

## 轻小型短波红外自准直高光谱成像仪设计

刘洋<sup>1,2</sup>, 李博<sup>1\*</sup>, 顾国超<sup>1</sup>, 李寒霜<sup>1</sup>, 王晓旭<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 随着搭载平台技术的不断进步,对成像光谱系统的尺寸提出了更高的要求,轻量化、小型化成为成像光谱仪的重要发展方向。针对上述问题,本文设计了一种具有轻小型化特点的自准直型短波红外高光谱成像系统。通过对系统矢量形式的理论推导,得到满足高光谱分辨率、小尺寸要求的自准直系统的初始结构,并逐步进行优化。同时,在狭缝处引入一块平面反射镜,对望远系统进行折叠,避免狭缝与探测器干涉,并进一步压缩系统的尺寸。最终设计的成像光谱仪工作波段为1610~1640 nm, F数优于3,在奈奎斯特频率为20 lp/mm时,调制传递函数(MTF)均优于0.8,全视场均方根半径(RMS)均小于7 μm,光谱分辨率均优于0.1 nm。光学系统尺寸优于460 mm×150 mm×150 mm。本文研究为短波红外波段高光谱探测成像光谱仪实现轻量化、小型化设计提供了一定的理论基础。

**关键词** 光学设计; 成像光谱仪; 自准直; 轻小型

**中图分类号** TH744

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231623

## 1 引言

成像光谱技术是目前应用非常广泛的技术<sup>[1-4]</sup>,可以同时获得光谱和空间两个维度的信息,是近年来光学遥感领域的重要手段之一。随着搭载平台逐渐向着轻小型化发展,对成像光谱仪也提出了新的指标需求,使轻小型化和高光谱分辨率成为其重要的发展方向。

加拿大GHGSat公司于2016年发射了微型点源监测卫星GHGSat-D<sup>[5]</sup>。仪器通过使用一个紧凑的固定腔法布里-珀罗(FP)标准具成像光谱仪实现高光谱分辨率,其前置无焦系统采用具有一定缩束比的伽利略前置无焦系统,实现系统尺寸的压缩。GHGSat-D工作在1630~1675 nm之间的短波红外(SWIR)区域,大约具有0.1 nm的高光谱分辨率。仪器整体质量只有15 kg,体积尺寸为20 cm×30 cm×42 cm,FP标准具可以实现高光谱分辨率,但是其作为分光元件价格昂贵,难以制造。欧洲航天局(ESA)计划于2022年发射的Sentinel-5是一颗全球大气污染监测卫星<sup>[6]</sup>。其短波红外通道采用浸没光栅作为分光元件,双通道结构进行探测,工作波段分别为1589~1676 nm和2304~2386 nm。两个通道的光谱分辨率均为0.25 nm,整体系统尺寸为0.4 m×0.3 m×0.2 m。浸没光栅能够在实现高光谱分辨率的前提下大幅度减小

系统的尺寸和质量,然而浸没光栅在加工难度上高于传统光栅,其稳定性相比于传统光栅也不具有优势。美国航空航天局(NASA)在2014年发射了OCO-2卫星计划整星用于碳源汇的观测,采用平面反射光栅进行分光,具有三个光谱通道。其中1.594~1.619 μm为弱CO<sub>2</sub>通道,2.045~2.081 μm为强CO<sub>2</sub>通道,其光谱分辨力分别为20500和20000。系统的三个通道结构相同,均为准直透镜对狭缝出射的光束进行准直,由平面反射光栅对准直光进行分光,最后由聚焦透镜实现光束的成像,整体系统在轻小型化上还具有一定的改进空间<sup>[7]</sup>。

国内研制的高分五号是2018年发射的卫星,大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)是其中的载荷之一。其前置望远系统使用偏轴两反结构,后置光谱系统全部采用Offner结构进行分光<sup>[8-9]</sup>。覆盖的光谱范围为240~710 nm,其光谱分辨率为0.3~0.5 nm。Offner结构作为常用的光谱系统结构之一,具有体积小和成像质量高的特点。然而凸面光栅成品较少,基本需要定制,因此具有价格昂贵的特点。马睿哲等<sup>[10]</sup>采用CT结构观测耀斑及暗条等众多太阳活动的现象,通过多个反射镜对光束的折叠进一步实现系统的轻小型化设计。其工作波段为655.281~657.281 nm,光谱分辨率为0.014 nm, F数大于10,适用于太阳的观测,

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2023-10-21; 录用日期: 2023-11-13; 网络首发日期: 2023-11-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3903202)、黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28050103)、国家自然科学基金(62205330)

通信作者: \*libo0008429@163.com

但难以满足大气温室气体探测的信噪比要求。

大量成像光谱系统通过采用价格昂贵的元件<sup>[11-13]</sup>,或者复杂的折转结构实现轻小型化,提高了制造成本,难以加工装调。为解决上述问题,本文采用自准直结构作为成像光谱系统的初始结构,其透镜组中的镜片全部共轴,结构简单,便于装调;其中平面反射光栅性能稳定,具有较高的光栅衍射效率,制造工艺成熟,价格相对较低。目前对自准直系统初始结构的理论推导较少,本文从矢量形式的光栅方程出发,对其进行推导,得到满足系统指标要求的初始结构参数,为后续轻小型化载荷的研究提供了一定的理论基础。

## 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,随着温室气体排放的增加,地球温室效应逐渐严重,给环境和人类生存都带来了巨大的影响<sup>[14-17]</sup>。无人机载结合高光谱探测具有可靠性高、成本低、灵活性好、操作简单等特点,可以提高大气污染监测效率。

CO<sub>2</sub>气体分子吸收的光谱带主要有 15.0、4.3、2.7、2.1、1.6 μm。利用辐射传输模型 MODTRAN 软件对大气传输进行模拟<sup>[18]</sup>,分析大气中各个光谱带中对 CO<sub>2</sub>吸收的影响因素,最终选择系统工作波段为 1610~1640 nm,光谱分辨率为 0.1 nm,光谱采样为 0.05 nm/pixel。整体系统由前置望远镜与后置分光成像系统两部分构成。设置高度为 100 m,空间分辨率为 0.5 m。选用西安立鼎公司的高性能短波红外 LD-SW6401725-CTE2-G 探测器,其尺寸优于 76 mm×76 mm×70 mm,像元尺寸为 25 μm×25 μm,像元数为 640×512。光谱仪的主要技术指标要求如表 1 所示。

表 1 设计指标  
Table 1 Design indexes

Index	Value
Wavelength range	1610~1640 nm
F	3
Field of view	90°
Spectral resolution	0.1 nm
Ground sample of distance	0.5 m
Height	100 m
Pixel size of spectral dimension	50 μm
Pixel size of spatial dimension	25 μm

## 3 设计理论

为了实现整体系统的小型化设计,采用透射式自准直结构作为其后置光谱系统,具有在实现高成像质量的前提下,大幅度减小系统尺寸的特点。光束首先由望远系统在狭缝处聚焦成像,狭缝出射的光束通过准直系统成为准直光,准直光由平面反射光栅实现分光,最后由与准直系统结构相同的同一组镜片聚焦,在

探测器上成像。考虑到系统布局的合理性,在准直系统与狭缝之间插入一块平面反射镜,避免狭缝与探测器干涉。整体系统结构示意图如图 1 所示。

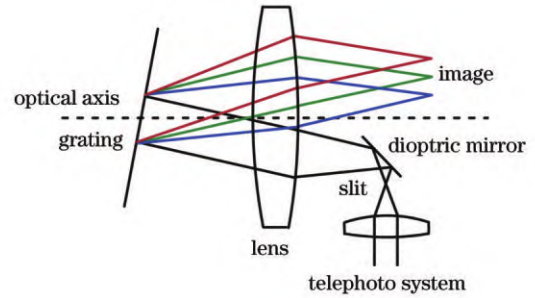


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 System structure diagram

在自准直结构中,准直系统与聚焦成像系统结构对称,共用同一组透镜。考虑到系统的装调,需要单独的准直系统同样具有良好的成像质量。设计全部采用共轴球面透镜,具有降低系统制造成本的优势,同时便于加工与装调。

基于上述考虑,设计时,可使中心波长衍射光使用透镜组的上半部分,狭缝出射的光束使用透镜组的下半部分,两束光对称于透镜组中心。如图 2 所示,中心波长衍射光像面到达光轴的垂直距离  $a$  等于狭缝处的光束到达光轴的垂直距离  $b$ 。狭缝的出射光与中心波长衍射光同时处于系统最小像差位置,在保证单独准直系统具有良好成像质量的前提下,进一步优化整体分光系统,使全视场全波段像质均符合系统指标要求。

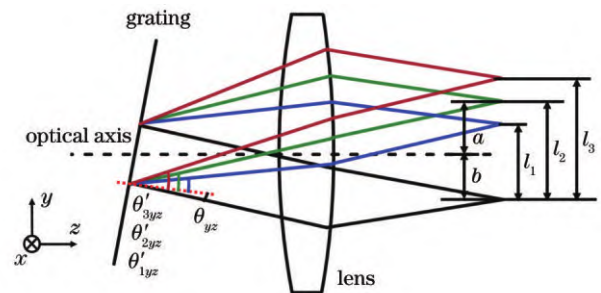


图 2 分光成像系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of spectral imaging system

自准直结构中,狭缝与像面位置是需要考虑的重点问题之一。当狭缝与像面距离过近时,探测器的位置放置十分困难,严重地限制了自准直光学系统的实际应用。因此,需要对狭缝与探测器的距离进行限制,在此基础上本文对系统初始结构进行推导。

传统光栅方程中,入射光、光栅面法线以及衍射光共面。当考虑矢量形式的光束入射时,衍射光将不与入射光和光栅面法线共面。如图 3 所示,以光栅面法线为  $Z$  轴建立坐标系,  $\vec{R}_G$ 、 $\vec{R}'_G$  分别为光栅面的入射光

和衍射光的单位矢量。角  $\theta$  为入射光  $\vec{R}_G$  与  $z$  轴之间的夹角, 角  $\varphi$  为入射光  $\vec{R}_G$  在  $xy$  平面上的投影矢量与  $x$  轴之间的夹角。角  $\theta'$  为衍射光  $\vec{R}'_G$  与  $z$  轴之间的夹角, 角  $\varphi'$  为衍射光  $\vec{R}'_G$  在  $xy$  平面上的投影矢量与  $x$  轴之间的夹角。

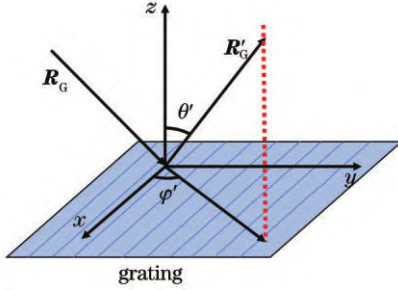


图3 光栅面光线示意图

Fig. 3 Light diagram of grating surface

已知光栅方程的矢量形式<sup>[19]</sup>为

$$n \sin \theta' \cos \varphi' = \sin \theta \cos \varphi + Nm\lambda, \quad (1)$$

$$n \sin \theta' \sin \varphi' = \sin \theta \sin \varphi. \quad (2)$$

对上述方程组进行求解可以得到衍射角  $\theta'$  和衍射方位角  $\varphi'$ :

$$\theta' = \arcsin \frac{1}{n} \sqrt{\sin^2 \theta \sin^2 \varphi + (\sin \theta \cos \varphi + Nm\lambda)^2}, \quad (3)$$

$$\varphi' = \arctan \left( \frac{\sin \theta \sin \varphi}{\sin \theta \cos \varphi + Nm\lambda} \right), \quad (4)$$

式中:  $N$  为光栅刻线数;  $m$  为衍射级次;  $\lambda$  为波长。

假设入射光与光栅面法线的夹角为  $\theta$ , 边缘短波与光栅面法线夹角为  $\theta'_1$ , 中心波长与光栅面法线夹角为  $\theta'_2$ , 边缘长波与光栅面法线夹角为  $\theta'_3$ 。为了简化计算, 初始结构采用如图 2 所示的  $yz$  面系统示意图。实际系统设计时, 衍射光与入射光之间的夹角较小, 因此可以设定夹角与焦距  $f$  的乘积等于像面在  $y$  方向上的长度  $l_i$ , 光栅面偏转角为  $\beta$ 。根据几何关系, 可以得到:

$$|f \sin \theta'_i \sin \varphi'_i \cos \beta| + |f \theta_{yz}| = l_i, \quad (5)$$

式中:  $i = 1, 2, 3$  分别表示三个不同的波长;  $\theta_{yz}$  为光栅面入射光在  $yz$  面上与光轴的夹角。假设探测器位置

摆放需要狭缝与边缘长波之间的距离大于  $h$ , 也即

$$l_1 = |f \sin \theta'_1 \sin \varphi'_1 \cos \beta| + |f \theta_{yz}| > h. \quad (6)$$

另外, 成像光谱仪系统色散长度可表示为

$$\Delta l = (\Delta \lambda \times k \times \sigma) / \delta_\lambda, \quad (7)$$

式中:  $\Delta \lambda$  为工作波段范围;  $\sigma$  为合并后的像元尺寸;  $k$  为采样因子。色散长度越长, 系统分光能力越强, 光谱分辨率越高。因此, 可得不等式:

$$l_3 - l_1 > (\Delta \lambda \times k \times \sigma) / \delta_\lambda. \quad (8)$$

通过以上公式, 即可得到光栅参数、光栅面入射光角度以及透镜组的焦距之间的关系。综合考虑光学系统指标要求, 以及探测器合理摆放所需要的距离条件, 通过合理搭配可以得到分光成像系统的初始结构参数。

## 4 轻小型短波红外自准直高光谱成像仪设计

### 4.1 望远系统设计

空间分辨率 (GSD) 是高光谱成像仪重要的设计指标之一, 其参数主要由望远系统决定, 可表示为

$$G_{SD} = \frac{H \times p_{\text{pixel}}}{f \times \beta}, \quad (9)$$

式中:  $H$  为高度;  $p_{\text{pixel}}$  为合并后的空间维像元尺寸;  $f$  为前置望远系统的焦距;  $\beta$  为成像光谱仪系统的放大倍率。

考虑到望远系统视场以及对成像质量的要求, 望远镜最终采用透射式结构。已知高度为 100 m, 空间维合并后的像元尺寸为 25  $\mu\text{m}$ , 将其代入到上述公式中, 就可以求得前置望远系统所需要的焦距。选取系统放大倍率为 1, 望远系统的像方 F 数为 3。优化时, 首先设定系统入瞳直径为 1.66 mm, 系统半视场为 45°, 将光阑设置在镜组中间, 通过材料之间的匹配, 实现系统像差的校正。考虑到狭缝的装调, 限制系统像面到光学系统最后一面的距离大于 4 mm, 根据上式计算, 约束望远系统焦距大于 5 mm。为了便于与自准直分光系统对接, 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 4 所示的望远镜二维图、三维图。

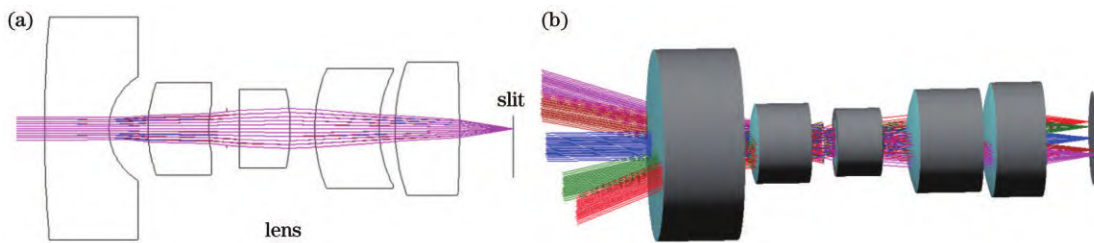


图4 望远系统设计结果图。(a) 二维图; (b) 三维图

Fig. 4 Design results of telescope system. (a) Two-dimensional graph; (b) three-dimensional graph



优化完成后,望远镜的调制传递函数(MTF)如图5所示,在奈奎斯特频率为20 lp/mm时,MTF优于0.85,接近衍射极限。望远镜点列图如图6所示,RMS在5个视场内均小于4  $\mu\text{m}$ ,成像质量良好。

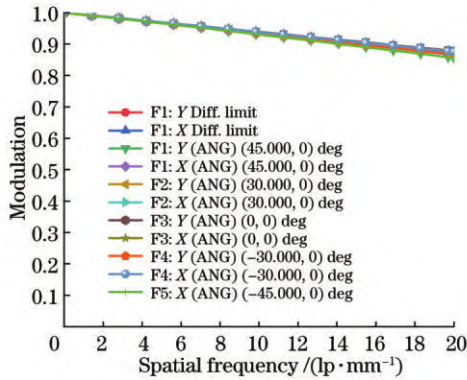


图5 望远系统的MTF曲线图

Fig. 5 MTF curves of telescope system

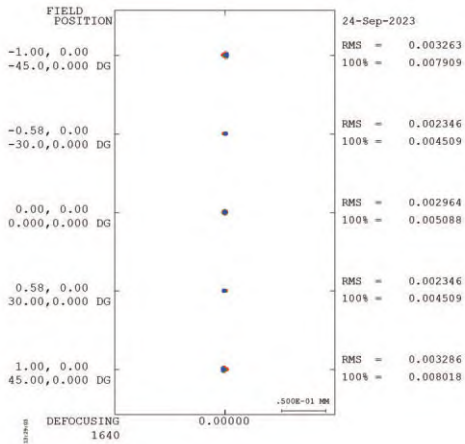


图6 望远系统的RMS图

Fig. 6 RMS of telescope system

## 4.2 自准直分光系统设计

设计探测器位置摆放需要狭缝与边缘长波之间的距离 $h$ 为15 mm,即 $l_1$ 大于15 mm。根据色散长度公式,选取采样因子 $k$ 等于2,可得到系统需要最小的色散长度为15 mm。为保证后期装调对系统光谱分辨率不产生消极影响,在设计时,考虑留有一定的余量,因此设计系统色散长度为15.5 mm,即 $l_3$ 大于30.5 mm。根据上述推导过程,结合现有的光栅产品,最终选择光栅衍射级次 $m=1$ ,光栅刻线数设置为900 line/mm,该光栅衍射效率可达到40%以上。系统透镜组焦距为355 mm,光束在光栅面上的入射角约为45°。

首先设置物方数值孔径为0.166。系统材料均为短波红外波段常用的熔石英、硒化锌以及成都光明公司的红外材料HZLAF90。视场部分设置狭缝长度为8 mm。稍微长于望远系统空间维像面长度,约束后置光谱系统物方远心,以便于后续对接。在优化过程中,

使用自定义约束控制系统像方F数为3;控制系统最后一面与像面的距离大于60 mm,以便于探测器的放置。在优化过程中,通过调整材料之间的搭配和透镜数量的加减校正系统的像差。同时,根据优化结果逐步调整约束条件,保证系统的MTF接近衍射极限。将像面倾斜设置为变量,以实现系统像质的进一步校正。优化完成后,得到的自准直分光系统二维图和三维图如图7所示。

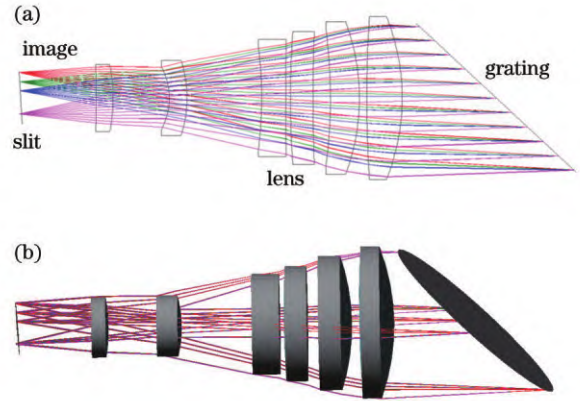


图7 自准直系统设计结果图。(a) 二维图;(b) 三维图

Fig. 7 Design results of auto-collimation system. (a) Two-dimensional graph; (b) three-dimensional graph

自准直分光系统各波段的MTF如图8所示,在波长1610、1625、1640 nm处,在截止频率为20 lp/mm时,MTF均优于0.78。系统各波段点列图如图9所示,RMS均小于9  $\mu\text{m}$ 。可以看出,各个波长、各个视场下的像差校正良好,残余像差较小,均符合系统成像的质量要求。

## 4.3 整体系统设计

根据前面设计,前置望远系统具有像方远心的特性,后置光谱系统具有物方远心的特性,满足光瞳衔接的原则。两系统对接后,成像质量有一定程度的下降。为了进一步提升系统的成像质量,使望远系统与分光系统像差相互抵消,本文对整体系统再次进行优化,同时需要保证单独系统的成像质量同样符合指标要求。考虑到光学系统布局问题,在望远系统最后一面与狭缝之间插入一块平面反射镜,将光束进行折转,同时有利于进一步压缩系统的体积。最终得到的整体结构的二维图和三维图如图10所示。

整体系统各波段的MTF如图11所示,在波长1610、1625、1640 nm处,在截止频率为20 lp/mm时,MTF均优于0.8。系统各波段点列图如图12所示,RMS均小于7  $\mu\text{m}$ ,光斑尺寸均小于半个像元尺寸。可以看出,各个波长、各个视场下的像差校正良好,残余像差较小,均符合系统成像的质量要求。整体系统具有一定程度的谱线弯曲和畸变,可以通过后续图像处理进行消除。

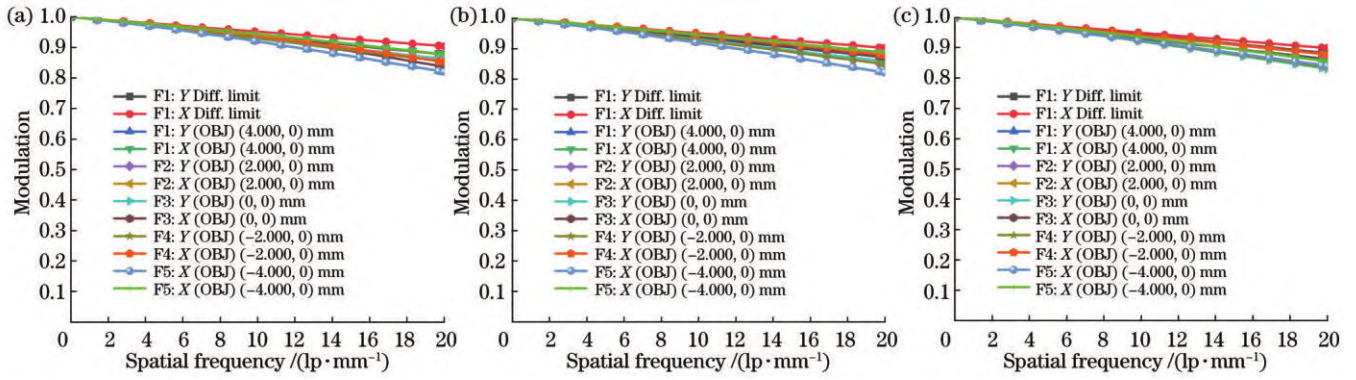


图 8 不同波长处自准直系统的 MTF 曲线图。(a) 1610 nm; (b) 1625 nm; (c) 1640 nm

Fig. 8 MTF curves of auto-collimation system at different wavelengths. (a) 1610 nm; (b) 1625 nm; (c) 1640 nm

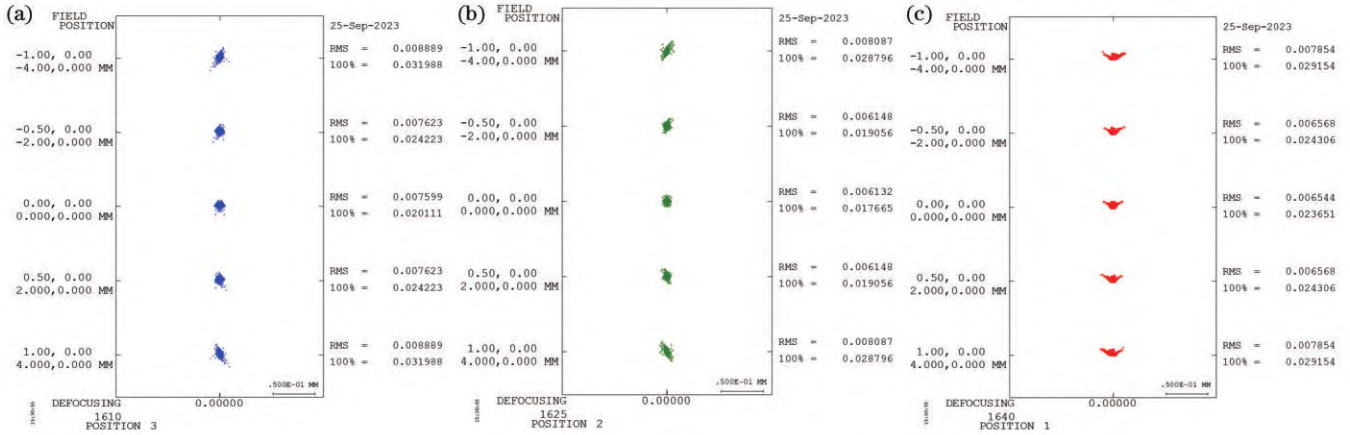


图 9 不同波长处自准直系统的 RMS 图。(a) 1610 nm; (b) 1625 nm; (c) 1640 nm

Fig. 9 RMS of auto-collimation system at different wavelengths. (a) 1610 nm; (b) 1625 nm; (c) 1640 nm

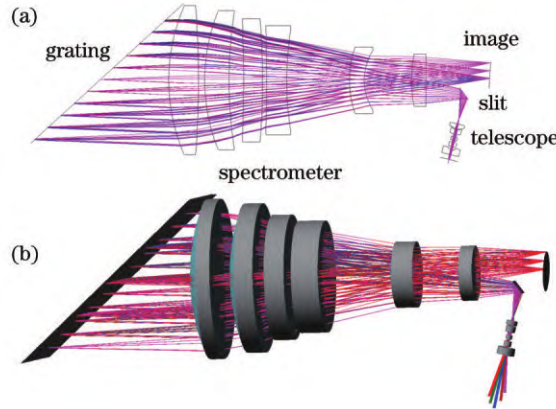


图 10 成像光谱仪设计结果图。(a) 二维图; (b) 三维图

Fig. 10 Design results of imaging spectrometer. (a) Two-dimensional graph; (b) three-dimensional graph

对轻小型短波红外自准直高光谱成像系统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。设置系统后截距补偿为 0.5 mm,分析结果如图 13 所示,整体系统 80% 以上的概率值的 MTF 大于 0.7,99% 以上的概率值的 MTF 大于 0.58,满足系统实际应用要求。

整体系统最终公差分配极限结果如表 2 所示。

## 5 结 论

轻小型大气监测载荷更加适用于小型搭载平台,降低整体系统研制成本,本文采用自准直结构实现系统的小型化设计。从矢量形式的光栅方程出发,通过对其初始结构进行推导,得到满足高光谱分辨率与系统合理布局条件的初始结构参数。为进一步提升整体



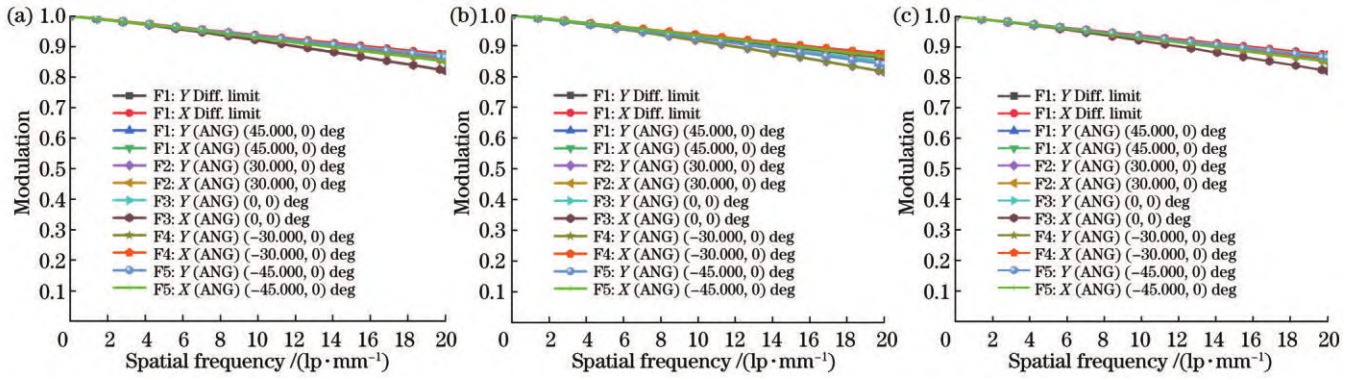


图 11 不同波长处成像光谱仪的 MTF 曲线图。(a) 1610 nm; (b) 1625 nm; (c) 1640 nm

Fig. 11 MTF curves of imaging spectrometer at different wavelengths. (a) 1610 nm; (b) 1625 nm; (c) 1640 nm

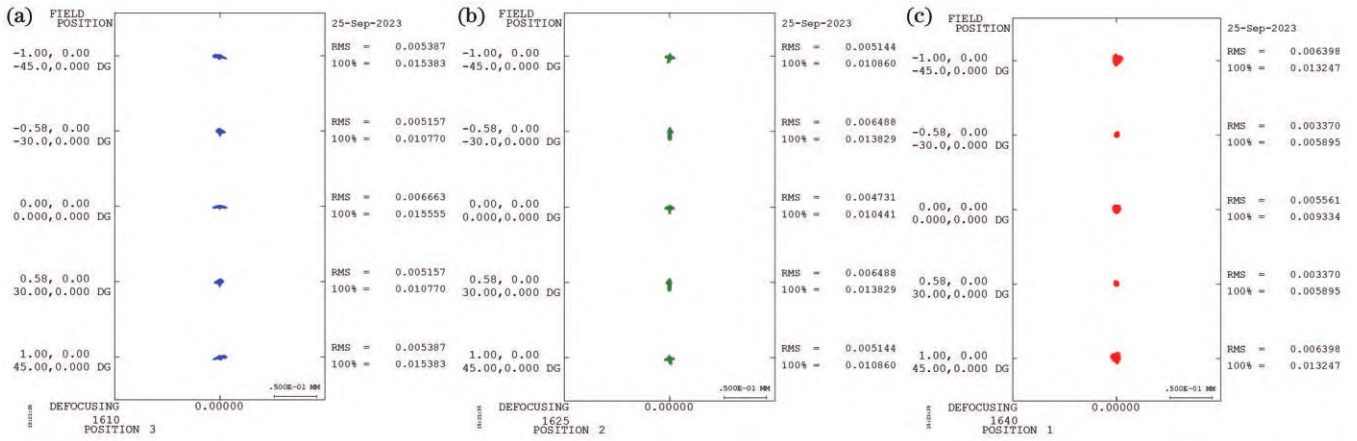


图 12 不同波长处成像光谱仪的 RMS 图。(a) 1610 nm; (b) 1625 nm; (c) 1640 nm

Fig. 12 RMS of imaging spectrometer at different wavelengths. (a) 1610 nm; (b) 1625 nm; (c) 1640 nm

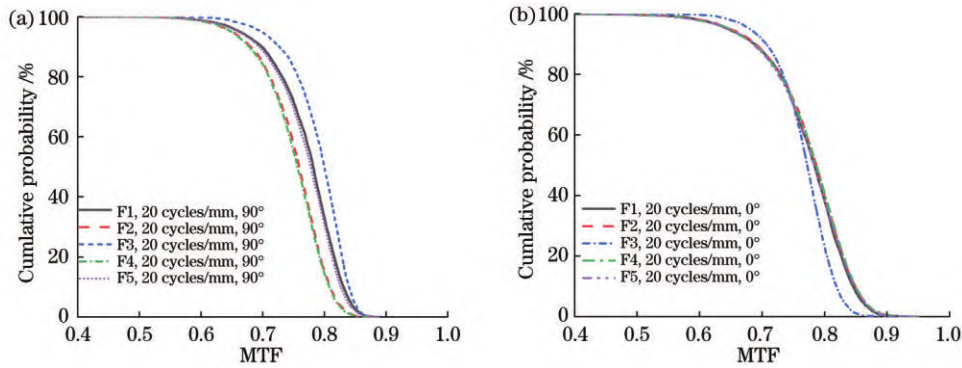


图 13 成像光谱仪的 MTF 公差分析。(a) 切线面; (b) 弧矢面

Fig. 13 MTF tolerance analysis of imager spectrometer. (a) Tangential plane; (b) sagittal plane

系统的成像质量,采用独立设计与综合优化的方法,在保证独立系统具有高成像质量的同时,对整体系统进行优化,最终得到轻小型短波红外自准直高光谱成像系统在工作波段为 1610~1640 nm 时,系统 F 数小于 3。在截止频率为 20 lp/mm 时,MTF 均优于 0.8,各视场各波段的 RMS 均小于 7 μm,光谱分辨率均优于 0.1 nm,光谱采样为 0.05 nm/pixel,整体尺寸优于 460 mm×150 mm×150 mm,均满足设计指标要求。

本文为轻小型成像光谱仪提供了一种设计方案,为未来小型化搭载平台的发展提供进一步的基础保证和技术支撑。

本文设计最终具有较大的谱线弯曲,需要采用后续图像处理的形式进行校正。后续可以通过增加棱镜的方式,对光栅产生的谱线弯曲进行校正。但同时需要考虑整体尺寸和质量的增大,以及棱镜引入的像差问题。系统全部采用球面镜进行设计,后续可以通过

表 2 公差分配结果  
Table 2 Tolerance distribution results

Tolerance type	Minimum value	Maximum value
Thickness	0.02 mm	0.5 mm
Surface displacement	0.02 mm	0.5 mm
Class displacement	0.02 mm	0.5 mm
Tilt	1'	17'
Refractive index	0.0001	0.002
Radius of curvature	0.02 mm	$1 \times 10^{10}$ mm

增加非球面或者自由曲面镜,减少透镜数量,实现系统光学效率的提高。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang L, Zhang M, Chen T N, et al. Ultrahigh-resolution on-chip spectrometer with silicon photonic resonators[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(7): 210100.
- [2] 刘晓林, 刘勋, 李维, 等. 天基光纤激光雷达光谱仪光学系统设计[J]. *中国激光*, 2023, 50(7): 0708012.  
Liu X L, Liu X, Li W, et al. Optical system design of space-based filament LiDAR spectrometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(7): 0708012.
- [3] 马健, 张军强, 吴从均, 等. 全谱段高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(23): 2322001.  
Ma J, Zhang J Q, Wu C J, et al. Optical system design of full-spectrum hyperspectral imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(23): 2322001.
- [4] 朱书缘, 吴朋翰, 鲁贞贞, 等. 应用光谱重建理论的傅里叶变换光谱仪[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(9): 0912003.  
Zhu S Y, Wu P H, Lu Z Z, et al. Fourier transform spectrometer using spectral reconstruction theory[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0912003.
- [5] Jervis D, McKeever J, Durak B O A, et al. The GHGSat-D imaging spectrometer[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(3): 2127-2140.
- [6] Theys N, Lerot C, Brenot H, et al. Improved retrieval of SO<sub>2</sub> plume height from TROPOMI using an iterative Covariance-Based Retrieval Algorithm[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(16): 4801-4817.
- [7] Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9607: 960702.
- [8] 陈良富, 尚华哲, 范萌, 等. 高分五号卫星大气参数探测综述[J]. *遥感学报*, 2021, 25(9): 1917-1931.  
Chen L F, Shang H Z, Fan M, et al. Mission overview of the GF-5 satellite for atmospheric parameter monitoring[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(9): 1917-1931.
- [9] 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 Z, Jiang G W, Li Y D, et al. GF-5 satellite system design and technological characteristics[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S2): 1-13.
- [10] 马睿哲, 王春亮, 陈长征, 等. 太阳 H $\alpha$  空间光谱仪光学设计[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(4): 049601.  
Ma R Z, Wang C L, Chen C Z, et al. Optical design of solar H $\alpha$  space telescope[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(4): 049601.
- [11] Wang R X, Ansari M A, Ahmed H, et al. Compact multi-foci metalens spectrometer[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 103.
- [12] Reimers J, Bauer A, Thompson K P, et al. Freeform spectrometer enabling increased compactness[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17026.
- [13] 韩继周, 赵世家, 冯安伟, 等. 基于自由曲面的紧凑型宽波段成像光谱仪设计[J]. *光学学报*, 2023, 43(14): 1422002.  
Han J Z, Zhao S J, Feng A W, et al. Design of compact and broadband imaging spectrometer based on FreeForm surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(14): 1422002.
- [14] 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.
- [15] 岳斌, 余赛芬, 董晶晶, 等. 温室气体通量测量方法及进展[J]. *光学学报*, 2023, 43(18): 1899906.  
Yue B, Yu S F, Dong J J, et al. Measurement methods and progress of greenhouse gas flux[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(18): 1899906.
- [16] 吕白雪, 张天舒, 范广强, 等. 傅里叶红外系统监测大气中温室气体的污染特征[J]. *中国激光*, 2023, 50(6): 0611001.  
Lü Y X, Zhang T S, Fan G Q, et al. Monitoring of pollution characteristics of atmospheric greenhouse gases using Fourier infrared system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(6): 0611001.
- [17] 戴春杰, 周爱明, 杨溢, 等. 基于 WGS-84 椭球的改进海洋耀斑计算模型与仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(20): 2001001.  
Dai C J, Zhou A M, Yang Y, et al. Improved sun glint computational model based on wgs-84 ellipsoid and simulation analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(20): 2001001.
- [18] 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.
- [19] 巴音贺希格, 齐向东, 唐玉国. 位相光栅色散特性的矢量衍射理论分析[J]. *物理学报*, 2003, 52(5): 1157-1161.  
Bayanhesig, Qi X D, Tang Y G. The vector diffraction theory analysis of chromatic dispersion characteristics of phase grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(5): 1157-1161.

# Design of Light and Small Short-Wave Infrared Auto-Collimation Hyperspectral Resolution Imaging Spectrometer

Liu Yang<sup>1,2</sup>, Li Bo<sup>1\*</sup>, Gu Guochao<sup>1</sup>, Li Hanshuang<sup>1</sup>, Wang Xiaoxu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

## Abstract

**Objective** Carbon dioxide, methane, ozone, and other gases in the atmosphere can absorb long waves reflected by the ground, and again release infrared radiation to increase the earth temperature. These gases are called greenhouse gases caused by the greenhouse effect and are an important factor causing global warming since industrialization. The world environment changes not only exert a great influence on human life but also lead to the extinction of many species. Therefore, in the face of climate change, greenhouse gas monitoring has become the research focus of various countries, and it is urgent to respond to global warming caused by the increase in greenhouse gas concentration. Greenhouse gas monitoring is the basis for studying the change trend of greenhouse gas concentration, and the composition, nature and intensity of greenhouse gas sources and sinks, and is also the basis for the greenhouse effect and yardstick for formulating emission reduction measures. Achieving the two-carbon goal relies on high-precision and high-resolution traceability of gases such as carbon dioxide and methane. The development of a new instrument for trace gas detection with high precision, low cost, and high timeliness has scientific research significance for carbon emission tracing and detection with high spatial resolution, and the obtained scientific data is vital for formulating carbon neutral strategies. With the continuous progress of the platform technology, higher requirements are put forward for the size of the imaging spectrum system, and light weight and miniaturization have become important development directions of the imaging spectrometers. To solve the above problems, we design a short-wave infrared hyperspectral imaging system with auto-collimation.

**Methods** In the design method, the image-space telecentric of the telescopic system and the object-space telecentric of the spectroscopic system are ensured to meet the matching conditions of the pupil. The system aberrations are corrected by material matching and lens number increase. Due to the relatively large field of view of the system, the diaphragm is placed in the middle of the mirror group of the telescopic system, which is conducive to correcting the system aberrations. The initial structure obtained from the calculation is set and constrained. After optimization, we invert the collimator group, add the optical splitting element, and adjust the position of the image plane to obtain the optical splitting imaging system. Meanwhile, the system is further optimized to make the imaging quality meet the index requirements. The lens group is reemployed to obtain a spectroscopic system. The picking operation can be carried out, and the optical splitting system can be further optimized under the premise of ensuring the parallel light emission of the single collimator group, which can make the imaging quality meet the index requirements. Symmetric systems with the same structure also have a certain correction degree for aberrations, and the system adopts spherical lens. The optimized telescopic system is connected to the spectroscopic system. The image quality of the system will change after docking. The method of independent design and comprehensive optimization is adopted. The aberrations of the telescopic system compensate for those of the spectral system based on ensuring the sound imaging quality of the individual system. Then the aberrations of the whole system are reduced, and the imaging quality of the whole system is further improved.

**Results and Discussions** An auto-collimation imaging spectrometer is designed, and its structure is shown in Fig. 10. The light beam enters the slit through the telescopic system, and the light emitted from the slit is reflected by the plane mirror to avoid the difficult system layout. The collimator group collimates the light beam, the plane reflection grating is diffracted by the straight light, and the diffracted light passes through the mirror group again for focusing imaging and finally reaches the detector. The groove density of grating is 900 lp/mm and the diffraction order is 1. The working band is 1610–1640 nm, the spectral resolution is 0.1 nm, and the spectral sampling is 0.05 nm. The system design indicators are shown in Table 1. The design results show that the imaging quality meets the requirements. Under the Nyquist frequency of 20 lp/mm, the modulation transfer function (MTF) is better than 0.8, the full field mean square root radius (RMS) is less than 7  $\mu\text{m}$ , and the spectral resolution is better than 0.1 nm, with optical system size better than 460 mm  $\times$  150 mm  $\times$  150 mm. Finally, the tolerance analysis of the system is carried out to ensure its feasibility in practical applications. The tolerance MTF is shown in Fig. 13, and the tolerance analysis results are shown in Table 2. The MTF of more than 80% probability value of the whole system is greater than 0.7, and that of more than 99% probability value is greater than 0.58, which meets the practical



application requirements of the system.

**Conclusions** Light and small atmospheric monitoring loads are more suitable for small carrying platforms and reduce the overall system development cost. We adopt the self-collimating structure to realize the miniaturization design of the system. Based on the grating equation in vector form, the initial structure parameters satisfying the conditions of high spectral resolution and reasonable layout of the system are obtained by deducing its initial structure. Independent design and comprehensive optimization methods are adopted to optimize the whole system and ensure the high imaging quality of the independent system to further improve the imaging quality of the whole system. Finally, the F-number of the light and small short-wave infrared auto-collimation hyperspectral imaging system is less than 3 when the working band is 1610–1640 nm. When the cut-off frequency is 20 lp/mm, MTF is better than 0.8, RMS of each band in each field of view is less than 7  $\mu\text{m}$ , and spectral resolution is better than 0.1 nm, with spectral sampling of 0.05 nm/pixel and the overall size better than 460 mm $\times$ 150 mm $\times$ 150 mm, all of which meet the design requirements. We provide a design scheme for light and small imaging spectrometers, and also further basic guarantee and technical support for the future development of miniaturized carrying platforms.

**Key words** optical design; imaging spectrometer; auto-collimation; light and small