng

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

Abstract Spaceborne ocean colour remote sensing urgently requires large relative-aperture and wide field of view imaging spectrometer. Based on the research objective of large relative-aperture and wide field of view, a spaceborne imaging spectrometer optical system is designed using a folded Schmidt telescope and a modified Dyson spectral imaging system. The relative-aperture of which is 1/1.2, the field of view of hyperspectral image is 3.9° , and the working waveband is from $0.35\ \mu\text{m}$ to $1.05\ \mu\text{m}$. Based on the aberration theory, the principle of spherical aberration correcting is analyzed in modified Dyson spectral imaging system. Ray tracing, optimization and the analysis of the design results are performed by ZEMAX software. The analyzed results demonstrate that the MTFs for different wavelengths are all about 0.77, both the line bending and the band bending of the spectrum are less than 6% of the pixel, which is easy for spectral and radiometric calibration. The design results satisfy the requirements of specifications with a small volume and suitable for spaceborne remote sensing.

Key words optical design; imaging spectrometer; Schmidt telescope imaging system; Dyson spectral imaging system; ocean colour

OCIS codes 220.4830; 120.4570

1 引 言

高分辨率成像光谱仪是 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天、航空光学遥感仪器,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天和航空领域得到越来越广泛的应用^[1-4]。

目前国际上具有代表性的航天遥感成像光谱仪有美国 TRW 公司研制的 Hyperion,相对孔径 1/4,视场(FOV) 0.624° ^[5];美国 NEMO 卫星的主载荷 COIS,相对孔径 1/4,视场 2.5° ^[6];英国 Sira 公司研制的 CHRIS,相对孔径 1/4,视场 0.553° ^[7]。这些成像光谱仪载荷在航天遥感中发挥了重要作用,但缺点是相对

收稿日期: 2013-09-16; **收到修改稿日期**: 2013-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(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

孔径小、集光能量弱且视场覆盖宽度小。在海洋水色遥感等领域,由于目标的反射率很低,在保证系统光谱分辨率 3 nm、地面像元分辨率 20 m、信噪比大于 200 的条件下,要求成像光谱仪的相对孔径大于 1/1.3,同时还要求具有宽视场覆盖能力,视场覆盖宽度越大,对应的刈幅宽度就越大,回访周期就越短,仪器的时间分辨率就越高。现有航天遥感成像光谱仪光学系统的集光能力和视场不能满足航天海洋水色遥感等领域的需求,因此迫切需要解决现有航天遥感成像光谱仪光学系统相对孔径小、集光能力弱、视场覆盖范围小的问题。另外,航天遥感应用还要求成像光谱仪具有结构紧凑的特点,因此,星载大相对孔径宽视场成像光谱仪是主要的研究目标。

成像光谱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^[8-10]。目标的一个条带先经望远成像系统成像在入射狭缝上,再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,最后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,光学系统的选择和设计直接影响着整个成像光谱仪的性能、结构的复杂程度、重量和体积等。

本文根据大相对孔径宽视场成像光谱仪的应用要求和技术指标,采用折叠 Schmidt 望远成像系统和改进型 Dyson 光谱成像系统匹配的结构形式设计了航天遥感成像光谱仪光学系统。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

高分辨率大相对孔径成像光谱仪主要用于海洋水色探测,工作波段为 350~1050 nm,光谱分辨率小于等于 3 nm,预计工作在轨道高度 $H=600$ km 的卫星平台上,要求地面覆盖宽度(GW)为 40 km,地面像元分辨率(GSD)为 20 m,探测器的像元尺寸为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$,像元数为 2048×2048 ,且要求在地面反照率为 5%的条件下,信噪比大于等于 200。

根据轨道高度 H 和地面覆盖宽度确定成像光谱仪的视场为

$$V_{\text{FOV}} = 2\arctan\left(\frac{W_{\text{GW}}}{2H}\right) = 3.9^\circ. \quad (1)$$

根据地面像元分辨率、轨道高度 H 和探测器的像元尺寸确定成像光谱仪光学系统的焦距为

$$f'_s = \frac{H \cdot a}{D_{\text{GSD}}} = 300\ \text{mm}. \quad (2)$$

狭缝宽度 a 取 $10\ \mu\text{m}$,光谱仪的变倍比取 1:1,则望远镜的焦距 $f'_s=300$ mm。综合考虑信噪比和成像质量要求,取入瞳直径为 250 mm,成像光谱仪光学系统的相对孔径为 1/1.2。成像光谱仪光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 临边探测仪主要技术指标
Table 1 Specifications of limb sounder

Parameter	Value
Spectral range /nm	350~1050
Spectral resolution/nm	≤ 3
Field of view /($^\circ$)	3.9
Focal length of telescope /mm	300
Focal length of system /mm	300
Entrance pupil diameter /mm	250
Detector array size /pixel	2048×2048
Detector pixel size / μm	10×10
Slit size /mm	20.48×0.01

3 望远成像系统设计

望远成像系统要求具有大相对孔径(1/1.2)和宽视场,常用的 R-C 望远镜和三反(TMA)望远镜不能满足要求。离轴 Schwarzschild 望远镜^[11]可获得大视场和较大的相对孔径,对于焦距为几十毫米量级的系统比较适合,但随着焦距的增大,离轴 Schwarzschild 望远镜的体积迅速增大,不适合应用在焦距几百毫米量级的空间光学系统。折叠 Schmidt 结构的望远成像系统的光学结构如图 1 所示,其由双胶合 Schmidt 校正板、平面折叠镜、球面主镜和双胶合场镜组成。通常, Schmidt 系统的孔径光阑位于校正板上,为了更好的像方远心性能,将孔径光阑设在球面主镜上,望远系统准像方远心,最大视场的主光线在望远系统像面上的入射角仅为 0.4° ,便于与光谱成像系统实现光瞳匹配。

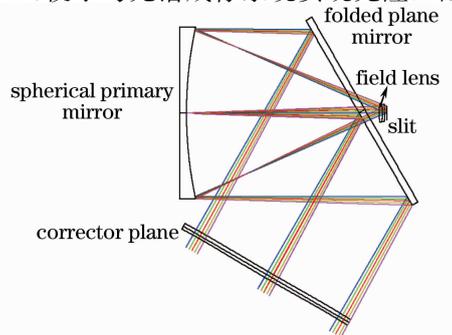


图 1 折叠 Schmidt 望远系统光学结构图

Fig. 1 Schematic diagram of folded Schmidt telescope

图2为望远系统像面上的点列图分布,图3为望远成像系统的光学传递函数(MTF)曲线,可以看出,不同视场成像点的弥散斑尺寸均小于1个像元(10 μm × 10 μm),各视场在奈奎斯特频率50 lp/mm处的光学传递函数大于0.89,获得了良好的成像质量。折叠镜上的孔仅造成5%的遮拦。双胶合场镜的最后一面与望远系统像面的距离为3.6 mm,为入射狭缝的放置留出了空间。

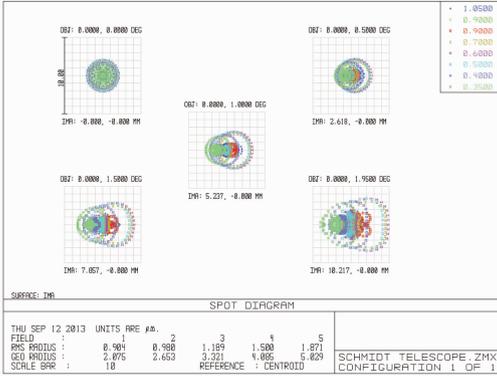


图2 望远系统像面上点列图分布

Fig.2 Spot diagram on the image plane of telescope

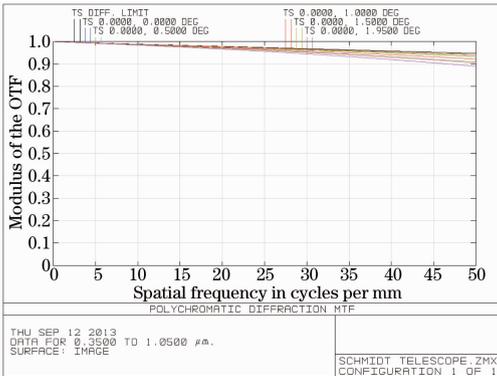


图3 望远系统的MTF曲线

Fig.3 MTF of telescope

4 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,在设计方案上优先考虑Dyson光谱成像系统^[12],它利用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4所示)的缺点主要有两方面:1)由于Dyson透镜为某一种材料的单透镜,无法校正色差;2)由于入射狭缝和焦面均位于Dyson单透镜的平面上,因此入射狭缝和探测器的放置非常困难,这大大限制了Dyson光谱成像系统的应用。

可对传统的Dyson光谱成像系统进行进一步

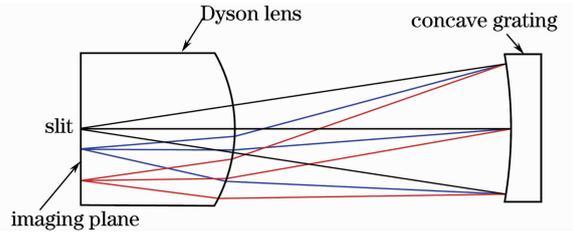


图4 传统Dyson光谱成像系统光学结构图

改进,首先,将Dyson单透镜用一个消色差双胶合透镜代替,实现色差校正;其次,将入射狭缝和焦面与Dyson透镜的平面分开一定的距离,便于入射狭缝的放置。由入射狭缝与理想位置的偏离而引入的球差(LSA)可以表示为

$$V_{LSA} = \frac{tn_1(1-n_1^2)}{8(F/\#)^2}, \quad (3)$$

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, $F/\#$ 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 ΔS_I 为

$$\Delta S_I = \frac{-2k}{R_2^3} \left[\frac{R_2}{4(F/\#)} \right]^4, \quad (4)$$

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,球差校正条件为

$$\Delta S_I + V_{LSA} = \frac{-2k}{R_2^3} \left[\frac{R_2}{4(F/\#)} \right]^4 + \frac{tn_1(1-n_1^2)}{8(F/\#)^2} = 0, \quad (5)$$

根据(5)式求解得到二次曲面系数 k 为

$$k = \frac{16tn_1(1-n_1^2)}{R_2} \cdot (F/\#)^2, \quad (6)$$

考虑到非球面光栅加工的困难,在双胶合Dyson透镜与凹面光栅之间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。

入射狭缝尺寸为 $20.48 \text{ mm} \times 10 \text{ μm}$,双胶合Dyson透镜的光学材料为S-FPL53和F_Silica,两种材料在中心波长700 nm处的折射率 n_1 均约为1.45, $F/\#$ 为1.2,凹面光栅的曲率半径 R_2 为200 mm,刻线密度为80 g/mm。入射狭缝与Dyson透镜平面的距离 t 为7 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 $k = -0.899$ 。图5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较宽(350~1050 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。级次选择滤光片厚度为 1 mm,其到焦面的距离为 1 mm,且与 Dyson 透镜出射面的距离为 2 mm,为焦平面和级次选择滤光片的放置留出了足够的空间。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来获得高衍射效率和低偏振灵敏度。

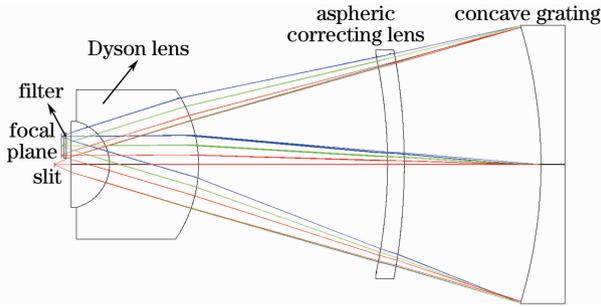


图 5 改进型 Dyson 光谱成像系统光学结构图

Fig. 5 Optical path of modified Dyson spectral imaging system

图 6 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,从图中可以看出,不同波长和不同视场下的弥散斑尺寸均小于 1 个像元

(10 μm)。图 7 为中心波长和边缘波长的能量集中度曲线,从图 7 可以看出,中心波长和边缘波长 94% 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 350~1050 nm 内的光在探测器上的色散宽度为 7.85 mm,光谱分辨率为 2.68 nm,满足光谱分辨率小于等于 3 nm 的指标要求。

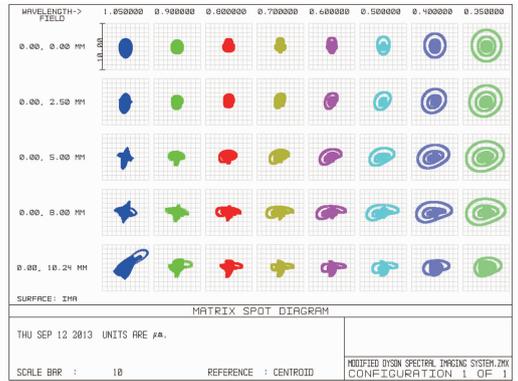
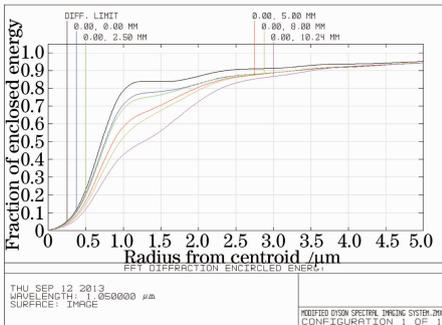
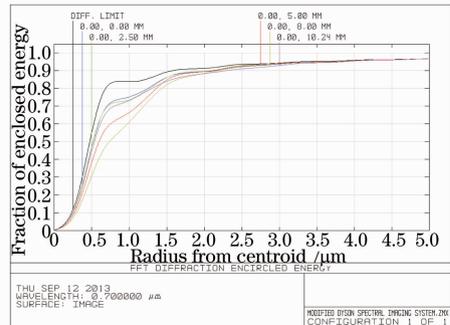


图 6 改进型 Dyson 光谱成像系统不同波长和不同视场的点列图分布

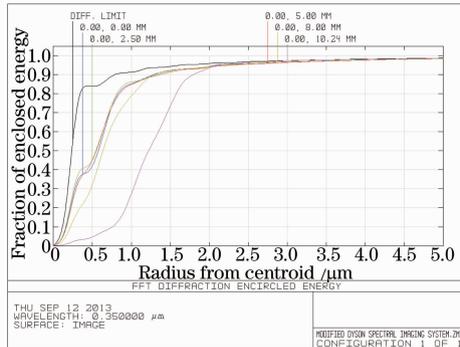
Fig. 6 Spot diagram of modified Dyson spectral imaging system for different wavelengths and field of views



(a) maximum wavelength of 1050 nm



(b) central wavelength of 700 nm



(c) minimum wavelength of 350 nm

图 7 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

Fig. 7 Encircled energy of modified Dyson spectral imaging system for central and edge wavelengths

光谱成像系统的畸变可以用谱线弯曲(smile)和谱带弯曲(keystone)来表示^[13-14]。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8为不同波长的谱线弯曲,图9为不同波长的谱带弯曲。从图8可以看出,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5.4%个像元。从图9可以看出,最大谱带弯曲量小于5.2%个像元,在光谱和辐射定标时可忽略。从分析结果可以看出,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,也证明了所提出的像差校正方法是可行的。

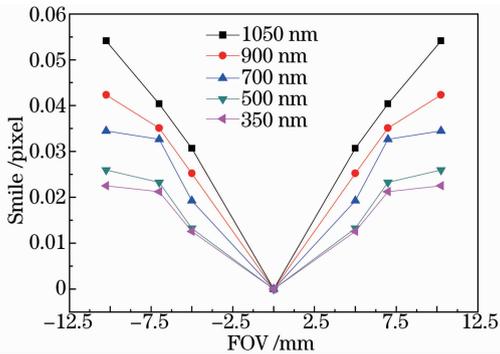


图8 改进型Dyson光谱成像系统不同波长的谱线弯曲
Fig. 8 Total smiles of modified Dyson spectral imaging system for central and edge wavelengths

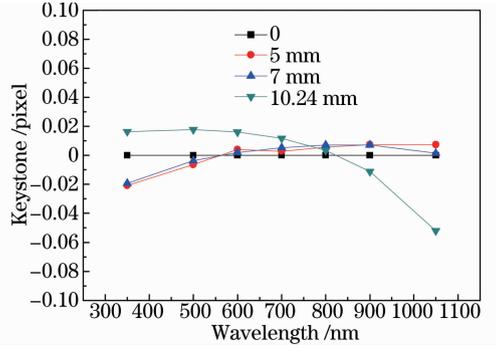


图9 改进型Dyson光谱成像系统不同视场的谱带弯曲
Fig. 9 Keystone of modified Dyson spectral imaging system for different field of views

5 成像光谱仪全系统设计

将设计的折叠Schmidt望远成像系统和改进型Dyson光谱成像系统连接,得到大相对孔径宽视场成像光谱仪全系统的光学结构如图10所示,体积为500 mm×460 mm×260 mm,结构紧凑,特别适合航天遥感应用。图10(a)为色散平面内光学结构图,图10(b)为垂直色散平面内的光学结构图,图10(c)为焦平面附近的局部放大图。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11所示,可以看出,成像光谱仪全系统不同波长的光学传递函数均达到0.77以上,远高于光学传递函数大于0.5@50 lp/mm的指标要求,可满足航天海洋遥感的需求。

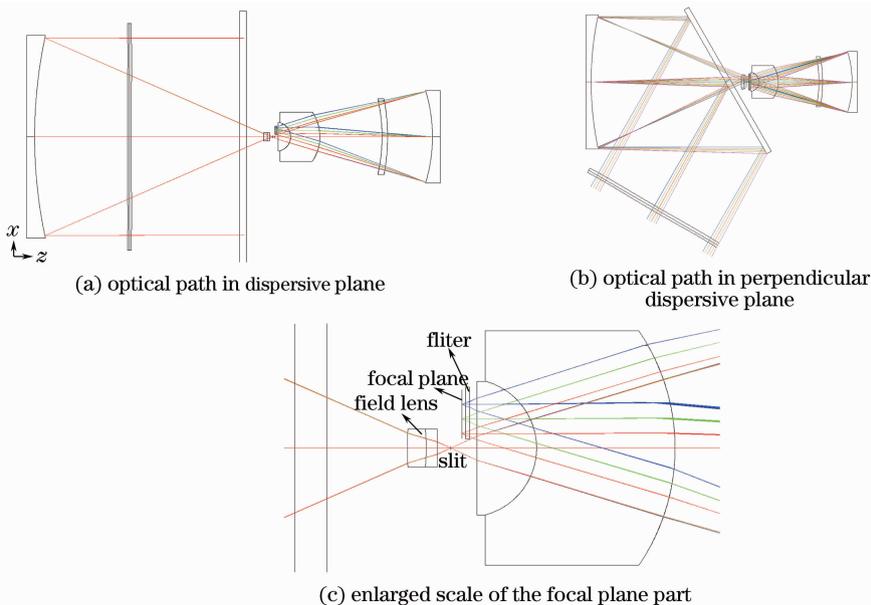


图10 成像光谱仪全系统光学结构图

Fig. 10 Optical path of imaging spectrometer system

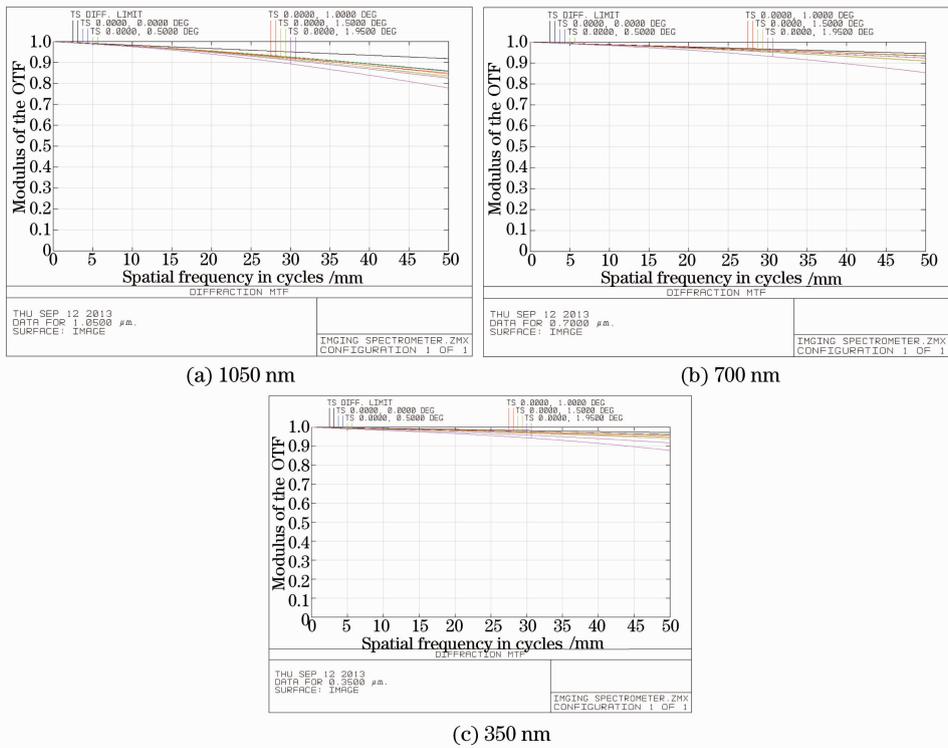


图 11 成像光谱仪全系统不同波长时的 MTF
Fig. 11 MTF of different wavelengths for imaging spectrometer system

6 系统公差分析

成像光谱仪在研制时采用模块化的方案,望远成像系统和光谱成像系统先各自独立装调,然后再将二者连接在一起,因此用系统公差分析对望远成像系统和光谱成像系统分别分析。望远系统的公差列表如表 2 所示,光谱成像系统的公差列表如表 3 所示。考虑上述公差后,望远系统的光学传递函数大于 0.6@50 lp/mm,光谱成像系统点列图弥散斑尺寸小于 1 个像元,满足成像质量要求,公差分配合理可行。

表 2 望远系统公差
Table 2 Telescope tolerances

Parameter	Value
x -decenter /mm	± 0.025
y -decenter /mm	± 0.025
x -tilt /($^{\circ}$)	± 0.03
y -tilt /($^{\circ}$)	± 0.03
Distance tolerance /mm	± 0.025
Radius tolerance /mm	± 0.5
Irregularity tolerance /fringe (P-V)	± 2

表 3 光谱成像系统公差

Table 3 Tolerances of spectral imaging system

Parameter	Value
x -decenter /mm	± 0.02
y -decenter /mm	± 0.02
x -tilt /($^{\circ}$)	± 0.02
y -tilt /($^{\circ}$)	± 0.02
Distance tolerance /mm	± 0.02
Radius tolerance /mm	± 0.3
Irregularity tolerance /fringe (P-V)	± 1

7 结 论

大相对孔径宽视场成像光谱仪已成为航天海洋水色遥感等领域的迫切需求。根据大相对孔径宽视场成像光谱仪的要求,采用折叠 Schmidt 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 3.9° 、相对孔径 1/1.2、工作波段 $0.35\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 、光谱分辨率 2.68 nm 的星载成像光谱仪光学系统,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 0.77 以上,完全满足成像质量要求。谱线弯曲和谱带弯曲均小于 6% 个像元,便于光谱和辐射定标,并且结构紧凑,适

合航天遥感应用,为下一步在航天海洋遥感领域的应用奠定了技术基础。

参 考 文 献

- Liu Zhuang, Gong Yan. Design of optical system for solar extreme-ultraviolet imaging spectrometer using holographic varied line spacing grating [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1116001.
刘 壮, 巩 岩. 应用全息变间距光栅的极紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1116001.
- Zheng Yuquan, Gao Zhiliang. Optical system design of CO₂ sounder[J]. Opt Precision Eng, 2012, 20(12): 2645-2653.
郑玉权, 高志良. CO₂ 探测仪光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2645-2653.
- 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.
- Zhong Xing, Jin Guang. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore-optics [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022004.
钟 兴, 金 光. 超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022004.
- Pearlman J, Segal C, Lushalan L, *et al.*. Development and operations of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer [C]. SPIE, 2004, 4135: 243-253.
- Wilson T, Curtiss D. Naval earthmap observer (NEMO) satellite [C]. SPIE, 1999, 3753: 1-11.
- Cutter M A, Hill S. Compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) design and performance [C]. SPIE, 2004, 5546: 126-131.
- Xue Qingsheng, Chen Wei. Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system with wide spectral region [J]. Opt Precision Eng, 2012, 20(2): 233-240.
薛庆生, 陈 伟. 改进的宽谱段车尔尼-特纳光谱成像系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 233-240.
- Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0822001.
薛庆生, 黄 煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0822001.
- Liu Xiaomei, Xiang Yang. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622004.
刘晓梅, 向 阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622004.
- Hu Dawei, Li Yanqiu, Liu Xiaolin. Optical design of hyper numerical-aperture Schwarzschild projection lithographic lens [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0122004.
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.
- Dyson J. Unit magnification optical system without Seidel aberrations [J]. J Opt Soc Am, 1959, 49: 713-715.
- Pantazis M. Spectral and spatial uniformity in pushbroom imaging spectrometers [C]. SPIE, 1999, 3753: 133-141.
- Zheng Yuquan. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. Opt Precision Eng, 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: 韩 峰