

文章编号 2097-1842(2022)05-1029-09

超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪设计

张璐^{1,2}, 李博^{1*}, 李寒霜¹, 顾国超¹, 王晓旭¹, 邵英秋¹, 林冠宇^{1,3}, 叶新^{1,3}

(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:针对超光谱分辨率成像光谱仪多通道探测需求, 本文设计了一种超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪。该成像光谱仪望远系统采用视场离轴的离轴三反结构, 分光系统采用了具有小型轻量化优点的改进型 Offner 结构。通过对 Offner 光谱仪结构的理论推导, 得出了满足超光谱分辨要求的双通道共光路 Offner 初始结构参数。为了提高成像光谱仪的成像质量, 在 Offner 结构中引入弯月透镜, 并对系统进行逐步优化。最终得到的双通道共光路成像光谱仪工作波段为 280~300 nm 和 370~400 nm, 在奈奎斯特频率为 27.8 lp/mm 时, 双通道的调制传递函数(MTF)均优于 0.8, 全视场均方根半径(RMS)均小于 9 μm , 光谱分辨率均优于 0.1 nm。本文研究对天基超光谱探测成像光谱仪小型化、集成化设计具有重要意义。

关键词: Offner 光谱成像系统; 光学设计; 超光谱分辨率

中图分类号: TH744.1

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0125

Hyperspectral resolution ultraviolet dual channel common optical path imaging spectrometer

ZHANG Lu^{1,2}, LI Bo^{1*}, LI Han-shuang¹, GU Guo-chao¹, WANG Xiao-xu¹,

SHAO Ying-qiu¹, LIN Guan-yu^{1,3}, YE Xin^{1,3}

(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: Based on the requirement of multichannel detection for hyperspectral resolution imaging spectrometer, we design a hyperspectral resolution ultraviolet dual channel common optical path imaging spectro-

收稿日期: 2022-06-14; 修订日期: 2022-07-07

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项资助(No. XDA28050102); 国家自然科学基金项目(No. 62005268); 国家重点研发计划项目资助(No. 2018YFB0504600, No. 2018YFB0504603); 中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目(No. A132001W03)

Supported by Special project of black land protection and utilization science and technology innovation project (No. XDA28050102); National Natural Science Foundation of China (No. 62005268); National Key R&D Program of China undergrant (No. 2018YFB0504600, No. 2018YFB0504603); Stable-Support Scientific Project of China Research Institute of Radiowave Propagation (No. A132001W03)

meter whose telescopic system adopts an off-axis three mirror structure with an off-axis field of view, and whose spectroscopic system applies a modified small and light weight Offner structure. Through the theoretical analysis of Offner spectrometer structures, initial structural parameters of a dual channel common optical path Offner that met the requirements of hyperspectral resolution were achieved. In order to improve the imaging quality of the imaging spectrometer, meniscus lenses were introduced into Offner structure, and the system was gradually optimized. Eventually, a dual channel common optical path imaging spectrometer was obtained with operating bands of 280~300 nm and 370~400 nm. When the Nyquist frequency is 27.8 lp/mm, the modulation transfer function (MTF) of both channels is better than 0.8, the full field mean square root radius (RMS) is less than 9 μm , and the spectral resolution is better than 0.1 nm. The design of this imaging spectrometer has important implications for the miniaturization and integration design of space-based hyperspectral detection imaging spectrometers.

Key words: Offner spectral imaging system; optical design; hyperspectral resolution

1 引言

成像光谱仪是一种可以同时获取光谱信息与图像信息的光谱仪器,其在深空探测领域有着十分重要的作用。

国内外许多空间探测卫星都搭载了成像光谱仪。隶属于美国航空航天局(NASA)和欧洲航天局(ESA)的Cassini卫星上搭载的VIMS-V成像光谱仪^[1-2],可单通道成像,光谱覆盖范围为0.3~1.05 μm ,光谱分辨率为2 nm;ESA研制的Sentinel-5搭载了5台成像光谱仪^[3-4],其中UV1、UV2-VIS、SWIR1、SWIR3等4台光谱仪均为单通道的成像光谱仪,对应光谱范围分别为0.27~0.31 μm 、0.3~0.5 μm 、1.59~1.675 μm 、2.3~2.385 μm ,对应光谱分辨率分别为1、0.5、0.25、0.25 nm,NIR仍然是单通道成像方式,通过对探测器进行区域划分形成多光谱范围的探测,光谱范围为0.685~0.71 μm 、0.745~0.755 μm 、0.755~0.773 μm ,对应光谱分辨率全都为0.4 nm。NASA研发的NACHOS立方卫星上搭载的高分辨率紫外可见光谱成像仪^[5],同样采用了单通道的成像方式,光谱范围覆盖0.29~0.5 μm ,光谱分辨率为1.3 nm。

我国研制的高分5号卫星上所搭载的可见短波红外高光谱相机AHSI^[6-7],光谱范围为0.39~2.51 μm ,分为可见近红外和短波红外两个波段通道,每个波段通道都由单独的一台光谱仪成像,两台光谱仪通过视场分离的方式对接到同一台望远镜上,可见近红外光谱仪的光谱分辨率为5 nm,

短波红外光谱仪的光谱分辨率为10 nm。碳卫星所搭载的二氧化碳探测仪^[8-9],采用了三台光栅光谱仪分别对中心波长在0.76 μm 的O₂-A吸收带、中心波长在1.61 μm 的弱CO₂吸收带、中心波长在2.06 μm 的强CO₂吸收带进行探测。通过分束器对接到同一台望远镜上,对应光谱分辨率分别为0.044、0.08、0.1 nm。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所设计的应用于作物荧光检测的改进型Offner光谱仪^[10],也为单通道成像,光谱范围为0.67~0.78 μm ,光谱分辨率为0.3 nm。

目前国内外的成像光谱仪多数采用单通道结构,一台光谱仪只能对一个波段通道进行色散和探测,对于多个通道的探测需求,需要使用多台光谱仪来完成,导致仪器整体的光机结构较大。而且,能实现超光谱分辨率的成像光谱仪较少。可实现对目标进行精细探测和满足载荷轻量化、小型化、高度集成化需求的具有超光谱探测能力的双通道共光路成像光谱仪短缺。

针对上述问题,本文选取改进型Offner光谱仪作为初始结构,根据大气观测波段需求,确定双通道的波段范围,利用Offner的结构特性,计算出Offner分光系统的初始结构,实现双通道共光路设计,同时利用弯月透镜校正像差。优化完成后的双通道共光路光谱仪成像质量良好,达到了优于0.1 nm的超光谱分辨率。

2 技术指标

超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪

通道1主要对大气中的 SO_2 气体污染物进行观测,波段范围为280~300 nm,通道2主要对 NO_2 等气体进行观测,波段范围为370~400 nm。成像光谱仪采用辰芯GSENSE4040 CMOS探测器,像元尺寸为 $9\text{ }\mu\text{m}\times 9\text{ }\mu\text{m}$,像元数为 4096×4096 ,空间维和光谱维均为2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 本文成像光谱仪的主要技术指标要求

Tab.1 Main technical index requirements of the designed spectrometer

Parameter	Value
Height/km	600
Spectral range /nm	280~300、370~400
F	3.8
Swath/ km	100
Field of view /(°)	9.5
GSD/m	≤ 50
Spectral resolution /nm	≤ 0.1
Detector's pixel size / μm	9×9
Detector's array size /pixel	4096×4096
Sampling	2×2 binning
MTF	$\geq 0.5@27.8\text{ lp/mm}$

3 双通道共光路成像光谱仪光学系统设计

3.1 双通道 Offner 分光系统设计理论

Offner 结构的光谱仪是一种应用广泛的色散型成像光谱仪,容易实现小F数、长狭缝的设计。Offner 光谱仪有着体积小、分辨率高、容易装调的优点。

为了实现小型化,本文采用改进型 Offner 系统作为初始结构,入射狭缝和两个通道的像面都在光栅上方。在此基础上,通过计算狭缝的离轴量,使狭缝恰好位于两个波段像面之间,形成双通道共光路结构。相比于入射光束和出射光束分别位于光栅上下两端的传统 Offner 系统,改进型 Offner 系统只使用了一半的弯月透镜和反射镜。将改进型 Offner 系统作为初始结构设计的双通道 Offner 系统不仅降低了双通道光谱仪中所需第二个通道光谱仪的体积和重量,还进一步降低了弯月透镜和反射镜的体积和重量,并且能兼顾超光谱分辨率需求。

为了简化计算,初始结构采用如图1所示的双通道改进型 Offner 系统,系统为物方远心系统,

通道1的像面为 I_1 ,通道2的像面为 I_2 ,入射狭缝 S 恰好介于 I_1 和 I_2 之间。反射镜 M 和凸面光栅 G 共心,反射镜 M 的半径为 R ,光栅的半径为 R_G 。

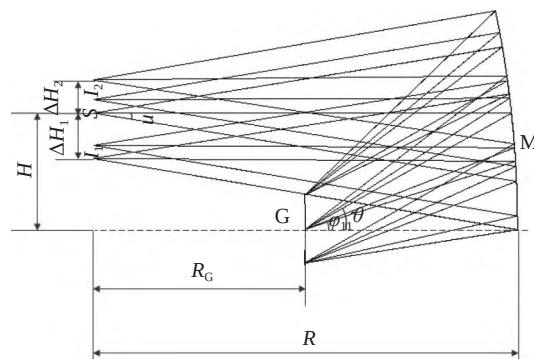


图1 改进型 Offner 结构图

Fig.1 Schematic diagram of the improved Offner structure

从通道1的短波长 λ_{11} 到通道2的长波长 λ_{22} 的高度差 ΔH 可表示为

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2, \quad (1)$$

式中, ΔH_1 为狭缝到通道1短波长 λ_{11} 像点到狭缝 S 的距离, ΔH_2 为通道2长波长 λ_{22} 像点到狭缝 S 的距离。

狭缝位于通道1长波长 λ_{12} 像点与通道2短波长 λ_{21} 像点之间。光谱仪为1:1成像,像方孔径角也可近似为 u ,根据孔径角的正切关系可以推出

$$\tan u \times R + \Delta l_1 < H < \tan u \times R + \Delta H - \Delta l_2, \quad (2)$$

式中, Δl_1 为通道1的色散长度, Δl_2 为通道2的色散长度。

色散长度 Δl 可表示为

$$\Delta l = \frac{\Delta \lambda \times k \times \sigma}{\delta_\lambda}, \quad (3)$$

其中, $\Delta \lambda$ 为波段范围, σ 为合并后的像元尺寸, δ_λ 为光谱分辨率, k 为采样参数,一般情况下 $k=2$,即光谱分辨率为0.1 nm时,采样间隔为0.05 nm。

双通道通过一块光栅色散,同样的光栅间隔 d 对两个通道均适用,由光栅方程可得

$$d(\sin \theta + \sin \varphi_{11}) = m \lambda_{11}, \quad (4)$$

式中, θ 为光栅入射角, φ_{11} 为通道1短波长 λ_{11} 对应的衍射角, m 为衍射级次。

ΔH_1 可近似为

$$\Delta H_1 = (R - R_G)(\sin \theta - \sin \varphi_{11}). \quad (5)$$

光栅入射角度 θ 可以近似为

$$\sin \theta = \frac{H}{R - R_G} \quad (6)$$

整理得到

$$d = \frac{m\lambda_{11}(R - R_G)}{(2H - \Delta H_1)} \quad (7)$$

当光栅的衍射级次 $m=1$, 反射镜 M 和凸面光栅 G 的半径如下: $R=2R_G=500$ mm, $\tan u=0.131$ 时, 根据 0.1 nm 光谱分辨率的要求则有, $\Delta H=44.2$ mm, $\Delta l_1=7.2$ mm, $\Delta l_2=10.8$ mm。狭缝离轴量 H 应在 $72.7 \sim 97.9$ mm 之间, 但狭缝过于靠近两个通道像点时, 会导致出射光线与光栅之间存在遮挡。因此, 要为狭缝与两个通道像点之间留出一定的高度间隔, 狭缝离轴量最终取 88 mm, 对应计算出的 d 为 456 nm。

3.2 望远系统设计

成像光谱仪两个通道的波段不一致, 要避免因为波段不一致带来的色差问题, 望远镜应该采用全反射结构, 同时还要考虑到望远镜小 F 数和大视场以及对成像质量的要求, 望远镜最终采用了离轴三反结构, 通过视场离轴的方式消除中心遮拦。为了便于后续为光谱仪添加消偏器, 且使消偏效果达到最佳, 孔径光阑放置在主镜前方。

优化时, 首先设定望远镜的焦距, 其次, 为了便于机械结构设计, 控制孔径光阑与次镜边缘轴向距离大于 5 mm, 同时使用 CODEV 自带的 @JMRCC 宏文件控制从三镜出射的光线与次镜下端同样留有 5 mm 的空隙。优化完成后, 望远镜 MTF 图如图 2(彩图见期刊电子版)所示, 望远镜点列图如图 3 所示。

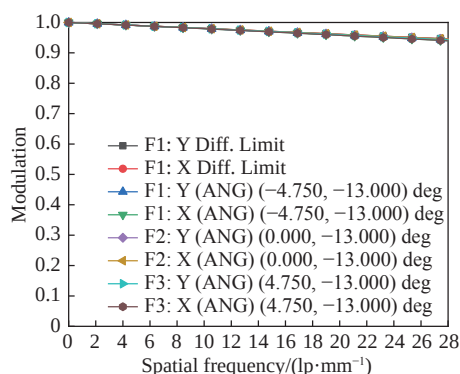


图2 望远镜 MTF 图

Fig. 2 MTF image of telescope system

由图 1 和图 2 可知, 望远镜 MTF 在奈奎斯特频率为 27.8 lp/mm 时, MTF 优于 0.9 ; 点列图结果在 3 个视场均小于 $7 \mu\text{m}$, 像质良好。

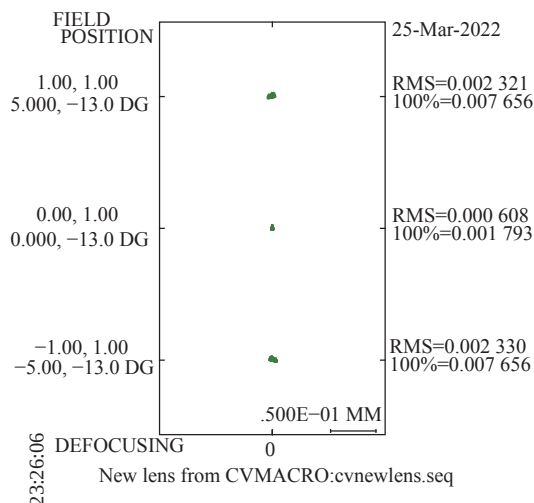


图3 望远镜点列图

Fig. 3 RMS image of telescope system

为缩小望远镜及光谱仪整体尺寸, 在优化好的望远镜三镜后放置折叠镜, 起到折叠光路、缩小望远镜横向尺寸的作用。最终得到望远镜的二维图、三维图如图 4 所示。

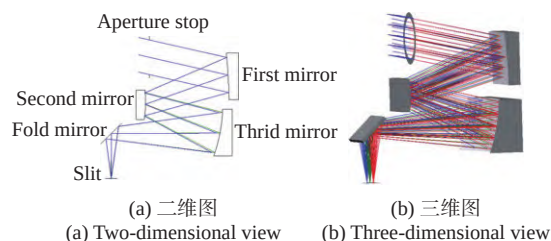


图4 望远镜结构图

Fig. 4 Structure diagram of the telescope

3.3 Offner 分光系统设计

为了匹配前置望远镜的 F 数和视场, Offner 分光系统的物方数值孔径应为 0.16 , 狭缝长度应为 40 mm。为了与探测器像元相匹配, Offner 分光系统应为 $1:1$ 成像, 狭缝宽度应为 $18 \mu\text{m}$ 。综合 Offner 分光系统长狭缝、大数值孔径和超光谱分辨率的要求, 且通道 1 和通道 2 的光束需共用一个凸面光栅, 采用改进型的 Offner 初始结构。

为了进一步改善像质, 在凸面光栅背面添加了弯月透镜。调整 Offner 分光系统的狭缝离轴量, 将凸面光栅的刻线密度设为变量, 限制刻线密度可变的范围, 同时限制通道 2 出射光线下边缘与光栅的上边缘间隔为 5 mm, 控制两个通道的出射光束与入射光束之间不发生相互遮挡, 对系统进行整体优化, 直至找到像质最佳的狭缝离轴量和光栅刻线密度的最优组合, 此时, 狭缝离轴量为 85.5 mm, 光栅周期为 450 nm。

最终实现了如图5所示的Offner分光系统,其中,通道1的色散长度达到了10.37 mm,通道2的色散长度达到了15.57 mm,双通道的光谱分辨率均达到了0.069 nm/pixel。

Offner分光系统通道1的MTF如图6所示,通道2的MTF如图7所示,通道1的点列图如图8所示,通道2的点列图如图9所示(各彩图见期刊电子版)。

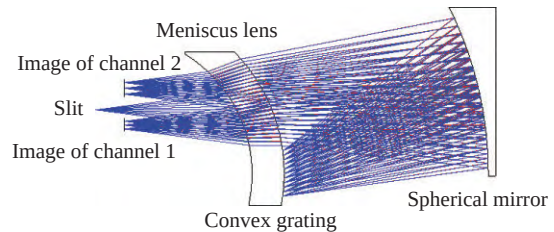


图5 Offner分光系统

Fig. 5 Offner spectroscopic system

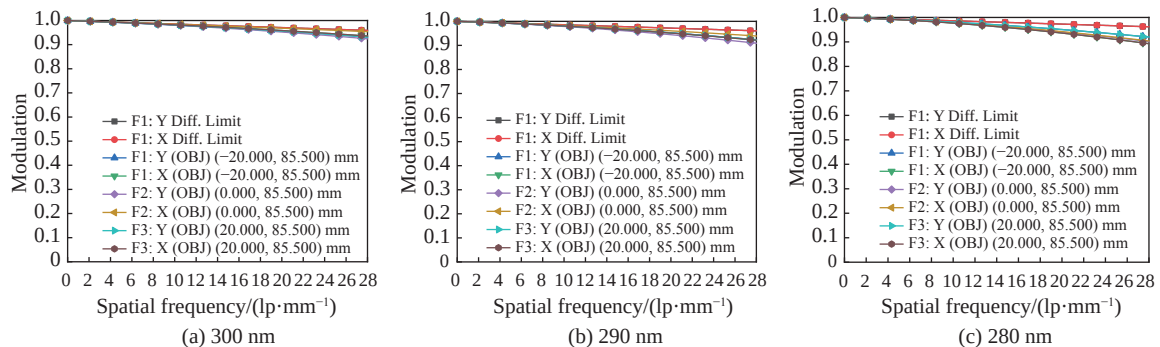


图6 通道1 MTF 曲线图

Fig. 6 MTF image of channel 1

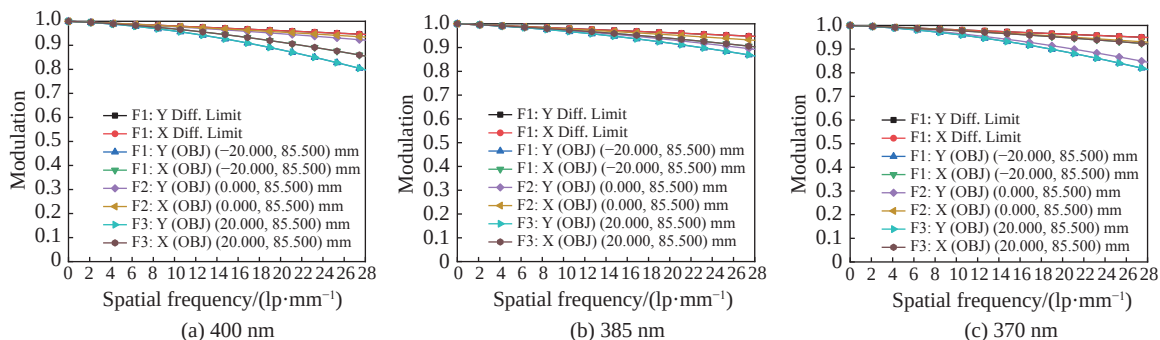
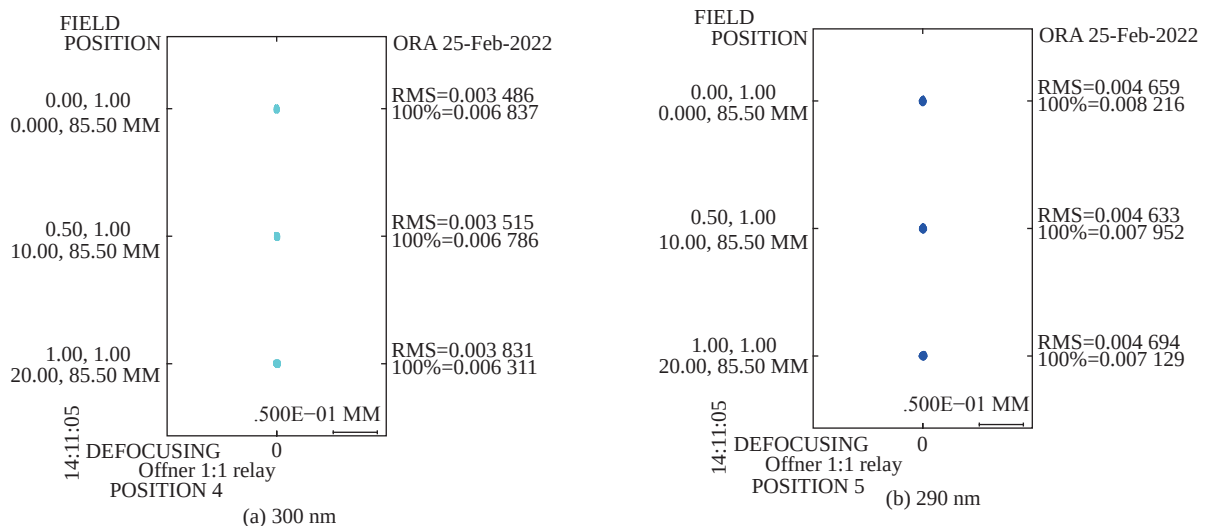


图7 通道2 MTF 曲线图

Fig. 7 MTF image of channel 2



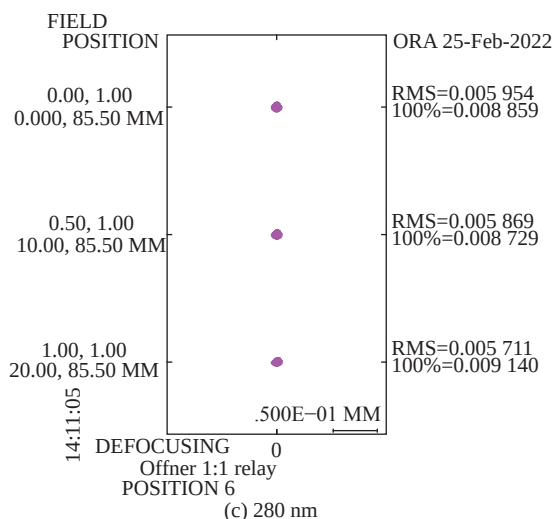
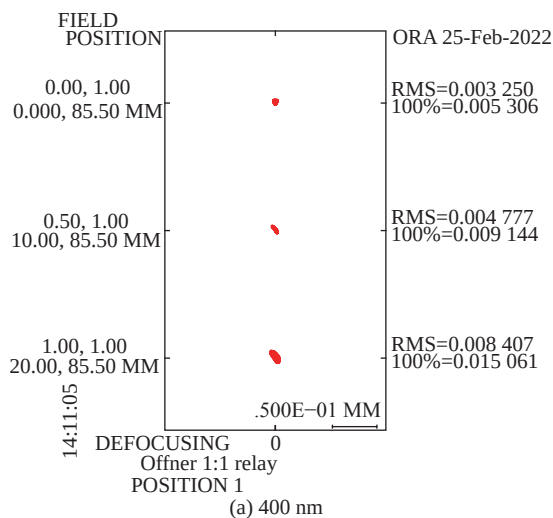


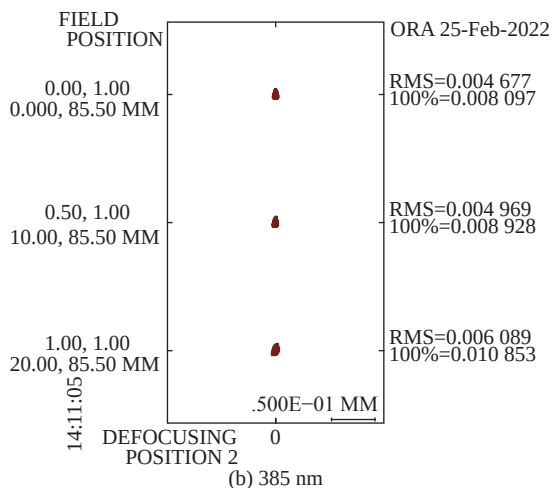
图 8 通道 1 点列图

Fig. 8 Spot diagram of channel 1

由图 6~图 9 可知, 两个通道的光束经 Offner 分光系统成像后, 在 27.8 lp/mm 奈奎斯特频率下, MTF 均优于 0.75, RMS 均优于 9 μm , 具有良好的成像质量。



(a) 400 nm



(b) 385 nm

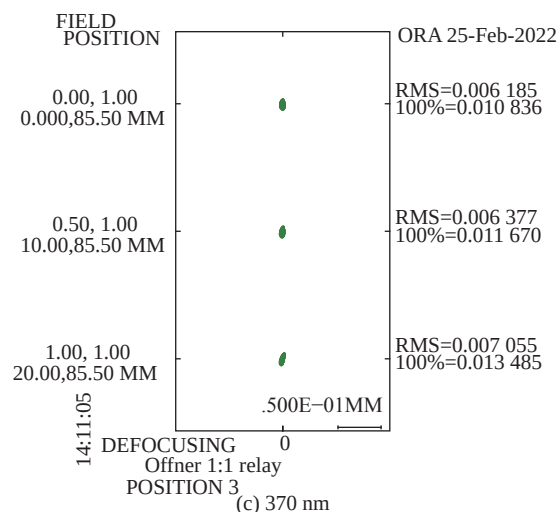
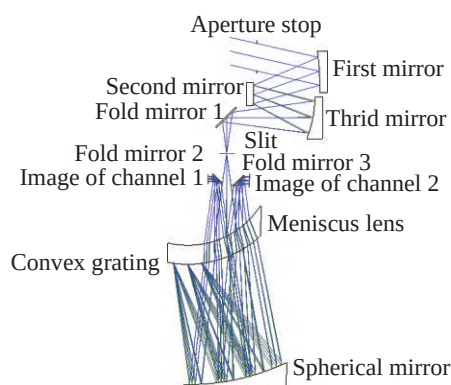


图 9 通道 2 点列图

Fig. 9 Spot diagram of channel 2

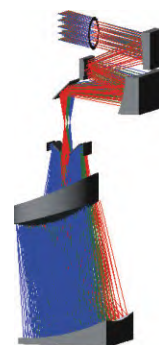
3.4 整体系统设计

将望远镜与 Offner 分光系统对接后, 为了便于探测器安装, 在两个通道的像面前分别加入两块折转镜, 将两个通道的像沿着相反的方向折转。最终得到了如图 10 所示的超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪。



(a) 二维图

(a) Two-dimensional view



(b) 三维图

(b) Three-dimensional view

图 10 本文成像光谱仪结构图

Fig. 10 Structure diagram of the proposed imaging spectrometer

成像光谱仪整体通道 1 的 MTF 如图 11 所示,通道 2 的 MTF 如图 12 所示,通道 1 的 RMS 图如图 13 所示,通道 2 的 RMS 图如图 14 所示(各彩图见期刊电子版)。

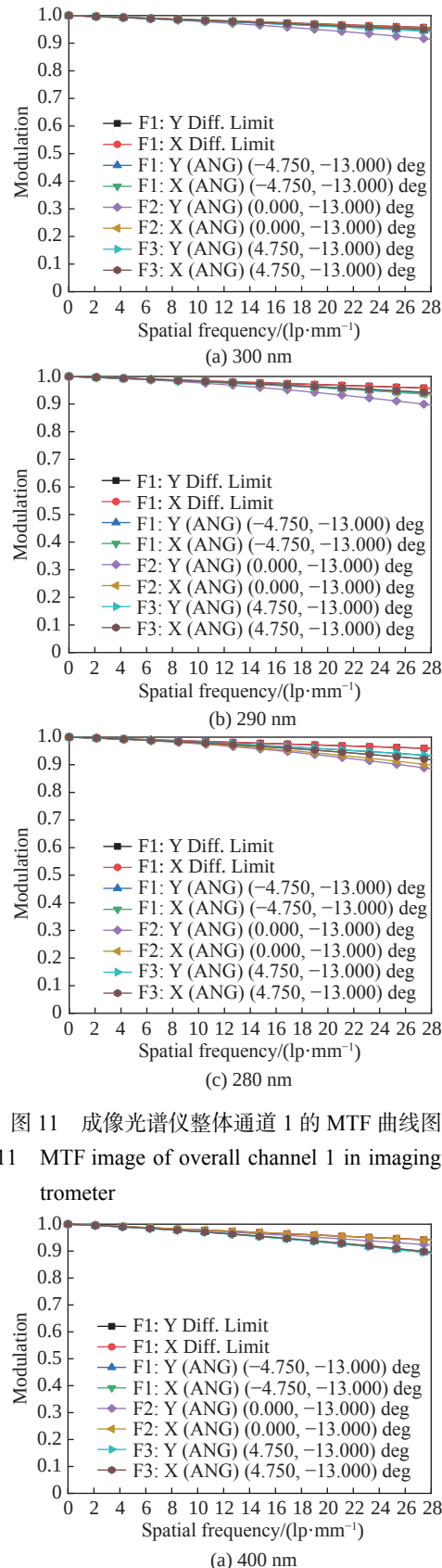


图 11 成像光谱仪整体通道 1 的 MTF 曲线图

Fig. 11 MTF image of overall channel 1 in imaging spectrometer

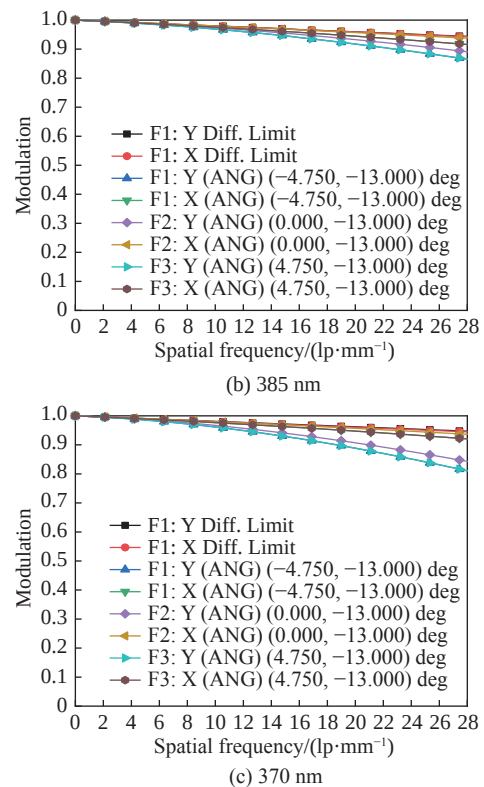
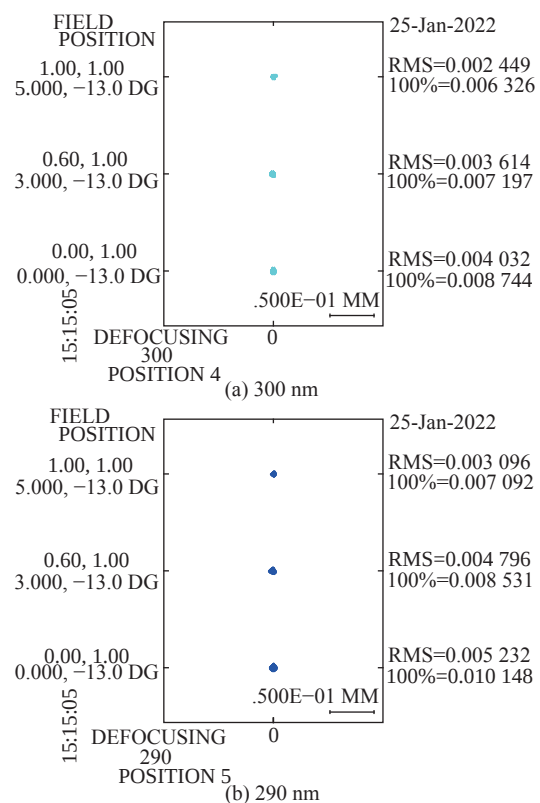


图 12 成像光谱仪整体通道 2 的 MTF 曲线图

Fig. 12 MTF image of overall channel 2 in imaging spectrometer



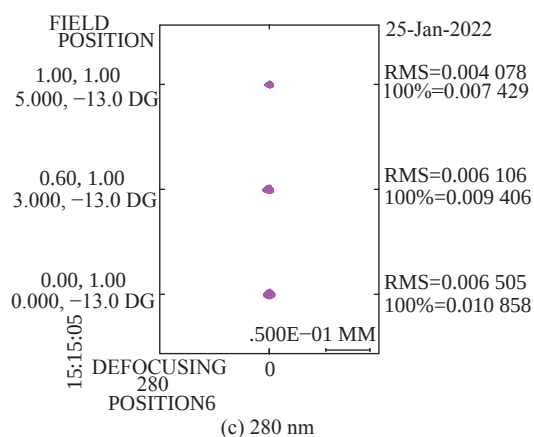


图 13 成像光谱仪整体通道 1 的点列图

Fig. 13 Spot diagram of overall channel 1 in imaging spectrometer

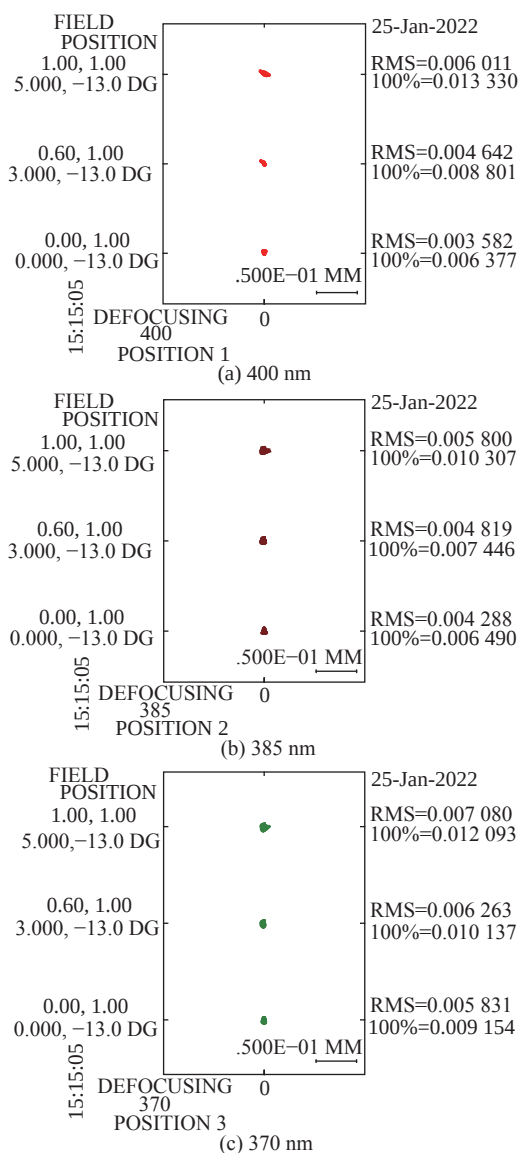


图 14 成像光谱仪整体通道 2 的点列图

Fig. 14 Spot diagram of overall channel 2 in imaging spectrometer

由图 11~图 14 可知,前置望远镜和后置光谱仪对接后的成像光谱仪,在奈奎斯特频率为 27.8 lp/mm 时,双通道的 MTF 均高于 0.8, RMS 均小于 9 μm , 满足成像质量要求。整体系统最终达到的设计指标参数如表 2 所示

表 2 系统最终的设计参数

Tab. 2 Final design parameters of the system

Parameter	Value
Spectral range /nm	280~300、370~400
F	3.8
Focal length of telescope f/mm	238
Field of view /($^{\circ}$)	9.5
GSD/m	45.37
Slit length/mm	40
diffraction order	1
grating period/nm	450
Spectral resolution /nm	0.069
MTF	>0.8@27.8 lp/mm
RMS/ μm	<9

4 结 论

Offner 结构的光谱仪虽然具有小 F 数、长狭缝的优点,但是在实际应用中,面对多光谱通道的探测需求时,一般需要多台光谱仪去完成,空间应用体积与重量较大。针对这个问题,本文设计了一种超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪,通过初始结构的选型、狭缝离轴量与光栅周期的计算,获得了改进型双通道 Offner 光谱仪的初始结构。该结构可在一台 Offner 光谱仪具有超光谱分辨率的同时还可对两个光谱通道进行探测,其相比于传统的 Offner 结构,具有小型化、轻量化的优点。调整 Offner 分光系统的狭缝离轴量与光栅周期,引入弯月透镜,对系统进行了逐步优化。最终成像光谱仪通道 1 光谱范围为 280~300 nm、通道 2 光谱范围为 370~400 nm,两个通道都具有优于 0.1 nm 超光谱分辨率,实现了 9.5 $^{\circ}$ 视场、F#3.8 的技术指标。两个通道的 MTF 均优于 0.8, RMS 均小于 9 μm , 满足应用需求,为 Offner 成像光谱仪提供了双通道一体化的设计方案。

参考文献:

- [1] REININGER F M, DAMI M, PAOLINETTI R, *et al.*. Visible infrared mapping spectrometer-visible channel (VIMS-V)[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2198: 239-250.
- [2] WELLMAN J B, DUVAL J, JUERGENS D, *et al.*. Visible and infrared mapping spectrometer (VIMS): a facility instrument for planetary missions[J]. *Proceedings of SPIE*, 1987, 0834: 213-221.
- [3] KÖHLER J, JANSEN R, IRIZAR J, *et al.*. Sentinel 5 instrument and UV1 spectrometer subsystem optical design and development[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11852: 118522M.
- [4] BONI A, TAITI A, BINI A, *et al.*. Sentinel-5 short-wave infrared spectrometer optical design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10690: 106901J.
- [5] LOVE S P, OTT L A, POST K W, *et al.*. NACHOS, a CubeSat-based high-resolution UV-Visible hyperspectral imager for remote sensing of trace gases: system overview and science objectives[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11832: 118320E.
- [6] 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. 高分五号卫星方案设计与技术特点[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 1-13.
SUN Y ZH, JIANG G W, LI Y D, *et al.*. GF-5 satellite system design and technological characteristics[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S2): 1-13. (in Chinese)
- [7] 刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制[J]. 遥感学报, 2020, 24(4): 333-344.
LIU Y N, SUN D X, HU X N, *et al.*. Development of visible and short-wave infrared hyperspectral imager onboard GF-5 satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(4): 333-344. (in Chinese)
- [8] 毕研盟, 王倩, 杨忠东, 等. 碳卫星高光谱二氧化碳探测仪基于太阳夫琅禾费吸收线的在轨波长定标[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 645-652.
BI Y M, WANG Q, YANG ZH D, *et al.*. TanSat ACGS on-orbit wavelength calibration using the solar Fraunhofer lines[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(3): 645-652. (in Chinese)
- [9] 王龙, 蔺超, 纪振华, 等. 碳卫星CO₂探测仪发射前的漫反射板定标[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1967-1976.
WANG L, LIN CH, JI ZH H, *et al.*. Preflight diffuser's calibration of carbon dioxide spectrometer of Tan Sat[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1967-1976. (in Chinese)
- [10] 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:



张璐(1997—),女,吉林长春人,硕士,2020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: 1499201809@qq.com



李博(1981—),男,吉林梨树人,博士,副研究员,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