

光学学报

AOTF 与中阶梯光栅结合的小型化超光谱分辨率成像光谱仪

张磊^{1,2}, 李博^{1*}, 顾国超¹, 王晓旭¹, 李寒霜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

摘要 对传统中阶梯光栅光谱仪级次重叠的问题进行分析,采用声光可谐调滤波器(AOTF)结合中阶梯光栅的方法实现光谱级次分离,研究并设计了小型、灵敏、超高光谱分辨率的光学系统结构。利用CODEV软件对成像光谱仪的初始结构进行优化,得到一种结合AOTF与中阶梯光栅的小型化超高光谱分辨率成像光谱仪。与交叉色散方案相比,中阶梯光栅与AOTF结合的技术将得到更高的信噪比,并弥补了中阶梯光栅体积大、质量重的缺陷,工作波段在2320~4250 nm时,系统 F 数小于1.8,并获得优于0.15 nm的超高光谱分辨率,在奈奎斯特频率为17 lp/mm条件下整体调制传递函数(MTF) >0.7 ,各视场全波段弥散斑均方根(RMS)半径 $<11\ \mu\text{m}$ 。该成像光谱仪提供了一种大气微量成分高精度、高灵敏度测量的方案,与其他的高分辨率红外光谱仪相比,其更容易安装在空间资源有限的行星或星际航天器上。

关键词 光学设计; 成像光谱仪; AOTF; 中阶梯光栅

中图分类号 TH744

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230614

1 引言

宇宙探测需要的光谱分辨率很高,中阶梯光栅光谱仪的高分辨率、宽波段探测等优点使其在天文学领域得到广泛的研究与应用。国外对中阶梯光栅光谱仪的研究已经相对成熟,1949年,Harrison^[1]首次研制出具有较大衍射角的中阶梯光栅,并设计出相应的中阶梯光栅光谱仪,然而由于其衍射级次高的特点,中阶梯光栅存在严重的级次重叠问题。国内对中阶梯光栅光谱仪的研究起步较晚,在1995年研制成功了2.16 m望远镜折轴阶梯分光仪,实现了330~1100 nm波长范围的光谱探测,该分光仪是我国研制的首台大型中阶梯光栅光谱仪器,配备于中国科学院国家天文台兴隆观测站^[2]。2013年,张尹馨等^[3]提出了透射棱镜-中阶梯光栅交叉色散光路的设计方法,光谱范围选择400~900 nm,理论光谱分辨能力达到了44000。总的来说,我国对中阶梯光栅光谱仪的研究目前仍然落后于国外,尤其是小型化、便携式和高分辨率的仪器有待开发及应用。

随着时间的推移,连续不断的太空任务使得对光谱仪器的性能要求越来越高^[4],小型化、宽光谱和高分辨率逐渐成为光谱仪器的发展趋势。20世纪90年代以后,中阶梯光栅光谱仪成为各个应用领域的研究热

点^[3],相比于传统平面或凹面光栅光谱仪获取谱图过程的复杂繁琐,中阶梯光栅具有色散长、分辨率高、波段范围宽等特点,弥补了普通光谱仪测量时间长的缺陷。中阶梯光栅的另外一个重要特性是全谱闪耀,当光线以Littrow准直方式入射到中阶梯光栅时,闪耀波长衍射效率达到最高,不同级次的闪耀波长仍然可以构成一个完整的工作光谱范围。由于中阶梯光栅具有特殊的光谱级次重叠现象,需要使用另一个色散元件进行级次分离,因此目前的中阶梯光栅光谱仪体积仍相对较大^[5]。

中阶梯光栅成像光谱仪与声光可谐调滤波器(AOTF)的结合极大提升了技术指标水平,尤其是光谱分辨率和空间分辨率等核心指标均有大幅提升。与一般中阶梯光栅光谱仪使用棱镜或低色散光栅的交叉色散解决方案相比,在同等体积和质量的情况下,与AOTF结合的新型成像光谱仪的光谱分辨率可以提高10倍左右,系统体积和质量也明显减小。针对变化愈发明显的大气环境,利用该新型成像光谱仪有望得到已知大气成分的密度分布图并探测到新的未知大气成分^[6]。

本文通过研究AOTF和中阶梯光栅光谱仪性能指标的关键设计参数,针对宽工作波段和高光谱分辨率等主要性能指标,提出一种结合AOTF和中阶梯光

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-03-31; 录用日期: 2023-04-17; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 地球绝对光谱辐亮度测量基准载荷工程技术(2022YFB3903202)

通信作者: *libo0008429@163.com

栅的小型化超高光谱分辨率成像光谱仪设计方案,最终设计的成像光谱仪系统由包括 AOTF 在内的望远系统和阶梯光栅作为分光元件的光谱仪两部分组成,优化后的成像光谱仪光谱分辨率优于 0.15 nm,可以实现高信噪比,同时体积和质量相比同类型成像光谱仪显著减小。

2 基本原理

2.1 AOTF 工作原理

声光器件由声光晶体、压电器和声吸收装置等组成。声光晶体是双折射单轴晶体,该成像光谱仪中采用 TeO₂ 作为晶体材料。压电器也称换能器,其作用是将电功率转换成声功率,使得在晶体介质中产生超声

波。通过控制换能器两端的电压来改变声光晶体中的超声波频率,超声波将在声光晶体中和入射光产生声光效应,其衍射波长和声波频率存在一一对应关系。在声光作用的同时,为防止声波逸出,透过晶体的声波将被晶体上端的声吸收装置吸收^[7]。

当入射光为自然光时,在声光效应下将出射两束正交的线偏振衍射光^[8]。由于晶体具有双折射特性,一般在声光晶体前结合线偏振片使自然光变成线偏振光,从而消除这两束偏振光的相互影响,未发生衍射的零级光将被挡板吸收^[9]。AOTF 的工作原理如图 1 所示,其中 N 为光栅矢量, l 为换能器长度, F 为入射平面的法向量, Φ 为光栅矢量倾斜角, Λ 为光栅周期。

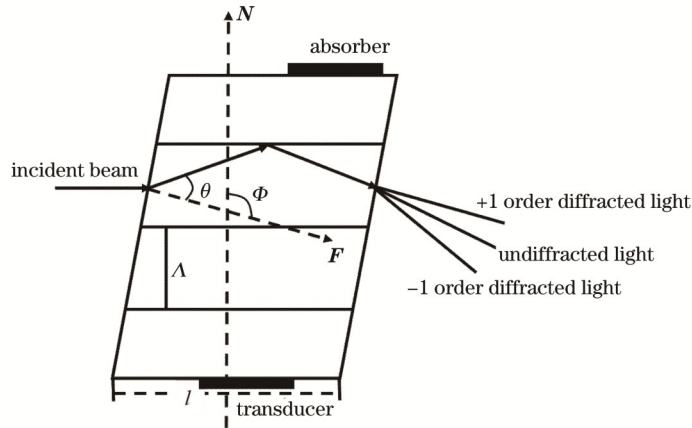


图 1 AOTF 工作原理
Fig. 1 Schematic of AOTF

可谐调滤波光谱实际上是声光偏转的一个应用,此时布拉格衍射条件为

$$\frac{2\pi}{\lambda} (n_2 \sin \theta_2 - n_1 \sin \theta_1) = \pm \frac{2\pi}{v_s} f_s, \quad (1)$$

式中: n_1, n_2 为入射波与衍射波对应的折射率; θ_1 和 θ_2 为对应的入射角和衍射角; v_s 和 f_s 为声速和声频。从式(1)可以看出,经 AOTF 衍射产生的光波长和声频存在非线性谐调关系,只需要改变驱动电信号的频率,衍射光的输出波长将随之改变,从而构成声光谱调滤波器,达到分光的目的^[10]。

2.2 中阶梯光栅工作原理

一束平行复色光照射到中阶梯光栅的工作刻槽面上,图 2 所示为中阶梯光栅主截面示意图,其中 d 为光栅周期, θ_B 为中阶梯光栅闪耀角, N_1 为光栅的法向量,坐标轴 Z 为工作刻槽面的法线, α 为光线入射角, β 为经过中阶梯光栅后的衍射角, θ 为入射光线与工作刻槽面法线 Z 的夹角。与普通的平面衍射光栅相比,中阶梯光栅的工作级次一般在几十级到上百级,衍射角一般大于 30°^[11], 因其特殊的双色散结构在各种光谱分析领域得到广泛应用。

光栅方程可表示为

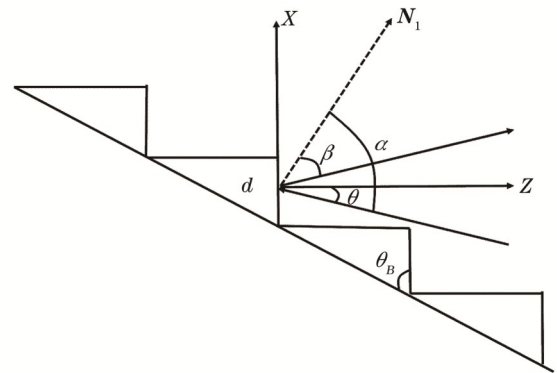


图 2 中阶梯光栅主界面示意图
Fig. 2 Main interface of echelle grating

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta), \quad (2)$$

式中: m 为衍射光栅级次, λ 为中心波长。在准 Littrow 条件 ($\alpha = \beta = \theta_B$) 下,光栅方程可化简为

$$m\lambda = 2d \sin \theta_B. \quad (3)$$

对光栅方程进行微分,得到光栅的角色散率表达式

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{2d \cos \theta_B}. \quad (4)$$

光栅的线色散率表达式为

$$\frac{d\lambda}{d\beta} = f \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{mf}{2d \cos \theta_B}, \quad (5)$$

分辨率表达式为

$$R = mN' = \frac{2W \sin \theta_B}{\lambda}, \quad (6)$$

式中: N' 为光栅刻线总数; W 为光栅有效刻线宽度; f 为系统焦距。

在光栅槽间距确定后, 成像在像面的波长 λ_c 和对应的光栅级次可由式(7)计算:

$$\lambda_c \times m = 2 \times d \times \sin \theta_B \times \cos \beta \times \cos \alpha. \quad (7)$$

根据上述计算公式, 并对理想 Littrow 条件的微小偏差进行校正, 本实验使用槽间距为 0.18 mm 的粗中阶梯光栅, 光栅级次选择 50~100。

从式(4)~(6)可以看出, 中阶梯光栅可以使复色光衍射得到的每级光谱都具有较大的角色散以及较高的分辨率, 但是其自由光谱范围小, 光谱级次严重重叠, 因此常需要配合二次色散元件进行交叉使用^[12]。为了实现对大气微弱成分的灵敏测量, 所设计的成像光谱仪中并没有选择使用二次色散元件, 而是在狭缝前的望远系统中使用体积更小、质量更轻的 AOTF 来避免级次重叠。此外, 通过改变 AOTF 两端的输入电信号可以达到入瞳的全遮挡效果, 进而将背景热辐射从观测到的信息中剔除, 实现对感兴趣区域的重点监测^[13], 因此十分适用于深空探测中对微弱成分的测量。

3 成像光谱仪光学系统设计

3.1 成像光谱仪系统的整体参数

AOTF 结合中阶梯光栅的小型化超高光谱分辨率成像光谱仪的主要技术指标如表 1 所示。该成像光谱仪搭载在卫星上对深空大气成分进行探测, 且需要高灵敏度和高分辨率, 在 2320~4250 nm 工作波段内, 除了记录 CO₂ 的吸收曲线, 还可以测量其他小分子化合物、硫酸化合物、酸性蒸气以及与大气吸收特征相关的 CH₄、NO、N₂O 等微量成分, 并且可以探测到未知的大气成分。本实验选用法国 Sofradir 碲镉汞探测器, 像元尺寸为 30 μm, 分辨率为 320×256, 填充系数大于 90%, 在光谱维方向采用 2 个像元合并来提高分辨率。

3.2 望远系统设计

望远系统由缩束部分、AOTF 和成像部分组成,

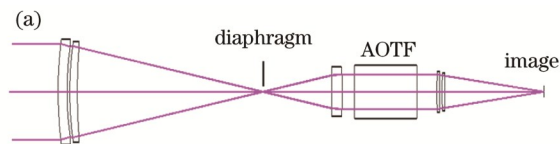


表 1 成像光谱仪的主要技术指标

Table 1 Main technical indices of designed spectrometer

| Parameter | Value |
|--|------------------|
| Height /km | 400 |
| Wavelength range /nm | 2320-4250 |
| Spectral resolution /nm | ≤0.15 |
| Ground resolution /m | 100 |
| Entrance pupil /mm | 20 |
| Field / (°) | 1.1 |
| F | <1.8 |
| MTF | >0.7 (@18 lp/mm) |
| RMS radius /μm | <11 |
| Nyquist frequency / (lp·mm ⁻¹) | 17 |

受到有限空间和 AOTF 接收孔径的限制, 折射式光学系统的设计方案优于反射式系统。在物镜的焦平面上放置一个矩形膜片以减小入口光学视场, 使其略大于所需的整体视场, 避免在光谱仪狭缝上对整个太阳成像, 并抑制光散射和其余光学部分的鬼像; 矩形膜片也可以作为一个散热器, 用来阻止一大部分太阳光的输入, 本实验选用美国 Brimrose 公司的 AOTF 器件, 具体参数如表 2 所示。

表 2 AOTF 具体参数

Table 2 Parameters of the AOTF

| Parameter | Value |
|--------------------------------|------------------|
| Wavelength range /nm | 2200-4400 |
| Optical aperture / (mm×mm) | 10×10 |
| Spectral resolution /nm | 6-23 |
| Peak diffraction efficiency /% | >40 |
| RF power /W | ~5.0 |
| Material | TeO ₂ |

望远系统中透镜的材料选择 Si、Ge、ZnSe 3 种材料的组合, 全部使用球面, 其中 Ge 透镜元件还吸收小于 1.8 μm 的波长, 在 AOTF 之前阻挡太阳光谱的紫外和可见光部分。光线在进入 AOTF 前是由缩束部分准直的良好平行光束, 为提高晶体的衍射效率, 准直光束直径严格控制 8 mm 以内, 采用同样厚度的 TeO₂ 玻璃平板代替晶体, 经过 AOTF 出射的窄带宽波段成像在像面, 优化后得到的缩束成像望远系统结构如图 3 所示, 成像质量良好。

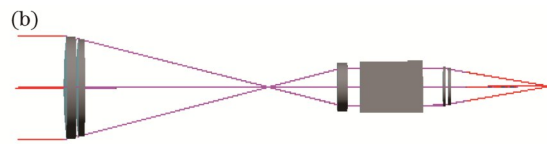


图 3 缩束成像望远系统结构图。(a) 二维图像; (b) 三维图像

Fig. 3 Structure of the telescopic imaging system. (a) Two-dimensional view; (b) three-dimensional view

因波长跨度过大,实际的望远系统对于长短波情况的衍射极限有一定差异,但 MTF 在奈奎斯特频率为 17 lp/mm 时均大于 0.4 并接近衍射极限。望远系统各波段的 MTF 曲线如图 4 所示。

望远系统点列图如图 5 所示,可以看到,望远系统的最大均方根(RMS)半径小于 13 μm ,能够呈现出良好的像质,可视为成像优良、出射光束优质,为光谱仪部分的入射光质量提供了保障。

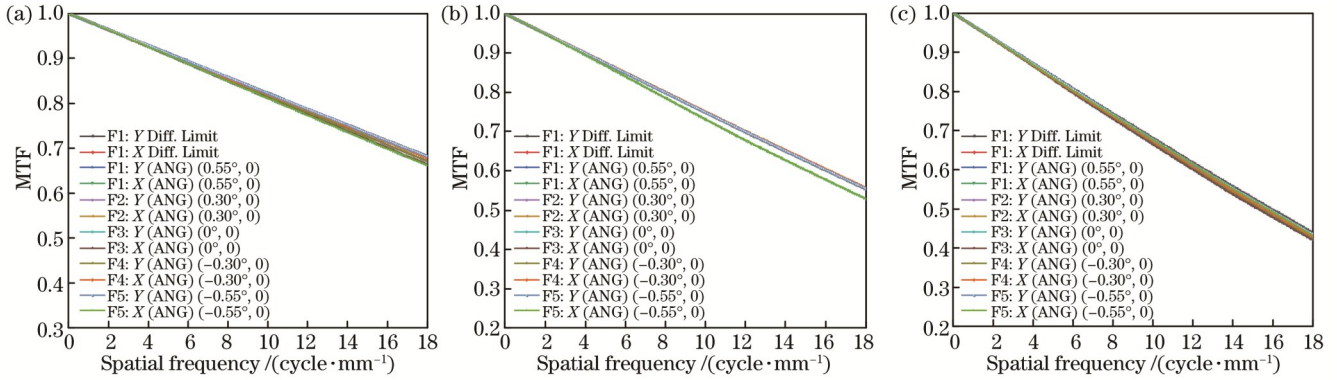


图 4 望远系统各波段的 MTF 曲线。(a)2320 nm;(b)3285 nm;(c)4250 nm
Fig. 4 MTF curves of telescopic system of each band. (a) 2320 nm; (b) 3285 nm; (c) 4250 nm

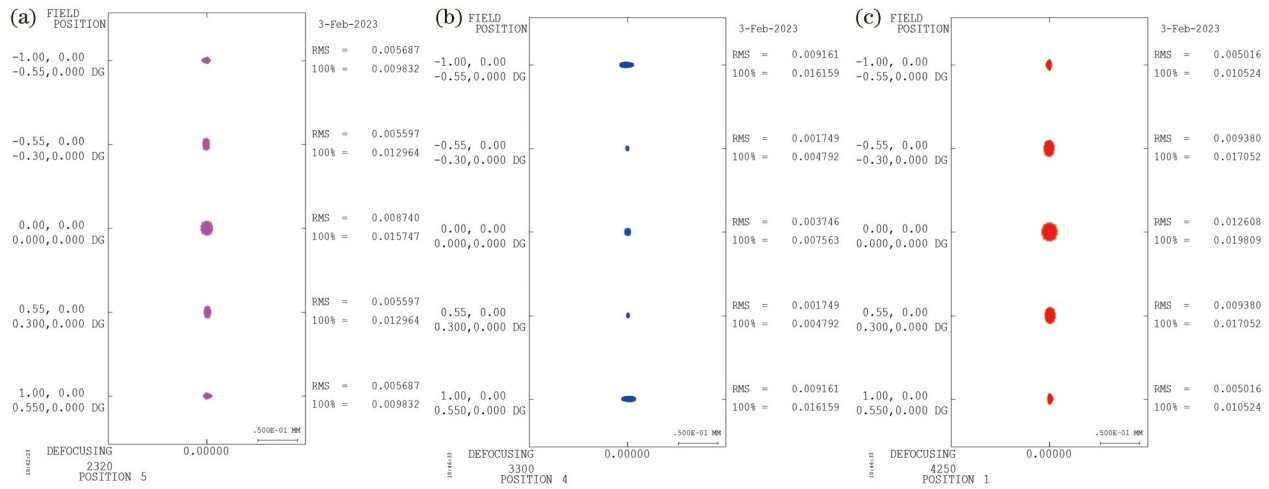


图 5 望远系统各波段的 RMS 点列图。(a)2320 nm;(b)3285 nm;(c)4250 nm
Fig. 5 RMS point diagrams of telescopic system of each band. (a) 2320 nm; (b) 3285 nm; (c) 4250 nm

3.3 光谱仪系统设计

在设置狭缝长度为 1 mm 的基础上,将中阶梯光栅槽间距设置为 0.18 mm,设置光阑在中阶梯光栅表面,为了获得高分辨率光谱仪部分的紧凑光学方案,选择基于非球面的光学系统设计可以增加系统的自由度,因此将准直透镜和成像透镜的功能合并到一个非球面反射镜中,不再需要两个单独的镜头进行协调。

为了减小光谱仪模块的体积,在成像镜组前放置一块平面反射镜,并控制光路之间无遮挡,反射后的衍射光通过成像镜组最终成像在像面^[14],通过调整系统各镜组之间的距离和偏心率,优化后系统的三维结构如图 6 所示,其非球面反射镜的各阶系数、偏心率及倾斜角度如表 3 所示。

在设计光谱仪过程中,将各镜的曲率半径、镜间距以及非球面系数作为优化变量,并采用 CODEV 中的 JMRCC 宏模块来避免各镜之间的光线遮挡,从图 6 可

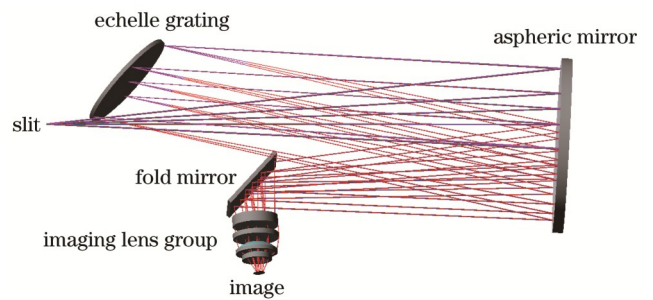


图 6 中阶梯光栅光谱仪结构
Fig. 6 Structure of echelle spectrograph

看出,光路之间无遮挡,成像完整。

从中阶梯光栅出射的衍射光,重新入射到非球面反射镜,最后经过后置成像镜组成像。后置成像镜组不仅可以校正自身的像差,还可以和非球面结合来充分校正前置系统的残留像差^[15]。成像镜组中的 4 片透

表 3 非球面反射镜曲面参数

Table 3 Surface parameters of aspheric mirror

| Parameter | Value |
|-----------------------|-------------------------|
| X decentration /mm | 6.62 |
| Y decentration /mm | -27.23 |
| Tilt /($^{\circ}$) | -5.17 |
| 2nd order coefficient | -1.03 |
| 4th order coefficient | 3.061×10^{-10} |
| 6th order coefficient | 3.96×10^{-14} |

表 4 中阶梯光栅阶数

Table 4 Number of orders of echelle grating

| Wavelength range /nm | Number of orders |
|----------------------|------------------|
| 2320-2700 | 91 |
| 2701-3000 | 81 |
| 3001-3250 | 71 |
| 3251-3550 | 65 |
| 3551-3750 | 60 |
| 3751-4000 | 55 |
| 4001-4250 | 51 |

镜通过 Si、ZnSe 以及 Ge 3 种材料组合进行色散线性校正,配合一块二次曲面综合控制像差,使得在满足系统性能指标要求及像质的条件下,减轻系统质量的同时能够兼顾谱线弯曲的校正。中阶梯光栅阶数选择如表 4 所示,优化后的光谱仪 MTF 曲线如图 7 所示。

从图 7 可看出,在全波段全视场内,奈奎斯特频率为 17 lp/mm 时的 MTF 均大于 0.7,接近衍射极限,且在 3285 nm 中心波长处 MTF 曲线与衍射极限重合。对于整体系统而言,该 MTF 达到了成像质量要求。中阶梯光栅光谱仪系统优化后的 RMS 点列图如图 8 所示。

从图 8 可看到,优化后的中阶梯光栅光谱仪在各视场不同波段范围内的弥散斑 RMS 半径小于 11 μm ,与系统艾里斑的尺寸接近,说明所设计的中阶梯光栅光谱仪各像差均得到较好的校正,可以满足整体系统的要求。

3.4 整体系统设计

将优化设计的望远系统及中阶梯光栅光谱仪两部分系统进行拼接,在望远系统像面位置放置狭缝并将光谱仪物点设置在该处,最终得到的整体结构见图 9,整体结构的体积限制在 590 mm \times 175 mm \times

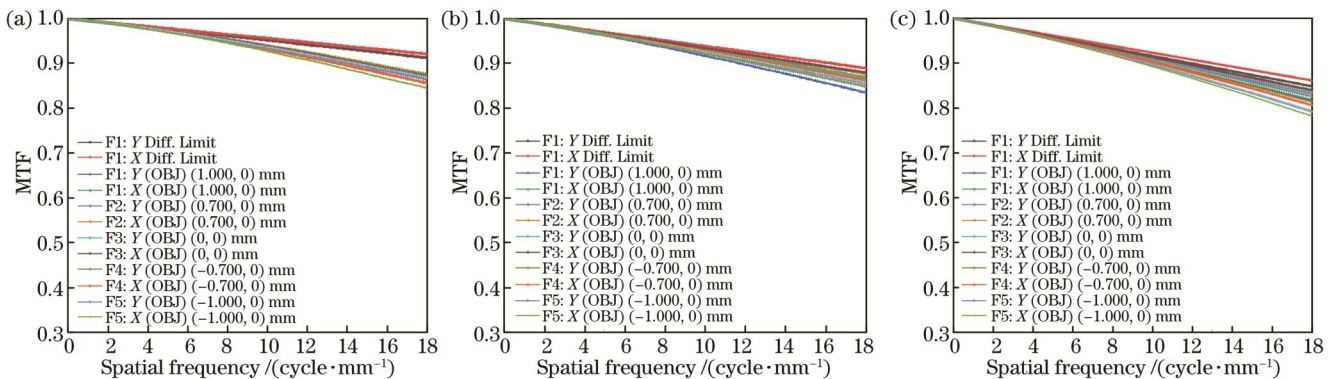


图 7 中阶梯光栅光谱仪各波段的 MTF 曲线。(a)2320 nm;(b)3285 nm;(c)4250 nm

Fig. 7 MTF curves of echelle spectrograph of each band. (a) 2320 nm; (b) 3285 nm; (c) 4250 nm

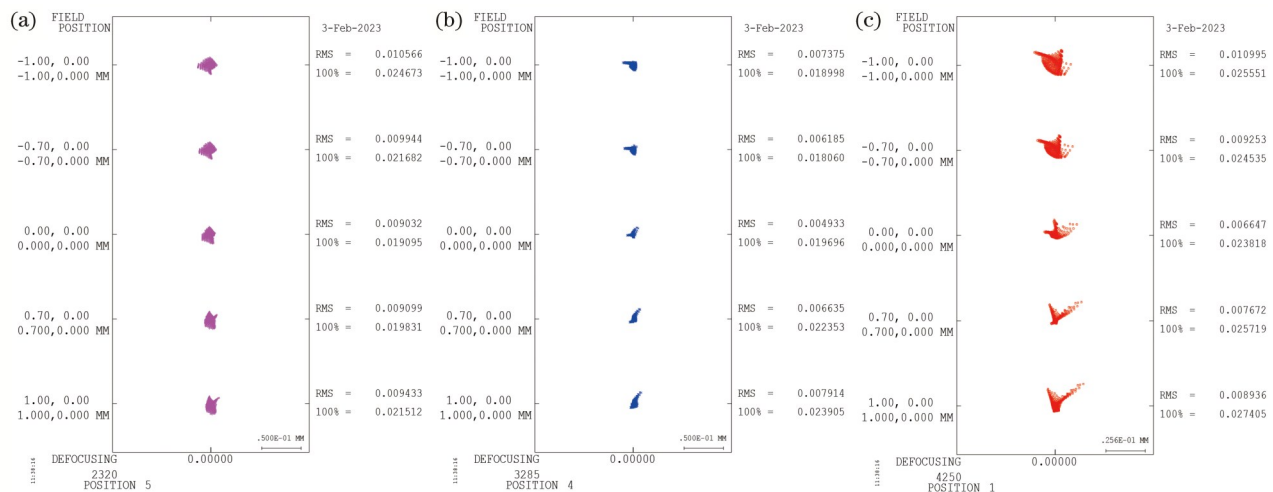


图 8 中阶梯光栅光谱仪各波段的 RMS 点列图。(a)2320 nm;(b)3285 nm;(c)4250 nm

Fig. 8 RMS point diagrams of echelle spectrograph of each band. (a) 2320 nm; (b) 3285 nm; (c) 4250 nm

140 mm 内,利用 MTF 曲线和 RMS 点列图对系统的设计结果进行分析评价,结果如图 10 和图 11 所示。

组合后整体结构的 MTF 曲线如图 10 所示,可看

出在全波段全视场条件下 MTF > 0.75,符合 MTF 的传递规律。各视场在各波段的 MTF 均接近于衍射极限,各像差均得到较好的校正,满足成像需求。

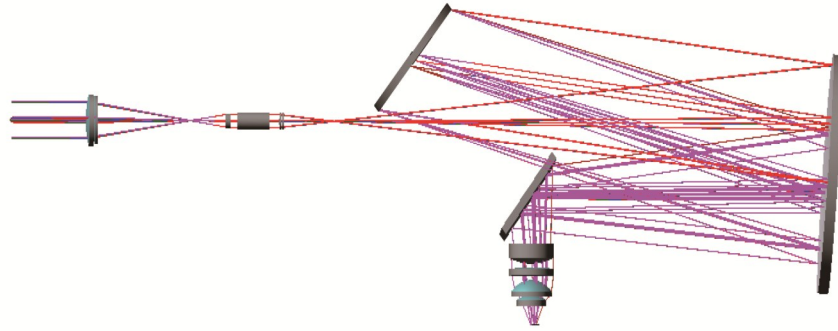


图 9 成像光谱仪整体结构

Fig. 9 Overall structure of imaging spectrometer

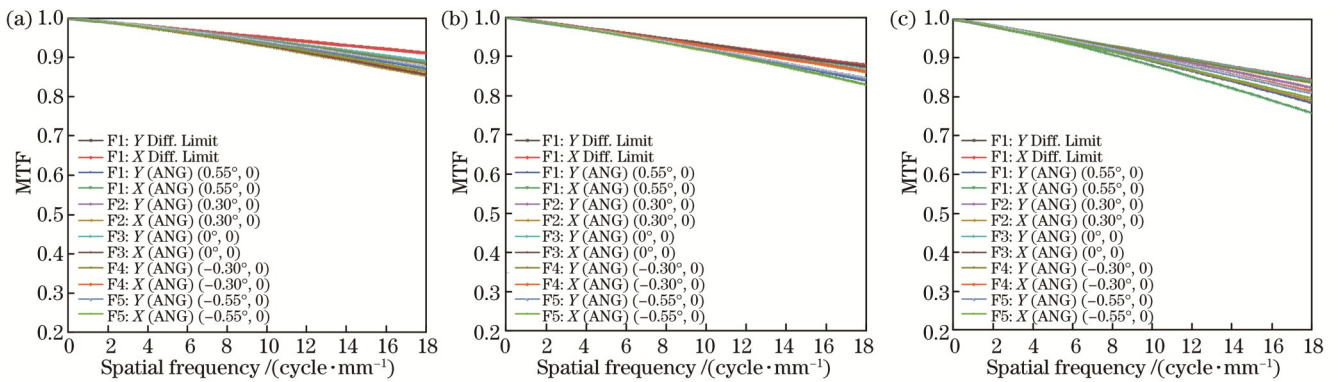


图 10 整体结构各波段 MTF 曲线图。(a)2320 nm; (b)3285 nm; (c)4250 nm

Fig. 10 MTF curves of overall structure of each band. (a) 2320 nm; (b) 3285 nm; (c) 4250 nm

整体系统的 RMS 点列图如图 11 所示。可以看到,整体结构在全波段全视场条件下 RMS 半径 < 12 μm,小于探测器像元尺寸的一半,说明所设计的 AOTF 结合中阶梯光栅的小型化成像光谱仪光学系统获得较好的成像质量。

4 结 论

介绍了一种结合中阶梯光栅光谱仪和 AOTF 的紧凑型超高光谱分辨率成像光谱仪,并将其用于红外范围内行星大气的星载研究。这种设计允许在 4~

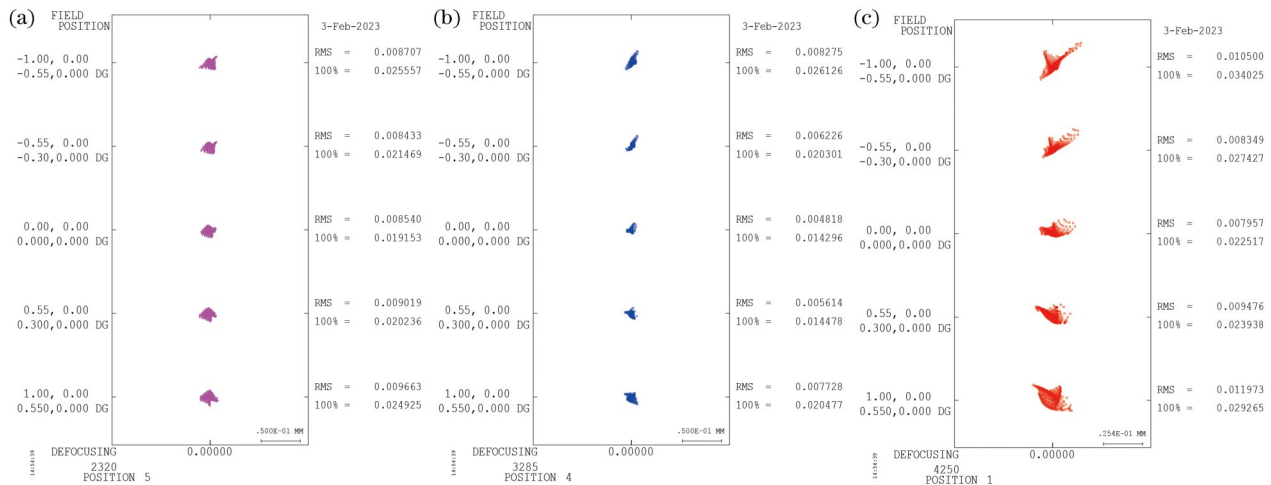


图 11 整体系统各波段的 RMS 点列图。(a)2320 nm; (b)3285 nm; (c)4250 nm

Fig. 11 RMS point diagrams of overall structure of each band. (a) 2320 nm; (b) 3285 nm; (c) 4250 nm

5 kg 的质量预算内实现超高分辨能力, 并且没有移动部件。由于 AOTF 具有极好的灵活性, 可以通过改变电信号将其调谐到不同的工作波长, 因此可以在光谱范围的任意位置精确测量各种光谱。本实验在 2320~4250 nm 工作波段范围获得良好的线性特征, 像质图像表明: 在奈奎斯特频率为 17 lp/mm 的条件下 MTF > 0.75, 且 RMS 半径 < 11 μm 。可见, 所设计的成像光谱仪能满足设计要求, 可以更灵敏地测量大气中的微弱成分, 适用于深空探测。

参 考 文 献

- [1] Harrison G R. The production of diffraction gratings II : the design of echelle gratings and Spectrographs[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1949, 39(7): 522-528.
- [2] 杨增鹏, 李政言, 浦恩昌, 等. 基于离轴三反光学系统的高分辨率中阶梯光栅光谱仪[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2212001. Yang Z P, Li Z Y, Pu E C, et al. High-resolution echelle grating spectrometer based on off-axis three-mirror reflective optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2212001.
- [3] 张尹馨, 杨怀栋, 邓超, 等. 高分辨率中阶梯光栅-棱镜交叉色散光路设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1706-1710. Zhang Y X, Yang H D, Deng C, et al. Optical design of high-resolution echelle-prism cross-dispersion[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1706-1710.
- [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] 马成, 李金亮, 陈笑, 等. 基于中阶梯光栅的高分辨率可调谐光纤激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1014001. Ma C, Li J L, Chen X, et al. High-resolution tunable fiber laser based on echelle grating[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1014001.
- [6] Ye X, Yi X L, Lin C, et al. Instrument development: Chinese radiometric benchmark of reflected solar band based on space cryogenic absolute radiometer[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2856.
- [7] 吴长坤, 张为, 郝亚喆. 可见/近红外实时成像光谱仪控制系统设计[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 348-354. Wu C K, Zhang W, Hao Y Z. Design of a control system for a visible/near-infrared real-time imaging spectrometer[J]. Chinese Optics, 2022, 15(2): 348-354.
- [8] Gorevoy A, Machikhin A, Martynov G, et al. Spatiospectral transformation of noncollimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals[J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 687-693.
- [9] 徐泽夫, 赵慧洁, 贾国瑞. AOTF 后楔角对光谱图像像质的影响[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 20210590. Xu Z F, Zhao H J, Jia G R. Influence of the AOTF rear cut angle on spectral image quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 20210590.
- [10] 常凌颖, 张强, 邱跃洪. 宽波段一体化 AOTF 成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0722002. Chang L Y, Zhang Q, Qiu Y H. Design of optical system for broadband and integrated AOTF imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0722002.
- [11] 姜闻宇. 基于 DMD 的中阶梯光栅光谱仪光谱信号处理方法及软件[D]. 长春: 吉林大学, 2022. Jiang W Y. Spectral signal processing method and software of stepped grating spectrometer based on DMD[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [12] 沈春洋, 崔继承, 孙慈, 等. 中阶梯光栅衍射效率及杂散光检测系统设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(8): 2603-2609. Shen C Y, Cui J C, Sun C, et al. A detection system design of echelle diffraction efficiency and stray coefficient[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(8): 2603-2609.
- [13] 冷柏锐, 陈沐谷, 蔡定平. 超构器件的设计、制造与成像应用[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822001. Leng B R, Chen M K, Tsai D P. Design, fabrication, and imaging of meta-devices[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822001.
- [14] 吴琼水, 陈奋飞, 刘佳, 等. 基于 AOTF 的月面巡视成像光谱仪[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会论文集. 北京: 中国宇航学会, 2010: 666-671. Wu Q S, Chen F F, Liu J, et al. AOTF-based imaging spectrometer for moon rover[C]//Proceedings of the 7th Annual Academic Meeting of the Deep Space Exploration Technology Professional Committee of the Chinese Aerospace Society. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2010: 666-671.
- [15] 李永帅, 王志斌, 陈友华, 等. 大视场声光可调谐滤波器成像光谱仪光学设计[J]. 应用光学, 2015, 36(1): 41-45. Li Y S, Wang Z B, Chen Y H, et al. Optical design of large FOV imaging system for AOTF imaging spectrometer[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(1): 41-45.

Miniaturized Hyperspectral Resolution Imaging Spectrometer of AOTF and Echelle Grating Combination

Zhang Lei^{1,2}, Li Bo^{1*}, Gu Guochao¹, Wang Xiaoxu¹, Li Hanshuang¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

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

Abstract

Objective A variety of infrared spectrometers have been designed in China and abroad to achieve sensitive and high-resolution measurement of the absorption spectrum of trace components in the atmosphere, but the spectral resolution is relatively low, which seriously hinders the detection of tiny species in the atmosphere. Because of its special dual dispersion structure, the echelle grating can realize both wide-band and high-resolution spectral measurement. However,

the spectrum order overlap of the echelle grating is serious and should be combined with secondary dispersion elements to eliminate the order overlap. As a result, the optical system structure is complicated, with large weight and too high processing cost. Therefore, it is necessary to improve the optical system structure to make the spectrometer easier to employ on the spacecraft and ensure imaging quality.

Methods We improve the traditional echelle grating spectrometer system, and study and design a small, sensitive, and ultra-high spectral resolution optical system structure. The structure adopts an acousto-optic tunable filter (AOTF) combined with echelle grating to achieve spectral order separation. AOTF is made according to the acousto-optic diffraction principle of birefringent crystal. Compared with the prism or grating in the traditional spectral analysis system, AOTF features small volume, light weight, arbitrary wavelength selection, and high diffraction efficiency. Due to the aperture limitation of AOTF, the beam enters AOTF after being collimated by the beam reduction system, and the spectral information of each spectrum segment is obtained in the image plane after the beam is spliced through the echelle grating. Finally, the optimized telescopic system and the spectrometer are interfaced to obtain the overall optical structure of the hyperspectral resolution imaging spectrometer, and the slit overlaps with the image plane of the telescopic system. According to the grating equation, different diffraction levels need to be adopted to make the corresponding wavelength of each spectrum segment shine. By optimizing the grooving spacing of the echelle grating, the grating order using 50 to 100 orders in the working band can be obtained. The combination of echelle grating and AOTF technology will produce imaging of longer spectral lines on the detector, resulting in a higher signal-to-noise ratio.

Results and Discussions By utilizing optical design software to optimize the initial structure of the imaging spectrometer, we obtain a miniaturized ultra-high spectral resolution imaging spectrometer based on the combination of AOTF and echelle grating. The wavelength of the output light is quickly and randomly changed by changing the RF signal. The technical index of the optical system is greatly improved compared with that of the ordinary echelle grating spectrometer. Finally, this solves the overlapping problem of the echelle grating and makes up for the defects of the large volume and heavy mass of the echelle grating spectrometer. The imaging quality of the optical system is sound when the operating band of the optical system is 2320–4250 nm, with the F of the system less than 1.8 and the ultra-high spectral resolution better than 0.15 nm. At a Nyquist frequency of 171 p/mm, the overall modulation transfer function (MTF) is greater than 0.7 (Fig. 10), and the root mean square (RMS) radius of the diffuse spot in all fields of view is less than 11 μm (Fig. 11).

Conclusions The imaging spectrometer adopts the scheme of combining AOTF with echelle grating, solving the overlapping problem of echelle grating and greatly improving the spectral resolution of the optical system. Meanwhile, it can achieve high-precision and high-sensitivity measurement of atmospheric trace components and has smaller volume and higher signal-to-noise ratio compared to other high-resolution infrared spectrometers, making it easier to be installed on planets or interstellar spacecraft with limited space resources. Additionally, the spectral resolution is greatly improved to help obtain more refined spectral signals.

Key words optical design; imaging spectrometer; AOTF; echelle grating