

高光谱分辨率紫外 Offner 成像光谱仪系统设计

朱雨霁^{1,2,3}, 尹达一^{1,2,3}, 陈永和^{1,2}, 任百川^{1,2}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

²中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 紫外成像光谱仪是遥感探测仪器的重要组成部分之一。在机载和星载领域, 遥感平台正逐步要求光谱仪在实现高分辨率的同时, 其设备趋于轻量化和小型化。针对紫外成像光谱仪高光谱分辨率、轻量化、小型化等特点, 研究了基于 Offner 结构的紫外成像光谱系统, 设计了一种工作波段为 250~400 nm、狭缝长 40 mm、光谱分辨率为 0.3 nm 的高分辨率紫外成像光谱仪, 并对设计结果进行了分析与评价。结果表明, 这种紫外成像光谱仪在 38.5 lp/mm 处调制传递函数达到 0.76 以上, 实现了接近衍射极限的优良成像质量; 谱线弯曲和色畸变在像元尺寸的 10% 以内。另外, 该结构在原 Offner 结构的基础上大大缩小了系统体积, 实现了紫外遥感仪器小型化、轻量化的目的, 且易于加工和装调, 满足设计指标要求, 适合机载和星载遥感应用。

关键词 光学设计; 紫外; 成像光谱仪; Offner 光谱成像系统; 高分辨率; 凸面光栅

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0222001

Design of Hyperspectral Resolution Ultraviolet Offner Imaging Spectrometer System

Zhu Yuji^{1,2,3}, Yin Dayi^{1,2,3}, Chen Yonghe^{1,2}, Ren Baichuan^{1,2}

¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Ultraviolet (UV) imaging spectrometer is one of the most important parts of remote sensing instruments. In the field of airborne and satellite-borne, remote sensing platforms are increasingly requiring that spectrometers be lightweight and miniaturized while achieving high resolution. Aiming at the characteristics of high spectral resolution, light weight and miniaturization of UV imaging spectrometer, the UV imaging spectroscopy system based on Offner structure is studied. The high-resolution UV imaging spectrometer with operating wavelength range of 250-400 nm, the slit length of 40 mm, the spectral resolution of 0.3 nm is designed, and the design results are analyzed and evaluated. The results show that this UV imaging spectrometer achieves a modulation transfer function above 0.76 at 38.5 lp/mm, and it realizes excellent image quality near the diffraction limit. Keystone and smile are within 10% of pixel size. In addition, the structure greatly reduces the system volume based on the original Offner structure, which realizes the miniaturization and weight reduction of the ultraviolet remote sensing instrument. It is easy to be processed and adjusted, which meets the design requirements. And it is suitable for airborne and spaceborne remote sensing applications.

Key words optical design; ultraviolet; imaging spectrometer; Offner spectral imaging system; high resolution; convex grating

OCIS codes 220.3620; 220.4830; 300.6540

收稿日期: 2017-08-17; 收到修改稿日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

作者简介: 朱雨霁(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事紫外成像光谱仪、积分视场技术方面的研究。

E-mail: yuji-zhu@163.com

导师简介: 尹达一(1976—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间紫外成像和光谱技术、空间光电遥感精密机械和自动控制、空间高精度稳像控制技术等方面的研究。E-mail: yindayi@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

成像光谱仪技术起源于多光谱遥感成像技术,其能够以高分辨率甚至超分辨率获取遥感目标的超多谱段图像,在大气、海洋和陆地观测等方面应用广泛。高分辨率紫外(200~400 nm)成像光谱仪在物质成分分析、农业、生物、石油化工等领域应用广泛^[1]。在水质监测领域中,基于紫外光谱分析的监测技术具有水样无需预处理、无需化学试剂、操作简单、检测速度快等优点。很多国家将紫外段光谱 254 nm 单特征波长分析方法列为水质检测标准方法之一^[2]。此外,由于大气层吸收了 200~300 nm 波段内大部分的太阳辐射光谱,因此该谱段的机载紫外光谱仪可以在白天进行电晕监测,也可以对火山源和人造发射器尾焰进行监控^[3]。

目前,国际上具有代表性的机载成像光谱仪有先进航空成像光谱仪系统(AAHIS)^[4]和美国的便携式海洋探测成像光谱仪(PHILIS)^[5]等。PHILIS的工作波段为 400~1000 nm,相对孔径为 1/4;AAHIS的工作波段为 390~840 nm,相对孔径为 1/3。有代表性的星载紫外成像光谱仪有欧洲太空局(ERS)ERS-2 上的全球臭氧检测试验装置(GOME)^[6],ENVISAT-1 上的扫描成像大气吸收光谱仪(SCIAMACHY)^[7]。国内对紫外波段成像光谱仪的设计还比较贫乏,大部分 Offner 结构的成像光谱仪工作波段都在 400 nm 以上,其中 2012 年长春光学精密机械与物理研究所研制出工作波段为 400~800 nm 的 Offner 型凸面光栅光谱仪,其光谱分辨率为 2.4 nm,体积为 209 mm×199 mm×110 mm^[8]。北京理工大学在 2015 年研制出基于平面衍射光栅的紫外成像光谱仪,采用 8 mm×0.4 mm 宽的狭缝,工作波段为 120~180 nm,光谱分辨率为 1.3 nm,调制传递函数(MTF)在 35 lp/mm 处大于 0.3^[9]。

近年来,飞机和卫星作为最主要的航空遥感平台,要求搭载的遥感设备不仅具有大视场、高分辨率、较高目标识别能力,还要逐步实现轻量化、小型化、操作简单和可靠等目标^[10]。将高分辨率的紫外成像光谱仪轻量化、小型化后装载在飞机和卫星上,使其对地监测更灵活机动、快速高效,这样在海洋赤潮、原油泄漏、海洋污染等事件的发现和监测方面都可以发挥重要作用。

2 Offner 光谱成像系统

成像光谱仪的系统结构和指标参数基本决定了其体积和质量,而分光形式是光谱仪系统结构的核心部分。因此分光形式的选择将直接影响到整个系统的结构、体积等因素。成像光谱系统的分光方式主要包括色散棱镜、干涉滤光片、光栅等。棱镜分光会形成谱线弯曲;在干涉分光中,干涉谱准确性受系统力、热学的影响较大,而且光谱定标难度大^[11]。凸面光栅光谱仪虽然加工难度较大,但因其同时具备结构对称、无谱线弯曲和大像场长狭缝等优点,在航空航天高分辨率成像光谱系统中应用较为广泛。

凸面光栅制作工艺难度大、衍射效率较低等因素限制了其应用。近年来,国内关于凸面光栅的需求越来越大,苏州大学通过光刻胶光栅掩模制作和离子束刻蚀等工艺,利用转动扫描刻蚀实现了球面上的闪耀光栅刻蚀,解决了闪耀角不易一致的问题,首次研制出 4.3° 闪耀角的凸面闪耀光栅,在 400~800 nm 工作波段内,+1 级衍射效率均值达到 40% 以上^[12]。

Offner 成像基本结构如图 1 所示,系统由一个大凹面反射镜 M1 和一个小凸面反射镜 M2 组成,两者均为球面且拥有共同的球心。通过合理调整系统参数,可以在过球心且垂直于光轴的平面上形成一个无像差的共轭物平面和像平面。从物点 O 射出的光线经过三次反射,汇聚于像平面上形成像 I。这种成像系统为 1:1 比例成像,用两个同心球面反射镜进行三次反射可消除三阶赛德尔像差^[13-15]。因此 Offner 系统具有良好的成像特性,同时还具有结构简单、易装调等特点,可以满足系统小型化、轻量化等要求。

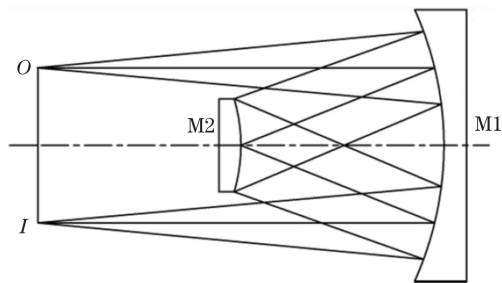


图 1 Offner 结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Offner configuration

由于 Offner 成像系统本身具有良好的成像特性,以及装置小型化、轻量化等要求,将次镜 M2 代替为凸面反射光栅,即为基于 Offner 结构的成像光谱仪系统,普适结构如图 2 所示,图中 I_1 为物点,

I'_m 为子午像点该结构由 Offner 1:1中继成像系统演化而来,保持了原 Offner 结构的优点,而且色畸变、谱线弯曲都很小。但光栅的衍射作用破坏了原系统的对称性,虽然能消除 3 级像差,但 5 级像散无法消除。将原系统中大的主镜替换为两个小的凹面反射镜,保持同心结构,增加了系统的自由度,通过优化可以得到满意的像质。

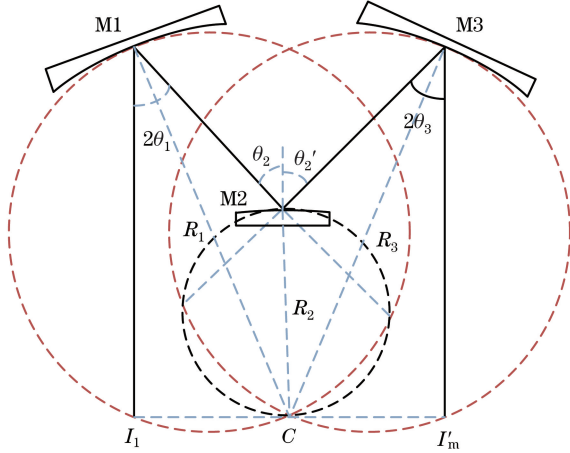


图 2 具有基于 Offner 结构凸面光栅的成像光谱仪系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spectral imaging system with convex grating based on Offner configuration

如图 2 所示, M1、M2 和 M3 的曲率中心重合于 C 点, 曲率半径分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 , 光线在 M1 和 M3 上的入射角分别为 θ_1 、 θ_3 , 光栅入射角和衍射角分别为 θ_2 和 θ'_2 。根据光栅方程, 光谱范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$:

$$\sin \theta'_2 |_{\lambda_2} - \sin \theta'_2 |_{\lambda_1} = k(\lambda_2 - \lambda_1)/g, \quad (1)$$

式中 k 为衍射级次, g 为光栅刻线间隔。光谱谱线展开距离 h 为:

$$h = R_3(\sin \theta_3 |_{\lambda_2} - \sin \theta_3 |_{\lambda_1}), \quad (2)$$

代入正弦公式:

$$\frac{R_3}{\sin \theta'_2} = \frac{R_2}{\sin \theta_3}, \quad (3)$$

计算得到凸面光栅曲率半径与光谱分辨率以及光栅常数之间的关系^[16]:

$$R_2 = \frac{gh}{k \Delta \lambda}, \quad (4)$$

表 2 初始 Offner 凸面光栅成像光谱仪光学结构参数

Table 2 Optical structural parameters of the initial Offner convex grating spectral imaging system

Surface	Radius /mm	Glass	Size /mm	Thickness /mm	Lines /(lp/mm)
1	-720.0	Mirror	$\Phi 200$	-363.143	-
Stop	-356.857	Grating	$\Phi 90$	339.546	243
3	-696.402	Mirror	$\Phi 200$	-696.401	-
Image	Infinity	-	-	-	-

式中 R_2 表示凸面光栅的曲率半径, $1/g$ 为光栅常数, $\Delta \lambda$ 为光谱分辨率。

根据正弦公式有:

$$R_1 \sin \theta_1 = -R_2 \sin \theta_2, \quad (5)$$

$$R_3 \sin \theta_3 = R_2 \sin \theta'_2, \quad (6)$$

根据上述公式和系统设计指标可以确定基本结构参数, 再通过光学设计软件 ZEMAX 不断优化设计, 即可得到符合要求的系统设计。

3 两种 Offner 结构的凸面光栅成像光谱系统设计

系统的主要设计指标如表 1 所示, 其中 NA 表示数值孔径。

表 1 系统主要设计指标

Table 1 Main design parameters of the system

Parameter	Value
NA	0.12
Wavelength	250~400 nm
Spectral resolution	0.3 nm
Slit size	40 mm×0.125 mm
CCD	Pixel number: 10^6 , pixel size: $(13 \times 13) \mu\text{m}$
MTF	≥ 0.75
Keystone & smile	Within 10% of the pixel size

根据上述公式, 结合系统指标, 计算可得初始系统参数, 利用 ZEMAX 进一步优化设计, 最后可以得到结果优良的系统。本研究在初始结构的基础上提出一种设计方案, 可满足 40 mm 较长狭缝、高分辨率以及小型化、轻量化的要求。

3.1 初始结构

为了得到满意的像质, 增加系统的自由度, 在基本 Offner 结构的基础上, 将主镜分裂成两个反射镜 M1 和 M3。系统中三个反射面均为球面且共心, 结构对称且易于装调。光阑位于光栅表面, 形成物方远心系统, 保证了能量的有效利用, 结构如图 3(a) 所示。表 2 为系统结构参数, 各视场点列图与 MTF 曲线性能指标如图 4 所示。

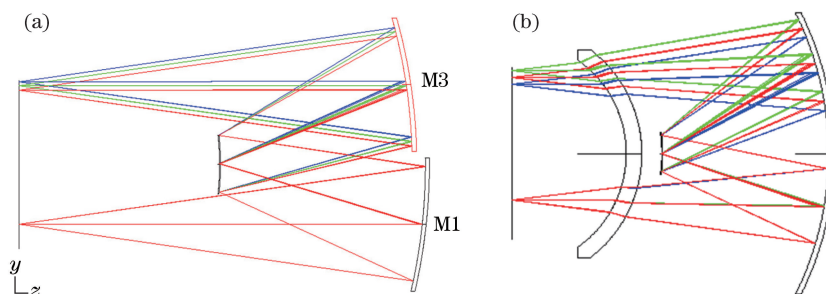


图 3 (a)初始和(b)优化后的 Offner 凸面光栅成像光谱仪光学结构图

Fig. 3 Optical configuration diagram of (a) initial and (b) optimized Offner convex grating spectral imaging system

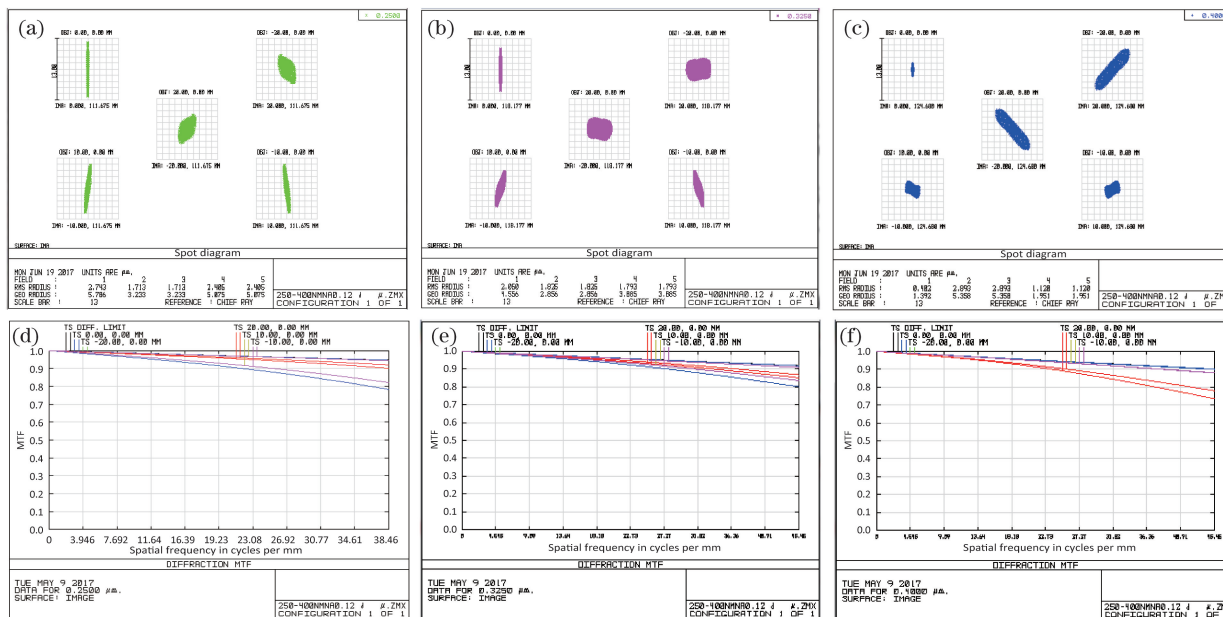


图 4 波长为(a) 0.25 μm 、(b) 0.325 μm 、(c) 0.4 μm 时初始结构的点列图；
波长为(d) 0.25 μm 、(e) 0.325 μm 、(f) 0.4 μm 时初始结构的 MTF 曲线

Fig. 4 Spot diagram of the initial configuration with the wavelength of (a) 0.25 μm , (b) 0.325 μm , (c) 0.4 μm ;
MTF curves of the initial configuration with the wavelength of (d) 0.25 μm , (e) 0.325 μm , (f) 0.4 μm

初始设计整体结构尺寸为 730 mm \times 420 mm \times 220 mm。在图 4 给出的 0.25,0.325,0.4 μm 三个波长所对应的各视场点列图中,弥散斑的均方根(RMS)半径均小于 3 μm ,且均控制在 1/4 像元尺寸以内。边缘视场和中心视场的弥散斑差异较大,这是由于系统自由度小造成的。系统在 38.5 lp/mm 处的 MTF 值在全视场内均达到 0.76 以上。

3.2 优化结构

为平衡系统小型化和系统光谱高质量成像的要求,基于 Offner 同心光学系统,在狭缝后以及像面前分别插入一块弯月透镜。为了装调方便,将两面反射镜(面 3、面 5)设计为一面镜子,将两块弯月透镜设计为一块透镜,两块弯月透镜靠近狭缝的两面(面 1、面 7)与三个反射面(面 3、面 4、面 5)共心。考虑到工作波段为 250~400 nm,透镜材料选择熔融

石英。光阑位于光栅上形成物方远心系统,系统中所有光学表面均为球面,结构对称,自动校正三级像散、场曲以及子午离轴彗差,只剩下 5 级像散,其结构如图 3(b)所示。表 2 为优化系统的结构参数,各视场的点列图和奈奎斯特频率处的 MTF 曲线如图 5 所示。

优化结构的 Offner 凸面光栅成像光谱仪整体结构尺寸仅为 310 mm \times 220 mm \times 125 mm,系统体积约缩小为初始结构的 1/8。在三个波长 0.25, 0.325,0.4 μm 对应的各视场点列图中,优化结构经过光学系统后弥散斑的均方根半径均小于 3 μm ,小于 1/4 像元尺寸。系统在全视场内均达到 0.76 以上,可得到满意的像质。与初始结构相比,优化后的结构不仅具备高像质、易装调的特点,而且体积更小,结构更紧凑。

表 2 优化后 Offner 凸面光栅成像光谱仪系统结构参数

Table 2 Structural parameters of the optimized Offner convex grating spectral imaging system

Surface	Radius / mm	Glass	Size / mm	Thickness / mm	Lines / (lp/mm)
1	-110.5	Fused silica	Φ80	15	—
2	-125.8	—	—	179.1	—
3	-303.7	Mirror	Φ130	-159.2	—
Stop	-144.5	Grating	Φ20	159.2	600
5	-303.7	Mirror	Φ130	-179.1	—
6	-125.8	Fused silica	Φ80	-15	—
7	-110.5	—	—	-109.8	—
Image	Infinity	—	—	—	—

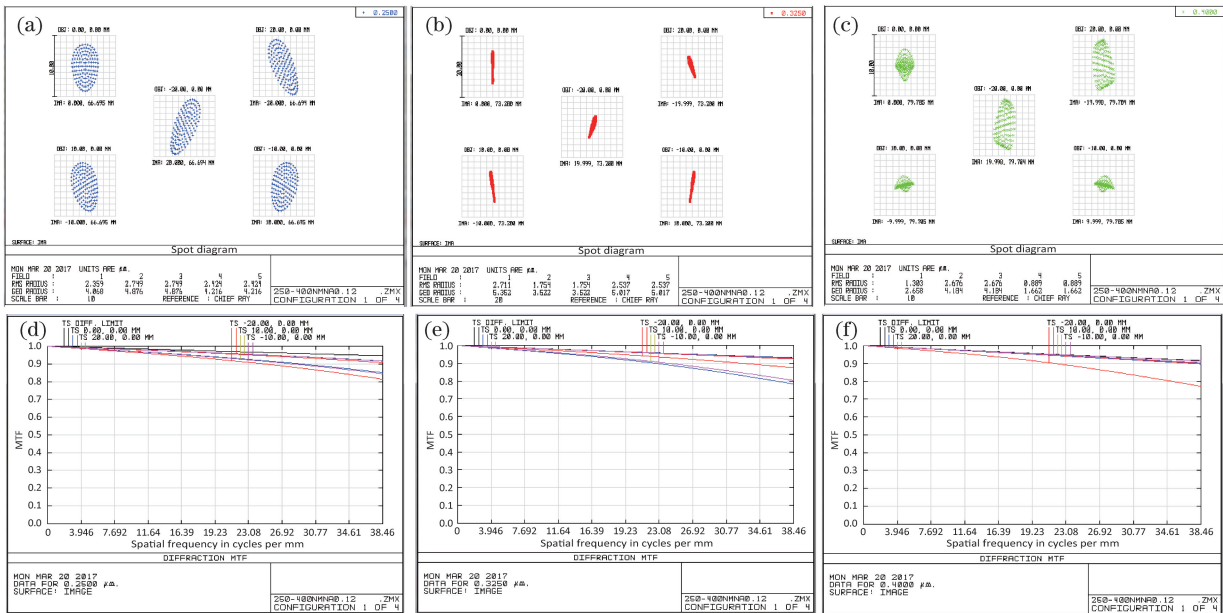


图 5 波长为(a) 0.25 μm、(b) 0.325 μm、(c) 0.4 μm 时优化后结构的点列图；

波长为(d) 0.25 μm、(e) 0.325 μm、(f) 0.4 μm 时优化后结构的 MTF 曲线

Fig. 5 Spot diagram of the optimized configuration with the wavelength of (a) 0.25 μm, (b) 0.325 μm, (c) 0.4 μm ;

MTF curves of the optimized configuration with the wavelength of (d) 0.25 μm, (e) 0.325 μm, (f) 0.4 μm

4 光学系统性能分析

成像光谱仪的光谱分辨率由光谱成像系统决定,其公式为:

$$\Delta\lambda = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{\Delta p} \cdot 2a, \quad (7)$$

式中探测器像元尺寸 $a=13 \mu\text{m}$, 工作波段为 $250 \sim 400 \text{ nm}$, 探测器上色散宽度 $\Delta p=13 \text{ mm}$, 计算可得光谱分辨率 $\Delta\lambda=0.3 \text{ nm}$ 。

光谱成像系统的畸变可以用色畸变和谱线弯曲表示。色畸变为入射狭缝上同一点所成的不同波长的像点与垂直于狭缝方向的偏离距离。谱线弯曲指的是某一波长的边缘视场和中心视场在垂直于狭缝方向的像点位置差异。为了保证光谱数据具有较高

的一致性,这些畸变被要求控制在像元尺寸的 20% 甚至 10% 以内^[17]。图 6 和图 7 分别为上述两种结构的最大色畸变和最大谱线弯曲随波长变化的曲线。像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$, 畸变值均经过归一化处理。

从图 6、图 7 可以看出,初始结构的最大谱线弯曲远远小于像元尺寸的 1%, 可以忽略不计,最大色畸变也小于像元尺寸的 1%。优化结构在 400 nm 处的色畸变和谱线弯曲值最大,但也均小于像元尺寸的 10%。两种结构的最大色畸变均随着波长的增大而增大,即随着波长增大,谱线越来越长。两种结构的最大谱线弯曲均为正值,即弯曲方向相同,优化结构的最大谱线弯曲随着波长增大而增大。两种系统均很好地控制了畸变值,能够确保光谱复原的准确性和高一一致性。

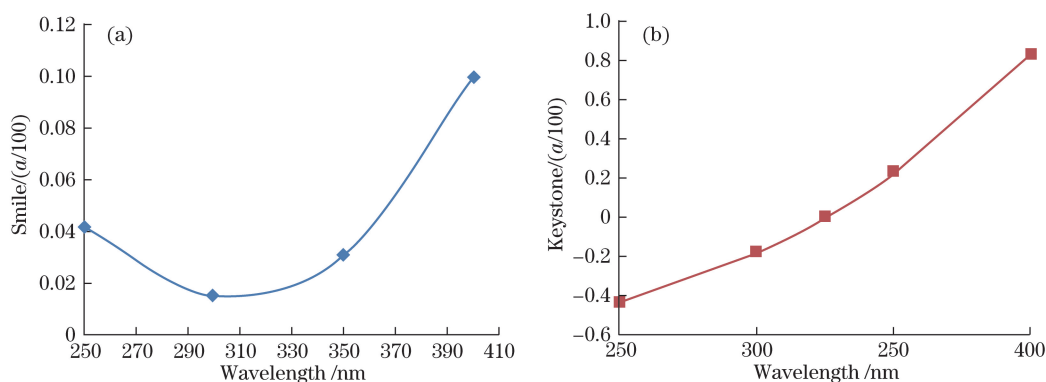


图 6 初始结构在不同波长处的(a)最大谱线弯曲和(b)最大色畸变

Fig. 6 (a) Maximum smile and (b) maximum keystone of the initial configuration at different wavelengths

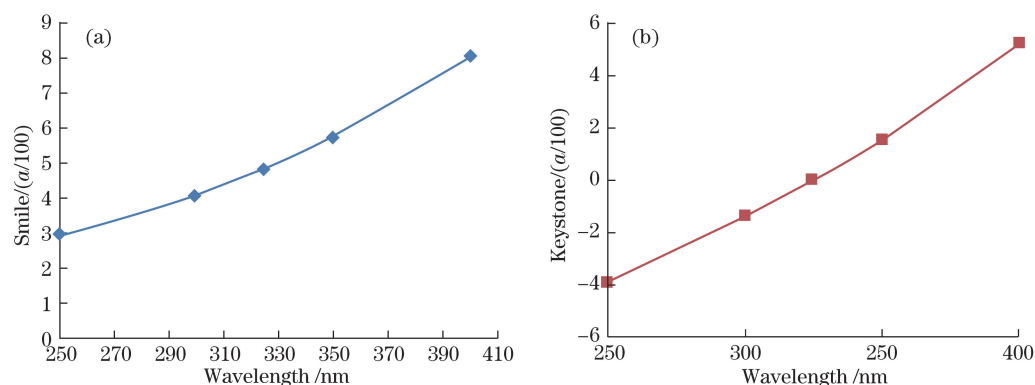


图 7 优化结构在不同波长处的(a)最大谱线弯曲和(b)最大色畸变

Fig. 7 (a) Maximum smile and (b) maximum keystone of the optimized configuration at different wavelengths

图 8 和图 9 分别为两种结构在中心波长和边缘波长的能量集中度曲线,从图中可以看出,两种结构在中心波

长和边缘波长处集中在一个探测器像元内的能量大于等于 90%,在工作波段内均可以得到满意的成像质量。

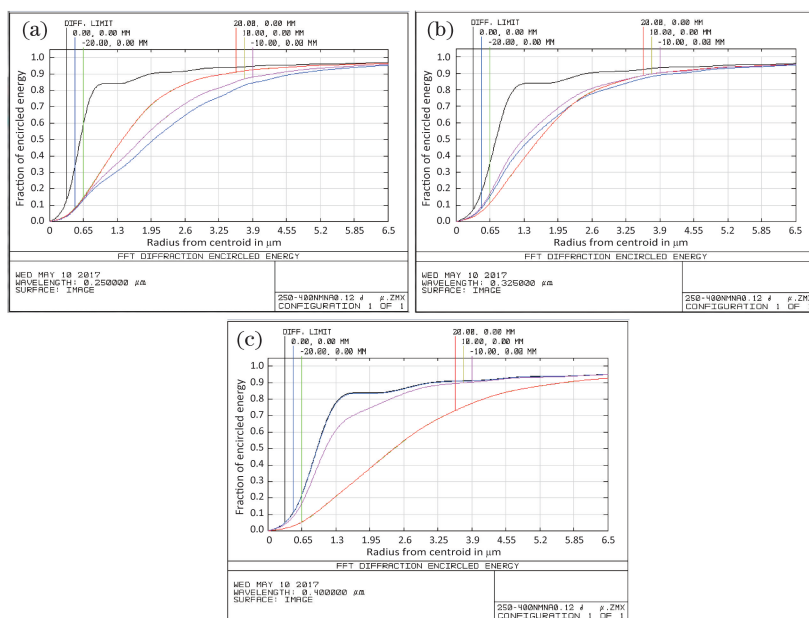


图 8 初始结构在中心波长及边缘波长处的能量集中度曲线。(a)边缘波长 250 nm;
(b)中心波长 325 nm;(c)边缘波长 400 nm

Fig. 8 Encircled energy curves of the initial configuration at central and edge wavelengths.
(a) Edge wavelength of 250 nm; (b) central wavelength of 325 nm; (c) edge wavelength of 400 nm

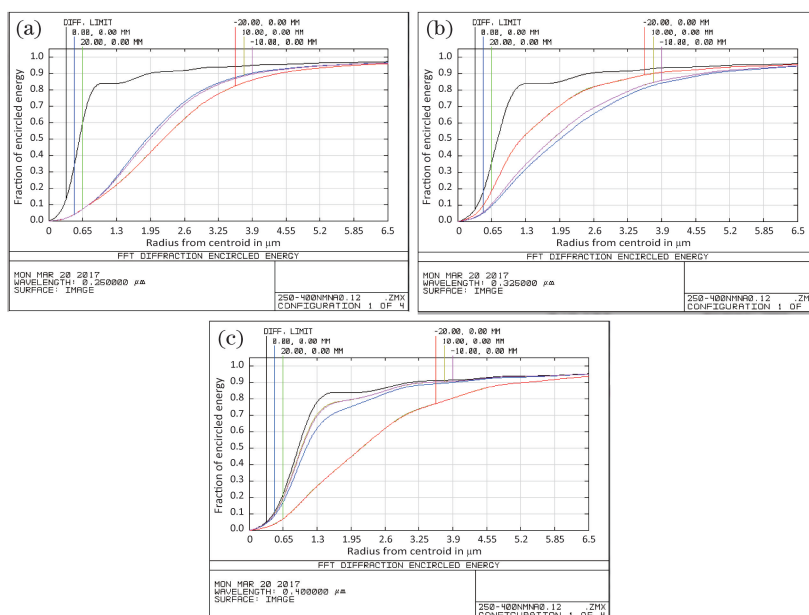


图9 优化结构在中心波长及边缘波长处的能量集中度曲线。(a)边缘波长 250 nm;
(b)中心波长 325 nm;(c)边缘波长 400 nm

Fig. 9 Encircled energy curves of the optimized configuration at central and edge wavelengths.

(a) Edge wavelength of 250 nm; (b) central wavelength of 325 nm; (c) edge wavelength of 400 nm

从以上分析结果可以看出:在整个工作波段内,两种基于 Offner 结构的凸面光栅成像光谱仪实现了 40 mm 全视场内小于 0.3 nm 的高分辨率成像,且系统成像质量良好。相比于北京理工大学的紫外成像光谱仪,本设计实现了更长狭缝和更高光谱分辨率的技术要求。其中优化方案采用在狭缝后以及像面前分别插入一块弯月透镜的设计,整体结构尺寸仅为 310 mm×220 mm×125 mm;该设计大大缩小了系统体积,实现了小型化、轻量化的要求,并且具有易加工、易装调的优点。

5 结 论

面向高分辨率紫外 Offner 成像光谱仪小型化、轻量化的要求,提出一种采用凸面光栅作为分光元件的 Offner 型紫外成像光谱仪。在原 Offner 系统的基础上,为了增加系统的自由度,将主镜裂变为两块小反射镜,得到了初始结构。优化结构是在初始结构基础上,在第一块反射镜前和第三块反射镜后插入两块弯月形透镜,使系统体积更小,结构更紧凑。通过对系统的分析表明,两种光谱仪系统都具备 Offner 结构良好的成像特性,但由于初始结构可以优化调节的自由度较小,因此优化结构的像质略高于初始结构。优化结构的成像质量接近衍射极限,能实现 40 mm 较大的狭缝线视场,光谱分辨率小于 0.3 nm,并且谱线弯曲和色畸变很小,确保了

复原光谱的准确性。同时,全球面的设计降低了加工及装调难度,适合作为机载、星载高光谱遥感的紫外成像光谱仪系统。

参 考 文 献

- [1] Zheng Y Q, Gao Z L. Optical system design of CO₂ sounder[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2645-2653.
郑玉权, 高志良. CO₂ 探测器光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2645-2653.
- [2] Wang B H, Ruan N J, Guo C L, *et al.* Optical system design of airborne light and compact high resolution imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022001.
王保华, 阮宁娟, 郭崇岭, 等. 机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022001.
- [3] Hao A H, Hu B L, Bai J G, *et al.* Design of airborne dual channel ultraviolet-visible imaging spectrometer with large field of view, wide spectrum, and high resolution[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12): 3432-3436.
郝爱花, 胡炳樑, 白加光, 等. 大视场宽谱段高分辨率分波段机载紫外-可见光成像光谱仪设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(12): 3432-3436.
- [4] Topping M Q, Pfeiffer J E, Sparks A W, *et al.* Advanced airborne hyperspectral imaging system[C]. SPIE, 2002, 4816: 1-11.

- [5] Davis C O, Bowles J, Leathers R A, *et al.* Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, 10(4): 210-221.
- [6] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, *et al.* The global ozone monitoring experiment (GOME): mission concept and first scientific results corresponding author[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(2): 151-175.
- [7] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, *et al.* SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, 56(2): 127-150.
- [8] Liu Y J, Cui J C, Bayanheshig, *et al.* Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 52-57.
刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 52-57.
- [9] Li F. Research on performance and the optical system of ultraviolet imaging spectrometer with dispersion[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
李飞. 新型色散型紫外成像光谱仪光学系统设计与性能测试[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [10] Cui T W, Ma Y, Zhang J. The development and applications of the airborne hyperspectral remote sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(2): 118-122.
崔廷伟, 马毅, 张杰. 航空高光谱遥感的发展与应用[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(2): 118-122.
- [11] Zheng Y Q, Yu B X. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. *Journal of 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.
- [12] Wang H B, Liu Q, Wu J H. Fabrication of convex blazed grating by Ar⁺ ion-beam etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0405002.
汪海宾, 刘全, 吴建宏. Ar⁺离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0405002.
- [13] Kim S H, Kong J K, Ku H. Analytical design of a hyper-spectral imaging spectrometer utilizing a convex grating[C]. *SPIE*, 2012, 8515: 85150V.
- [14] Mertz L. Concentric spectrographs[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(12): 3122-3124.
- [15] Huang Y S, Ni Z J. Research of the concentric three-reflection optical system[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(2): 42-46.
黄元申, 倪争技. 同心三反射镜光学系统研究[J]. *光学仪器*, 2005, 27(2): 42-46.
- [16] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, *et al.* Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9156-9168.
- [17] Kaiser S, Sang B, Schubert J, *et al.* Compact prism spectrometer of pushbroom type for hyperspectral imaging[C]. *SPIE*, 2008, 7100: 710014.