

文章编号 2097-1842(2024)01-0079-10

紫外小 F 数高变倍高光谱成像仪设计

刘 洋^{1,2}, 李 博^{1*}, 林冠宇^{1,3}, 王晓旭¹, 李寒霜¹, 顾国超¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081)

摘要: 常规成像光谱仪一般变倍比较低, 不利于大视场长狭缝多通道光学系统的扩展应用, 此外, 空间遥感中紫外波段的辐射能量较低, 需要成像光谱仪具有更小的 F 数。针对高光谱分辨率成像光谱仪小 F 数的探测需求, 本文设计了一种具有高变倍的高光谱分辨率 Offner 紫外成像光谱仪。该成像光谱仪的后置分光系统采用了具有轻小型特点的改进型 Offner 结构。结合成像光谱仪对变倍比和小 F 数的需求, 通过理论推导得到 Offner 初始结构参数。在像面前插入一块弯月透镜, 增加系统的优化自由度, 进而提升系统的成像质量。最终得到的成像光谱仪工作在 270~300 nm 波段时, 具有 40 mm 的长狭缝, 光谱分辨率优于 0.6 nm, 系统变倍比小于 0.22, F 数小于 2, 在截止频率为 14 lp/mm 时, 系统调制传递函数(MTF)均优于 0.9, 系统各波段各视场均方根半径(RMS)均小于 12 μm 。本文的研究对紫外波段高光谱探测成像光谱仪实现小 F 数、高变倍设计提供了一种设计方案。

关键词: 光学设计; 成像光谱仪; Offner 系统

中图分类号: TH744

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0037

Design of UV-band hyperspectral resolution imaging spectrometer with small F -number and high variable ratio

LIU Yang^{1,2}, LI Bo^{1*}, LIN Guan-yu^{1,3}, WANG Xiao-xu¹, LI Han-shuang¹, GU Guo-chao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: libo0008429@163.com

Abstract: Conventional imaging spectrometers generally have low variable ratio, which is not conducive to the extended application of large-field, long-slit, multi-channel optical systems. In space remote sensing, the radiation energy of the ultraviolet band is low, which requires the imaging spectrometer to have a smaller F -number. In order to meet the requirement of detecting small F -number of high spectral resolution imaging spectrometer, an Offner UV imaging spectrometer with high spectral resolution and high variable ratio is de-

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2023-04-03

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2022YFB3903202)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3903202)

signed in this paper. An improved Offner structure with light and small size is adopted in the rear beam splitting system of the imaging spectrometer. Based on the requirements of variable power ratio and small F -number of the imaging spectrometer, the initial Offner structure parameters are derived theoretically. A meniscus lens is inserted in front of the image to increase the degree of freedom for the optimization of the system and improve the imaging quality of the system. The obtained imaging spectrometer works in the 270~300 nm band with a long slit of 40 mm, a spectral resolution better than 0.6 nm, the system variable power ratio less than 0.22, and an F number less than 2. Its Modulation Transfer Function (MTF) is better than 0.9 at a cutoff frequency of 14 lp/mm, and the Root Mean Square (RMS) radius of each field of view in each band is less than 12 μm . This study provides a design scheme for the UV-band hyperspectral detection imaging spectrometer with small F -number and high variable ratio.

Key words: optical design; imaging spectrometer; Offner system

1 引言

成像光谱技术是目前应用非常广泛的技术,可以同时获得光谱和空间两个维度的信息。紫外波段相较可见及红外波段的波长更短,在探测领域具有一定的优势^[1-2]。但由于紫外波段在大气分子的作用下会发生一定程度的吸收和散射,其反射后的光谱能量远远低于可见波段^[3-4],因此成像光谱仪需要具有更小的 F 数,才能具有更强的集光能力和更高的信噪比。高空间分辨率的前置望远镜具有较长的等效焦距,相应的 F 数也较大。大 F 数望远镜也有利于实现大视场或者多通道的成像应用,便于降低光学系统设计难度,合理安排结构布局。而具有一定变倍比的系统可以同时满足大 F 数前置望远镜与小 F 数后置成像光谱仪的需求,因此变倍是成像光谱系统的重要特征。

国内外许多空间卫星上都搭载了具有中间变倍的成像光谱仪载荷,欧空局于2017年发射的Sentinel-5P是一颗全球大气污染监测卫星。其前置望远系统视场角为 108° , F 数为9。卫星上搭载的SWIR载荷的工作波段为2305~2385 nm,光谱分辨率为0.23 nm,像方 F 数为1.33。其由中继系统与SWIR分光成像部分共同实现0.147的高变倍^[5-6]。欧空局随后研制的Sentinel-5卫星,其前置望远系统视场角为 108° , F 数同样为9。卫星共搭载4个载荷,均具有一定的变倍比,其中紫外波段UV1载荷的工作波段为270~300 nm,

光谱分辨率为1 nm,变倍比约为0.4^[7]。

高分五号是我国第一颗现高光谱综合观测的卫星,其上搭载的大气痕量气体差分吸收光谱仪采用多通道探测方式进行观测,各个通道的工作波段分别为240~315 nm、311~403 nm、401~550 nm、545~710 nm,对应光谱分辨率在0.3~0.5 nm之间。光谱仪的前置光学系统由前置望远镜和中继光学结构两部分组成,前置望远镜交轨方向半视场角为 57° , F 数为9,具有一定变倍比的中继光学组件对前置望远镜进行二次成像,使得整体前置光学系统 F 数为3.2^[8-9]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所设计的星载宽视场差分吸收成像光谱仪的工作波段为280~450 nm,其前置望远系统视场角为 60° ,一次像面经过变倍比为0.2的中继系统在狭缝上再次成像,实现整机系统光谱分辨率小于1 nm, F 数为3^[10]。

常规成像光谱仪一般变倍比较低,不利于大视场多通道光学系统的扩展应用。而采用中继系统实现高变倍,则会将增加系统的体积、重量与成本。因此有必要对高变倍高光谱成像仪进行深入研究。

本文选取改进型Offner光谱仪作为初始结构,根据信噪比需求,确定光谱系统 F 数,进而确定系统的变倍比。通过对Offner的结构特性进行分析,计算得到分光系统的初始结构和设计要求,同时只增加一块透镜用于校正像差,最终使得整机系统 F 数小于2。优化完成后的小 F 数高变倍成像光谱仪成像质量良好,满足光谱采样频率为0.15 nm及光谱分辨率为0.6 nm的需求。

2 技术指标要求

人类工业活动对地球生态系统的影响正在逐渐增加,多种污染气体由此产生^[11-12]。 SO_2 是大气中常见的污染气体之一,不仅会对生态环境造成破坏,对人体健康也具有不可忽略的影响^[13]。 SO_2 气体的主要吸收范围是 185~315 nm,其中心波长为 285 nm。紫外小 F 数高变倍高光谱成像仪主要用于对大气中的 SO_2 进行观测,结合气体的特征波长,将系统工作波长设置为 270~300 nm。系统由前置望远镜与后置分光成像系统两部分构成。系统探测器采用 TELEDYNE 的 CCD314,像元尺寸为 $20\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$,像元数为 1404×1350 。空间维采用 2 像元合并采样,光谱维采用 4 像元合并采样。光谱仪的主要技术指标要求如表 1 所示。

表 1 小 F 数高变倍成像光谱仪指标要求

Tab.1 Index requirements of imaging spectrometer with small F -number and high variable ratio

参数	指标
波段/nm	270~300
视场/(°)	20
F 数	2
变倍比	<0.22
光谱分辨率/nm	<0.6
狭缝长度/mm	40
MTF	>0.8@14 lp/mm
探测器像元尺寸/ μm	20×30

3 理论分析

空间分辨率 GSD 是高光谱成像仪重要的设计指标之一,可表示为

$$GSD = \frac{H \times \text{pixel}_s}{f \times \beta}, \quad (1)$$

其中, H 为轨道高度, pixel_s 为合并后的空间维像元尺寸, f 为望远系统的焦距, β 为成像光谱仪系统的放大倍率。望远系统的焦距 f 可表示为:

$$f = F_w^\# \times D, \quad (2)$$

其中, $F_w^\#$ 为望远系统的 F 数, D 为望远系统的入瞳直径。

成像光谱仪系统的放大倍率 β 可表示为:

$$\beta = \frac{F^\#}{F_w^\#}, \quad (3)$$

其中 $F^\#$ 为整体系统的像方 F 数。整理得到

$$GSD = \frac{H \times \text{pixel}_s}{F_w^\# \times D \times \frac{F^\#}{F_w^\#}}. \quad (4)$$

可见,在保证系统集成能力,整体系统 F 数不变的前提下,当望远系统入瞳直径 D ,轨道高度 H ,空间维像元尺寸 pixel_s 都不变时,提高系统的变倍比,对整体系统的空间分辨率不造成影响。

Offner 结构的成像系统具有结构紧凑、像差小的特点。初始结构采用如图 1 所示的改进型 Offner 系统,将第一块反射镜拆分成两块小反射镜。在此基础上,通过计算准直系统与成像系统的焦距之比,得到系统初始结构,实现小 F 数高变倍的设计。相比于仅由两块反射镜构成的传统 Offner 系统,改进型 Offner 系统具有更大的设计自由度,可以更加有效地校正像差。同时,更少的透镜数量可以保证紫外成像光谱系统的光学效率,减小光能损耗。

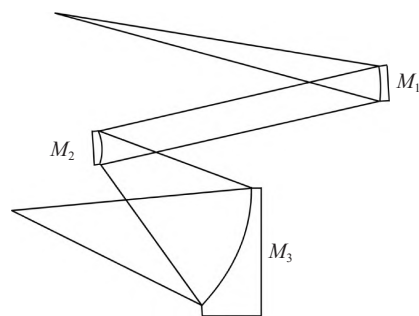


图 1 改进型 Offner 结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the improved Offner structure

改进型 Offner 分光系统为物方远心系统,便于与前置望远镜进行衔接。两块反射镜分别为 M_1 、 M_3 ,凸面光栅为 M_2 。根据高斯光学理论,由 M_2 与 M_3 构成的成像系统的焦距 f_F 可表示为:

$$f_F = \frac{f_2 f_3}{f_2 - f_3 - d}, \quad (5)$$

式中 f_2 为凸面光栅 M_2 的焦距, f_3 为成像反射镜 M_3 的焦距, d 为凸面光栅 M_2 与反射镜 R_3 的光心间距。曲率半径分别为 R_1, R_2, R_3 。

成像光谱仪系统的放大倍率 β 可以表示为成像系统焦距 f_F 与准直系统的焦距 f_1 之比

$$\beta = \frac{f_F}{f_1} \quad (6)$$

由于反射镜的焦距 f 等于曲率半径 R 的 $1/2$, 整理得到

$$\beta = \frac{R_2 R_3}{(R_2 - R_3 - d) R_1} \quad (7)$$

成像光谱仪系统的色散长度可表示为

$$\Delta l = \frac{\Delta \lambda \times k \times \sigma}{\delta_\lambda} \quad (8)$$

其中, $\Delta \lambda$ 为工作波段范围, σ 为合并后的像元尺寸, k 为采样因子, δ_λ 为光谱分辨率。

选择望远镜像方 F 数为 9, 相应的成像光谱仪的物方数值孔径为 0.055。综合考虑紫外波段辐射能量和信噪比要求, 选择光谱仪 F 数为 2, 对应系统放大倍率 β 约为 0.22。取光谱分辨率为 0.6 nm, 采样因子 $k=4$, 狭缝长度为 40 mm, $R_1=990$ mm, $R_2=230$ mm, $R_3=380$ mm。计算得到系统所需色散长度 $\Delta l=6$ mm, 凸面光栅 M_2 与反射镜 M_3 的光心间距 $d=251.28$ mm。

4 紫外小 F 数高变倍成像光谱仪光学系统设计

4.1 望远系统设计

考虑到望远系统大视场以及对成像质量的要求, 望远镜最终采用透射式结构。同时使用二次曲面以校正像差与畸变。优化时, 首先设定望远系统的像方 F 数为 9, 系统半视场角为 20° , 将光阑设置在第一个面上。考虑到狭缝的装调, 限制系统像面到光学系统最后一个面的距离大于 5 mm。为了便于与 Offner 分光系统进行对接, 控制各视场入射到像面的角度, 使其接近像方远心。优化完成后, 得到如图 2 所示的望远镜二维图、三维图。

优化完成后, 望远镜 MTF 如图 3(彩图见期刊电子版)所示, 在奈奎斯特频率为 14 lp/mm 时,

MTF 优于 0.9, 接近衍射极限。望远镜点列图如图 4 所示, RMS 在 5 个视场内均小于 $2 \mu\text{m}$, 成像质量良好。

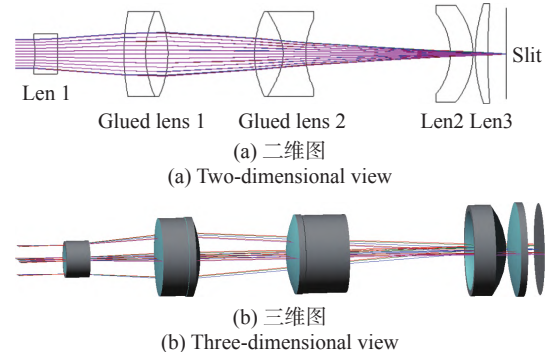


图 2 望远镜结构图

Fig. 2 Telescope's structure diagram

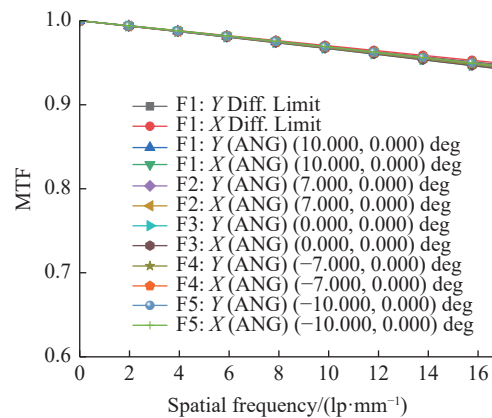


图 3 望远镜 MTF 图

Fig. 3 Telescope's MTF diagram

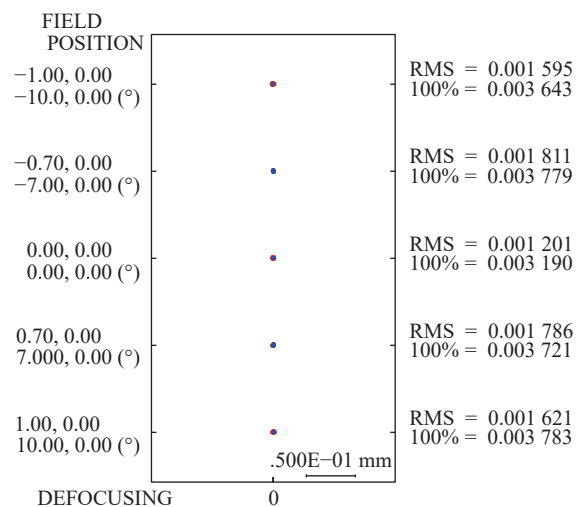


图 4 望远镜点列图

Fig. 4 Telescope's spot diagram

望远系统畸变与场曲情况如图 5 所示, 均满足成像质量要求。

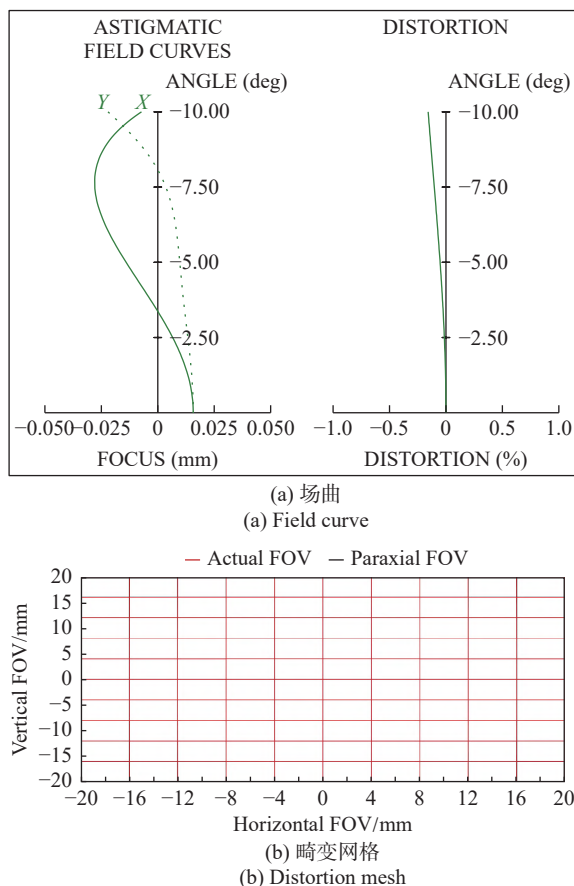


图5 望远镜像质评价图

Fig. 5 Image quality evaluation map of the telescope

4.2 Offner 分光系统设计

系统物方 F 数为9,设置相应物方数值孔径为0.055。设置光栅衍射级次 $m=-1$,狭缝长度为40 mm,并将上述初始结构代入。为平衡高变倍比系统与高成像质量的要求,在像面前插入一块弯月透镜。紫外波段能选择的材料种类较少,常用材料仅氟化钙和熔石英两种。熔石英相比于氟化钙使用条件更宽松,因此本文选择熔石英作为弯月透镜的材料。

弯月透镜靠近探测器的一面为球面,靠近反射镜M3的一面为二次曲面。系统产生的球差通过非球面反射镜M3进行校正。将系统的孔径光阑设置在光栅表面。

在优化过程中,根据理论计算,约束色散长度大于6 mm。使用CODEV自带的宏文件firAB-CD在优化过程中查看离轴系统的 F 数;使用@JMRCC宏文件控制光线与镜片边缘的距离,保证镜片不会对光线路径产生遮挡。根据优化结果逐步调整约束条件,控制光阑位置,保证系统MTF

接近衍射极限。将CODEV偏心表面中的 Y 偏心与 α 倾斜设置为变量,以进一步校正系统像质。其中弯月透镜前表面设置为基本,其他表面均设置为偏心与弯曲。将光栅曲率半径与光栅刻线密度设置为变量,直至找出最佳的组合结果。经分析设定,光栅曲率半径为233.72 mm,光栅刻线数为2118 lp/mm。

光栅的角色散率是评判光栅色散能力的重要指标之一。由光栅方程对波长进行微分,就可得到光栅的角色散率 D 的公式,可表示为:

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{k}{d' \cos \theta} \quad (9)$$

式中, λ 为波长, θ 为对应衍射角, k 为衍射级次, d' 为光栅常数。系统中心波长为285 nm,衍射级次为-1级,对应的衍射角为44.186°,光栅常数为472.14 nm,对应中心波长的角色散率为0.00295 rad/nm。

经由后方成像光路后,可得到线色散值为0.203 mm/nm。

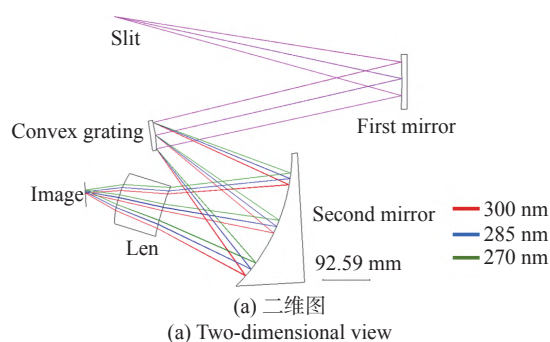
选择光栅为闪耀光栅,闪耀波长 λ_b 处的光栅衍射效率最大,波长离闪耀波长越远,衍射效率将越低。一般认为,相对衍射效率大于0.5的范围是可用的,其范围可用经验公式表示为^[14]

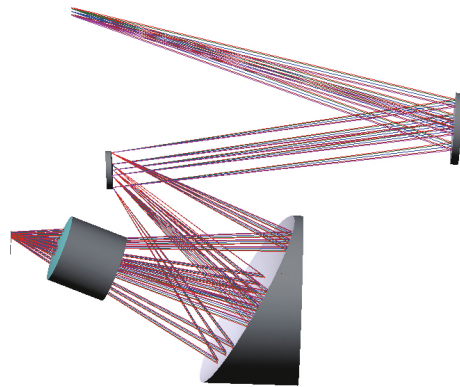
$$(2/3)\lambda_b \leq \lambda \leq 2\lambda_b \quad (10)$$

根据上述公式选取光栅闪耀波长为285 nm。光栅刻线为2118 lp/mm,在紫外波段进行衍射。因此,可选择离子束刻蚀,其不受尺寸与曲面形状的限制。选用常用的熔石英为基底材料。具有一定的工程可行性。

最终实现Offner分光成像系统的二维图和三维图如图6(彩图见期刊电子版)所示。其色散长度达到了6.1 mm,光谱分辨率小于0.6 nm。

光谱仪系统的 Y 半径、 Y 偏心和 α 倾斜数据如表2所示。

(a) 二维图
(a) Two-dimensional view



(b) 三维图
(b) Three-dimensional view

图 6 分光系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of spectroscopic system

表 2 小 F 数高变倍成像光谱仪系统数据

Tab. 2 Imaging data of spectrometer system with small F -number and high variable ratio

表面	Y 半径/mm	Y 偏心/mm	α 倾斜/(°)
1	-990.00	-5.89	12.18
2	-233.73	/	-4.65
3	infinite	-130.12	-3.86
4	-386.80	127.07	7.97
5	510.22	-88.36	-28.17
6	204.34	/	/
7	infinite	-28	19.34

Offner 分光成像系统各波段 MTF 如图 7 (彩图见期刊电子版)所示。可见,在波长分别为 270 nm、285 nm 和 300 nm 处,在截止频率为 14 lp/mm 时,MTF 均优于 0.9。系统各波段点列图如图 8(彩图见期刊电子版)所示,RMS 均小于 12 μm ,小于 1/2 个合并后的像元大小,符合成像指标要求。

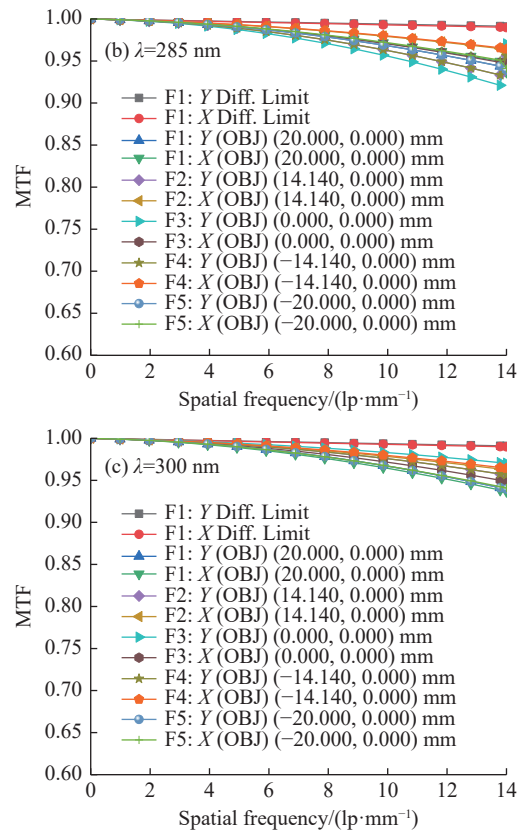
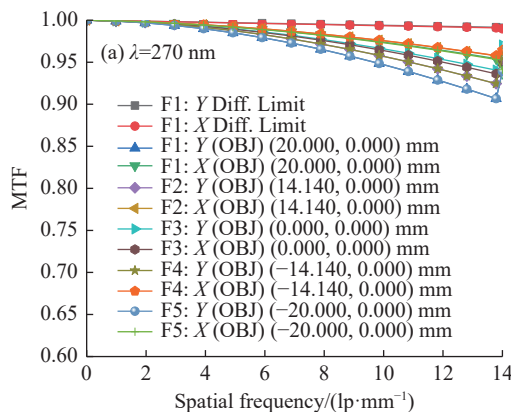
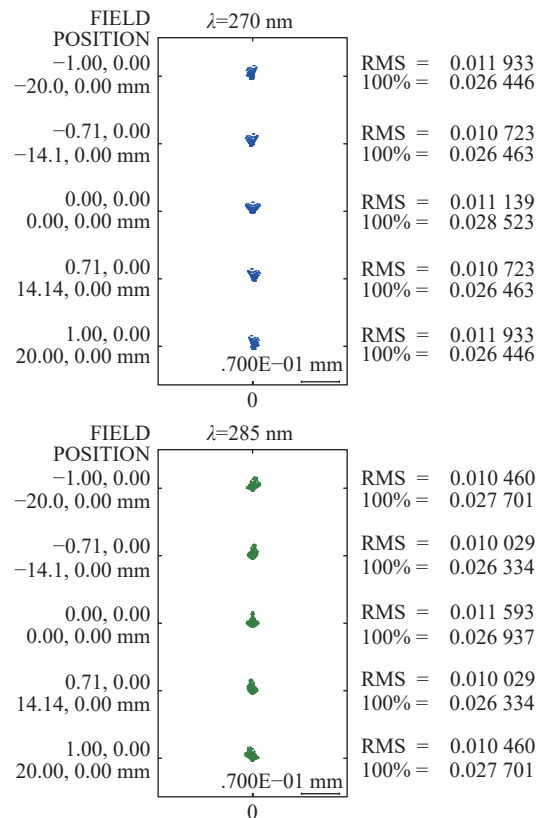


图 7 各波段成像光谱仪的 MTF 曲线图

Fig. 7 MTF diagrams at different wavelengths



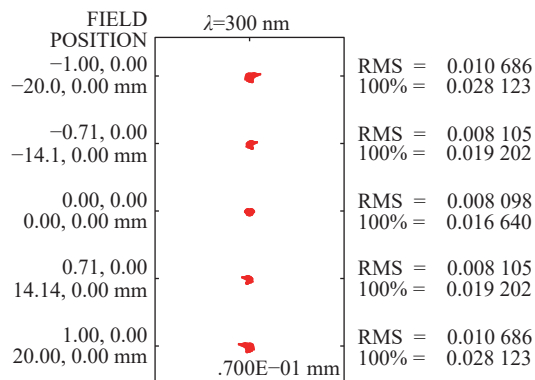
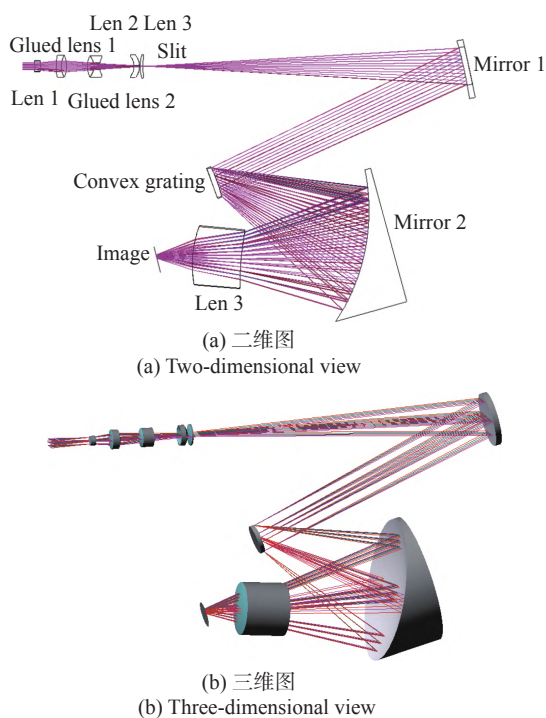


图 8 各波段成像光谱仪的点列图

Fig. 8 Spot diagrams at different wavelengths

4.3 整体光学系统设计

将望远镜与 Offner 分光成像光谱部分进行对接, 最终得到的整体结构如图 9 所示。在望远镜像方位置处放置狭缝, 狭缝长为 40 mm。整体光学系统物面与像面处于同一方向, 系统像面与光学系统最后一面之间的距离超过 10 mm, 便于放置探测器, 同时有利于实际应用时, 增加光学部件以消除系统杂散光的影响^[15]。

图 9 紫外小 F 数高变倍高光谱成像仪结构图Fig. 9 Structure diagram of UV-bound hyperspectral imaging spectrometer with small F -number and high variable ratio

成像光谱仪整体的 MTF 曲线图如图 10 所示, RMS 图如图 11 所示。

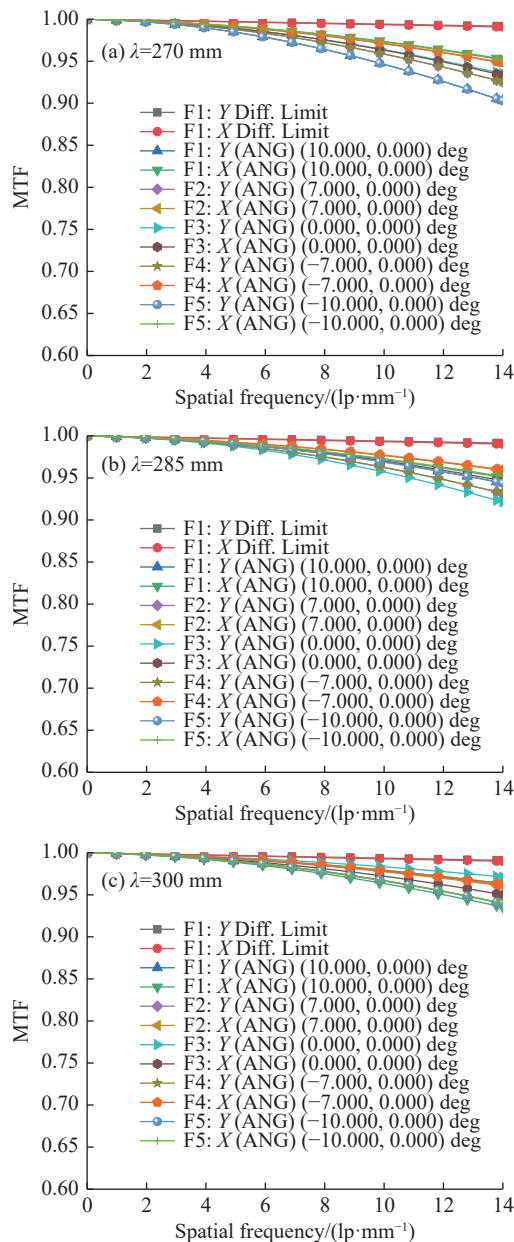


图 10 各波段整体结构 MTF 曲线图

Fig. 10 MTF diagrams of the system at different wavelengths

由图 10~图 11 可知: 在全波段全视场的条件下, 前置望远镜和后置光谱仪对接后的整机系统在奈奎斯特频率为 14 lp/mm 时, MTF 均优于 0.9, 接近衍射极限; RMS 均小于 12 μm , 小于 1/2 个合并后的像元大小, 符合成像指标要求。

谱线弯曲和色畸变是判断光谱成像质量的重要指标。谱线弯曲是指同一个波长, 不同视场在垂直于狭缝方向上的偏离程度。色畸变是指成像不同波长在相同视场下像面高的偏离程度。

成像光谱仪整体的谱线弯曲曲线图如图 12 所示, 色畸变曲线如图 13 所示。

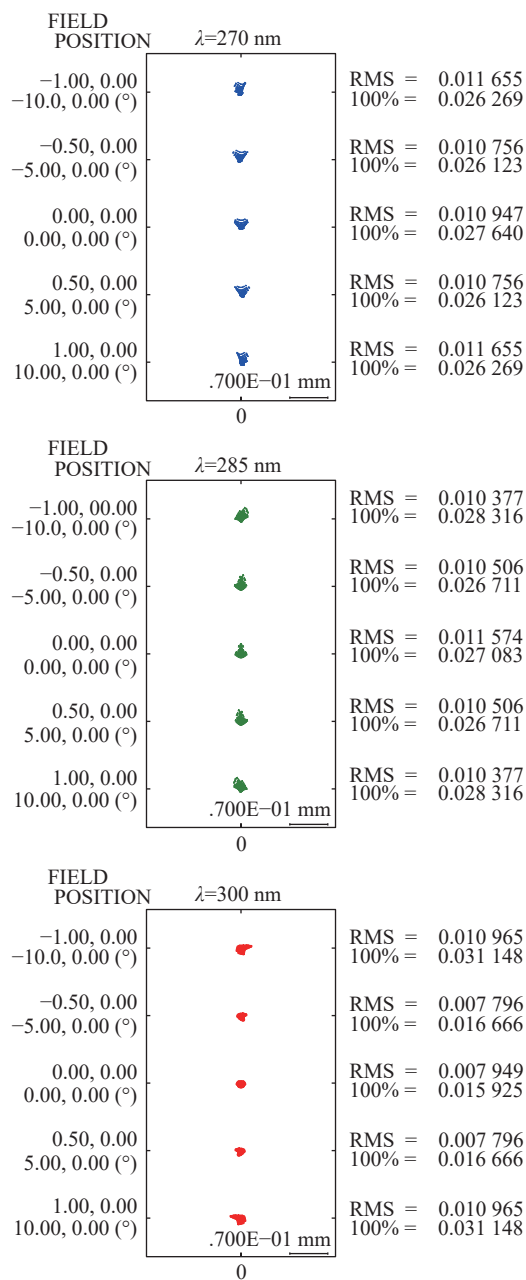


图 11 各波段整体结构 RMS 点列图

Fig. 11 RMS spot diagrams of the system at different wavelengths

由图 5~图 6 可知,整体系统的谱线弯曲与色畸变均小于 $10\ \mu\text{m}$, 小于 $1/4$ 个合并后的像元大小,符合成像指标要求。

对紫外小 F 数高变倍高光谱成像仪的中心波长进行公差分析,以测试光学系统的公差灵敏度,从而确定系统在仪器研制中的实际应用可行性。在 CODEV 默认的公差值下,分析结果如图 14 (彩图见期刊电子版)所示。整体系统 80% 以上概率 MTF 值大于 0.86, 99% 以上的概率 MTF 值大于 0.75,满足系统实际应用要求。

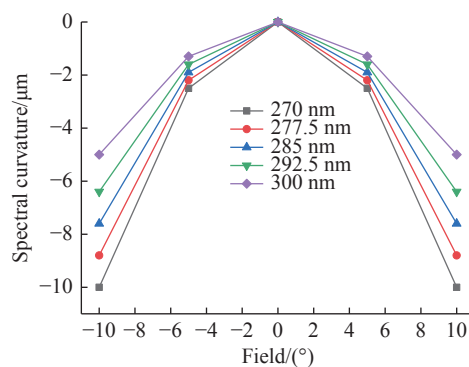


图 12 谱线弯曲

Fig. 12 Spectral distortion

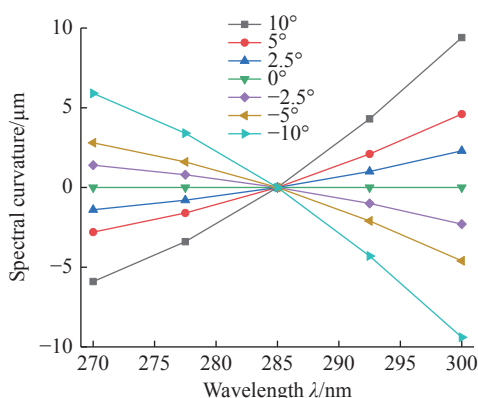
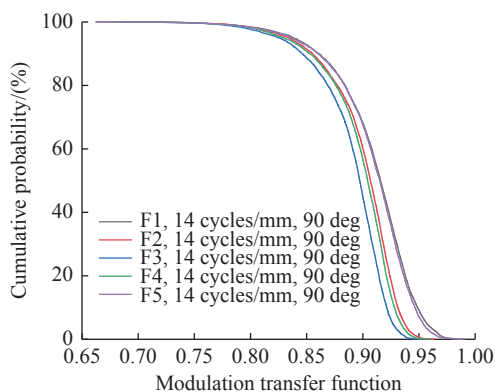


图 13 色畸变

Fig. 13 Chromatic distortion

图 14 紫外小 F 数高变倍高光谱成像仪 MTF 公差分析Fig. 14 MTF tolerance analysis of UV-band hyperspectral imaging spectrometer with small F -number and high variable ratio

5 结 论

大视场长狭缝的望远系统在相同的轨道高度下,具有更大的幅宽。有助于系统减小回归周期,进而使探测区域的时间分辨率得到有效提高。

高变倍有助于大视场多通道长狭缝成像的扩

展应用,而目前的成像光谱仪多为低变倍系统。受限于探测器像面有效尺寸,难以对更长的狭缝实现合理的探测。针对该类问题,本文设计了一种紫外小 F 数高变倍高光谱成像仪。设计过程中,将改进型 Offner 结构的出射臂引入弯月透镜,以增加系统设计自由度,有效改良了成像质量。对系统进行逐步优化,在取得良好成像质量

的基础上实现高变倍比。最终实现在工作波段为 270~300 nm 时,系统 F 数小于 2,变倍比小于 0.22。在截止频率为 14 lp/mm 时,MTF 均优于 0.9,各视场各波段 RMS 均小于 12 μm ,光谱分辨率均优于 0.6 nm。满足设计指标要求。本文对于紫外小 F 数高变倍成像光谱仪的设计提供了一种设计方案。

参考文献:

- [1] 马子吉,温作赢,赵锋,等.真空紫外光电离质谱用于在线检测区分不同品牌卷烟[J].分析化学,2022,50(12): 1927-1934.
MA Z J, WEN Z Y, ZHAO F, *et al.*. Online analysis of different brands of cigarettes by vacuum ultraviolet photoionization mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(12): 1927-1934. (in Chinese)
- [2] 陈玥瑶,夏静静,韦芸,等.近红外光谱法无损检测平谷产大桃品质方法研究[J].分析化学,2023,51(3): 454-462.
CHEN Y Y, XIA J J, WEI Y, *et al.*. Research on nondestructive quality test of Pinggu Peach by near-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(3): 454-462. (in Chinese)
- [3] 陈塑淇,吕博,刘伟奇,等.用于电晕检测的日盲紫外成像系统设计[J].光子学报,2022,51(9): 0922001.
CHEN S H, LÜ B, LIU W Q, *et al.*. Design of a solar-blind ultraviolet imaging system for corona detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(9): 0922001. (in Chinese)
- [4] THUILLIER G, ZHU P, SNOW M, *et al.*. Characteristics of solar-irradiance spectra from measurements, modeling, and theoretical approach[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 79.
- [5] DE VRIES J, VOORS R, ORDING B, *et al.*. TROPOMI on ESA's Sentinel 5p ready for launch and use[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9688: 96880B.
- [6] BODAH B W, NECKEL A, MACULAN L S, *et al.*. Sentinel-5P TROPOMI satellite application for NO₂ and CO studies aiming at environmental valuation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 357: 131960.
- [7] HACHMEISTER J, SCHNEISING O, BUCHWITZ M, *et al.*. On the influence of underlying elevation data on Sentinel-5 precursor TROPOMI satellite methane retrievals over Greenland[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(13): 4063-4074.
- [8] 司福祺,江宇,江庆五,等.星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计[J].光学学报,2013,33(3): 0322002.
SI F Q, JIANG Y, JIANG Q W, *et al.*. Design of fore optical system in space-borne differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0322002. (in Chinese)
- [9] 程良晓,陶金花,余超,等.高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪对流层NO₂柱浓度遥感反演研究[J].遥感学报,2021,25(11): 2313-2325.
CHENG L X, TAO J H, YU C, *et al.*. Tropospheric NO₂ column density retrieval from the GF-5 EMI data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(11): 2313-2325. (in Chinese)
- [10] 薛庆生.星载宽视场差分吸收成像光谱仪光学设计[J].光子学报,2015,35(1): 0122002.
XUE Q SH. Optical design of space-based wide field-of-view differential optical absorption imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0122002. (in Chinese)
- [11] YE X, YI X L, LIN CH, *et al.*. Instrument development: Chinese radiometric benchmark of reflected solar band based on space cryogenic absolute radiometer[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2856.
- [12] 刘明言,石秀顶,李天国,等.电化学分析方法检测重金属离子研究进展[J].应用化学,2023,40(4): 463-475.
LIU M Y, SHI X D, LI T G, *et al.*. Research progress in detection of heavy metal ions by electrochemical analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(4): 463-475. (in Chinese)
- [13] 陈颖,胡天丁,刘云利,等.二氧化硫在化学资源化利用中的研究进展[J].应用化学,2022,39(2): 223-234.
CHEN Y, HU T D, LIU Y L, *et al.*. Research progress on chemical resource utilization of sulfur dioxide[J]. *Chinese*

- Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(2): 223-234. (in Chinese)
- [14] 杨礼艳. 分光辐射表光学系统设计和定标方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
YANG L Y. Optical system design and calibration method research of spectroradiometer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 范纪泽, 李博, 张璐, 等. 应用于作物荧光检测的改进型Offner光谱仪设计[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1459-1467.
FAN J Z, LI B, ZHANG L, *et al.*. Design of an improved Offner spectrometer for crop fluorescence detection[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1459-1467. (in Chinese)

作者简介:



刘 洋(1998—), 女, 吉林公主岭人, 硕士研究生, 2021 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: kun9823@163.com



李 博(1981—), 男, 吉林梨树人, 博士, 研究员, 2011 年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事高光谱遥感总体设计方面的研究。E-mail: libo0008429@163.com