

# 静止轨道中波红外成像光谱仪分光成像系统

朱嘉诚<sup>1,2</sup>,陆伟奇<sup>1,2</sup>,赵知诚<sup>1,2</sup>,陈新华<sup>1,2</sup>\*,沈为民<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006; <sup>2</sup>教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

**摘要** 设计和研制了用于静止轨道高光谱遥感卫星的中波红外成像光谱仪分光成像系统。根据静止轨道特点分析光学系统指标参数,指出分光成像系统具有狭缝长、相对孔径小和体积紧凑的特点。设计了波长为 3~5 μm,狭缝拼接长度为 49 mm,光谱采样间隔为 50 nm,系统 F 数为 5.4 的双狭缝 Offner 型分光成像系统。采用整机制冷提高系统灵敏度,分析结果表明,工作温度低于 160 K 时,系统噪声等效温差(NETD)可降低至 0.2 K,并根据制冷温度进行消热差设计。根据光学设计结果,研制材料为全铝合金的分光成像系统原理样机,自研的凸面闪耀衍射光栅的峰值效率高达 86.4%。利用可见光和近红外光的高级衍射谱测试常温下样机性能,结果表明,研制的样机光谱成像质量优、光谱畸变小,各项指标均满足设计要求。

关键词 光学设计;成像光谱仪;中波红外;凸面闪耀光栅 中图分类号 TH744 **文献标志码** A

doi: 10.3788/AOS202141.1122001

# Spectroscopic Imaging System in Mid-Wave Infrared Imaging Spectrometer on Geostationary Orbit

Zhu Jiacheng<sup>1,2</sup>, Lu Weiqi<sup>1,2</sup>, Zhao Zhicheng<sup>1,2</sup>, Chen Xinhua<sup>1,2\*</sup>, Shen Weimin<sup>1,2</sup> <sup>1</sup> School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China; <sup>2</sup> Key Laboratory of Modern Optical Technology, Ministry of Education, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract The spectroscopic imaging system in a mid-wave infrared imaging spectrometer was designed and developed for hyperspectral remote sensing satellites on geostationary orbit. According to the characteristics of geostationary orbit, index parameters of the optical system were analyzed. It was pointed that such spectroscopic imaging system features long slit, small relative aperture, and compact size. A double-slit Offner spectroscopic imaging system was designed with a spectral range of  $3-5 \mu m$ , splicing slit length of 49 mm, spectral sampling distance of 50 nm, and F-number of 5.4. The whole machine refrigeration was adopted to improve optical system sensitivity. The analysis results showed that when the working temperature was lower than 160 K, the noise equivalent temperature difference (NETD) reduced to 0.2 K, and an athermal design was performed on the basis of the cooling temperature. Based on the results of optical design, the whole aluminum alloy imaging system prototype was developed. The peak efficiency of a self-developed convex blazed diffraction grating reached 86.4%. The performance of the prototype at room temperature was tested using high order diffraction spectrum of visible and near-infrared light. The test results showed high imaging quality of the imaging spectrometer with slight smile and keystone distortions; in addition, all specifications met the design requirements.

Key words optical design; imaging spectrometer; mid-wave infrared; convex blazed grating OCIS codes 220.4830; 330.6190; 050.2770

收稿日期: 2020-11-30;修回日期: 2020-12-21;录用日期: 2020-12-30

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0500501)、中国博士后科学基金(2020M681700)

\* E-mail: xinhua\_chen@suda.edu.cn

#### 第 41 卷 第 11 期/2021 年 6 月/光学学报

# 1 引 言

位于地球静止轨道的卫星平台具有和地面保持 相对静止的独特优势,搭载的遥感载荷具有极高的 时间分辨率、快速响应能力和持续观测能力。目前, 在静止轨道工作的光谱类遥感载荷均为多光谱载 荷[1-3],只有十几个光谱通道,不足以获取地物目标 指纹信息,辨别物质种类和成分的能力远不如高光 谱载荷,因此研究静止轨道成像光谱仪是高光谱遥 感领域的发展趋势和必经之路。静止轨道高约 36000 km,光学系统易实现宽幅,载荷不受平台运 动限制,可通过适当延长曝光时间来提高灵敏度,以 降低成像光谱仪对相对孔径的要求。近年来关于静 止轨道高光谱遥感载荷的研究报道较少。美国报道 了海岸线与空气污染检测任务 CEO-CAPE 的设计 方案<sup>[4-5]</sup>,成像光谱仪在 0.34~2.14 μm 波段工作, 幅宽达 500 km,光谱采样间隔为 0.5~50 nm,但空 间分辨率较低,仅375 m。为获得高精度目标识别 能力,需提高空间分辨率,但高空间分辨率必然需要 大规模的空间像素数,要求成像光谱仪具有超长狭 缝,但这会导致系统体积过于庞大,不仅狭缝和光栅 等关键元件难制作,而且仪器研制和发射成本极高。 一种实现超长狭缝的方法是通过在前置物镜焦面上 拼接分光成像系统阵列来覆盖狭缝总长<sup>[6]</sup>,这种方 法有效减小了分光成像系统体积和研制难度。为避 免干涉,拼接的必要条件是,单台分光成像系统沿狭 缝长度方向的尺寸必须小于两倍的狭缝长度,这要 求极紧凑的结构。因此工作于静止轨道的高空间分 辨率成像光谱仪虽然不需要有大的相对孔径,但分 光成像系统须具备长狭缝和小体积。

中长波红外谱段能够探测到热辐射的特点使成 像光谱仪具有全天候观测能力,融合可见光和短波 红外的高光谱数据,可极大提升目标识别精度和科 学描绘纬度。本文研究的长狭缝紧凑型中波红外 (MWIR)分光成像系统是静止轨道全谱段高光谱成 像仪中的中波红外分光成像模块,用于探测森林火 灾、火山活动、火箭尾焰等高温事件。该模块的成功 研制为静止轨道高光谱成像载荷提供了中波红外分 光成像技术储备,具有重要的科学意义和工程价值。

# 2 指标分析

静止轨道中波红外成像光谱仪技术指标如表 1 所示,根据表中数据,计算得到满足幅宽和空间分辨 率要求的空间通道共需 8000 个,满足波长范围和光

谱采样间隔要求的光谱采样通道共需 40 个。定制 的中波红外 HgCdTe 探测器可响应 3~5 µm 光谱, 单片规模为 1024 pixel×256 pixel,像元尺寸为 24 μm×32 μm,根据探测器规模和尺寸,至少需要 8片探测器才能覆盖空间通道数,狭缝总长度至少 为192 mm。采用分光成像系统拼接的方式来覆盖 空间通道数,为保证系统可靠性,用于拼接的分光成 像系统数量不宜过多,而为保证紧凑性和研制的可 行性,拼接台数又不宜过少。考虑到这两点,计划通 过拼接4台分光成像系统来覆盖狭缝总长,每台系 统所用探测器由两片芯片拼接并封装而成,探测器 拼接示意图如图1所示,为使探测的空间信息连续, 两片探测器在长度方向有 12 个像元的搭接量,宽度 方向间隔 3 mm。表 1 中, smile 和 keystone 分别表 示成像光谱仪的谱线弯曲和色畸变指标,要求这两 种光谱畸变低。

表1 中波红外成像光谱仪技术指标要求

Table 1	Specifications	of the	MWIR	imaging	spectrometer
---------	----------------	--------	------	---------	--------------

Parameter	Value
Orbit height /km	36000
Swath width /km	400
Spectral range $/\mu m$	3-5
Spatial resolution /m	50
Spectral sampling distance /nm	50
Static MTF	≥0.4@4 µm
NETD/K	≪0.2
Smile / %	<10
Keystone / %	$<\!\!5$



 Fig. 1 Schematic of detector splicing of single spectroscopic imaging spectrometer

与探测器几何拼接位置对应,分光成像系统采 用相同拼接方式的双狭缝,其中单条狭缝长度足够 覆盖单片探测器空间尺寸,双狭缝总长为49 mm。 图 2 给出了4 台分光成像系统拼接示意图,覆盖前 置物镜192 mm 像面总长,为避免相邻分光成像系 统干涉,单台系统宽度W 须小于两倍的拼接狭缝长 度 S,即满足 W<2S。

工作于静止轨道的光学系统可通过主动延长积 分时间来提高灵敏度,该中波红外分光成像系统还







可通过整机制冷来进一步降低噪声等效温差 (NETD),因此约束该系统相对孔径的主要指标为 调制传递函数(MTF)。奈奎斯特频率处的系统 MTF<sup>[7]</sup>为

$$f_{\rm MTF}(\rho_{\rm N}) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{\rho_{\rm N}}{\rho_{\rm c}}\right) - \frac{\rho_{\rm N}}{\rho_{\rm c}} \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_{\rm N}}{\rho_{\rm c}}\right)^2} \right],$$
(1)

式中: $\rho_N$  为奈奎斯特频率,与探测器空间维像元尺 寸 a 有关; $\rho_c$  为像方截止频率,与波长  $\lambda$  和系统 F 数有关。

$$\begin{cases} \rho_{\rm N} = \frac{1}{2a} \\ \rho_{\rm c} = \frac{1}{\lambda F} \end{cases}$$
(2)

通过数值计算并留有一定余量,F 数为 5.4 时, 奈奎斯特频率处中心波长 MTF 值高于 0.4。综合 上述分析,光学系统的指标参数总结于表 2,狭缝宽 度方向的地面分辨率应与长度方向一致,取狭缝宽 度为 24 μm;探测器光谱维方向 3 个像元合并使用, 40 个光谱通道占用 120 个光谱维像元,在像面的色 第 41 卷 第 11 期/2021 年 6 月/光学学报

散宽度为 3.84 mm;双狭缝在像面上形成两个独立的光谱像,为使两光谱像被两片探测器芯片分别接收,双狭缝间隔须大于色散宽度与探测器间隔之和,取 6.9 mm。此外,该分光成像系统仍需满足表 1 中低 NETD 要求和低光谱畸变要求。

表 2 光学系统的指标参数

Table 2 Specifications of optical system

Parameter	Value
Spectral range $/\mu m$	3-5
Total length of double slit /mm	49
Interval of double slit /mm	6.9
Slit width $/\mu m$	24
F number	5.4
Dispersive width /mm	3.84
System width /mm	< 98

# 3 光学系统设计

根据指标可以看出,该系统特点在于狭缝长、相 对孔径小、体积紧凑、光谱畸变小,还须适应低温工 作条件以满足低 NETD 要求。基于凸面衍射光栅 的 Offner 型分光装置具有体积紧凑、成像质量优、 光谱畸变小等特点,适用于本研究的中波红外分光 成像系统。已有诸多文献<sup>[8-10]</sup> 给出 Offner 系统的 理论分析和初始结构求解方法,本文不再赘述。利 用光学设计软件 ZEMAX 优化分光成像系统,图 3 为设计的中波红外分光成像系统光路侧视图和轴向 视图,系统包含双狭缝 S1 和 S2,球面反射镜 M 和凸 面衍射光栅 G 同心,为方便拼接,在系统入射臂和出 射臂中分别加入折叠镜 FM1 和 FM2 用于折叠光路, IMAG1 和 IMAG2 分别为与 S1 和 S2 对应的谱面。 系统为物方远心和像方远心设计,表 3 给出了设计的 分光成像系统主要结构参数和性能参数。





Fig. 3 Schematic of optical path of the mid-wave infrared spectroscopic imaging spectrometer.

(a) Side view; (b) axial view

## 表 3 分光成像系统主要结构参数和性能参数

Table 3Main structural parameters and performanceparameters of the spectroscopic imaging spectrometer

Specification and Performance	Value
Radius of M ( $R_{\rm M}$ ) /mm	218.56
Radius of G ( $R_{\rm G}$ ) /mm	111.00
Grating groove density /(line • $mm^{-1}$ )	19.1
Blazed angle of grating /(°)	2.6
Diffraction order	-1
Lateral displacement of slits /mm	31.4 & 38.3
Package size $/(mm \times mm \times mm)$	$88 \times 168 \times 180$
Smile / %	<0.3
Keystone / %	<0.1
MTF @ 20 ℃ @4 μm	0.41
RMS spot diameter @ 20 °C $/\mu m$	<8

由表 3 数据可知,设计的分光成像系统光谱畸 变小,谱线弯曲与色畸变均不足 1%像元;点列图远 小于艾里斑,像质接近衍射极限;体积十分紧凑,宽 度尺寸仅 88 mm,满足拼接条件。图 4 为 4 台分光 成像系统拼接示意图,狭缝拼接在同一平面内,用于 对接前置物镜像平面,相邻分光成像系统间有足够 间隔,为 10 mm。

成像光谱仪光学元件和机械元件有较强的自身 热辐射,其中中波红外辐射传递至像面会形成噪声, 将降低系统灵敏度甚至淹没信号。对光学系统进行 制冷能有效抑制背景辐射,但制冷温度过低会增加 制冷机研制难度和成本,且低温会对光学元件面型与 空间位置产生影响,从而影响仪器性能。因此该系统 的设计难点在于确定合适的制冷温度,以满足小于 0.2 K的 NETD 要求。采用的方案是对分光成像系 统进行制冷,而不对前置望远系统进行制冷,通过狭 缝隔绝来自望远系统机械件的非成像光路热辐射,并 在制冷温度下对分光成像系统进行消热差设计。



图 4 分光成像系统拼接示意图 Fig. 4 Splicing schematic of spectroscopic imaging spectrometer

第 41 卷 第 11 期/2021 年 6 月/光学学报

建立分光成像系统的热辐射仿真模型并分析不同温度下背景辐射对 NETD 的影响,求解满足指标 要求的制冷温度。根据黑体辐射定律,温度为 T 的 黑体辐出度为

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp(c_2/\lambda T) - 1 \right]}, \qquad (3)$$

式中:第一辐射常数  $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16}$  W·m<sup>2</sup>; 第二辐射常数  $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2}$  m·K。文献[11] 详细推导了包含背景辐射的 NETD 公式,表达式为  $D_{\text{NETD}} =$ 

$$\frac{4\lambda F^{2} T_{t}^{2} \sqrt{\Delta f + \left[E_{\text{background}} \sqrt{A_{d}} \cdot D^{*}(\lambda)\right]^{2}}}{\varepsilon(\lambda)\tau(\lambda)M(\lambda,T_{t}) \cdot hc/k \cdot \sqrt{A_{d}} \cdot D^{*}(\lambda)\Delta\lambda},$$
(4)

式中: $E_{\text{background}}$  为背景辐射在探测器光敏面的辐照 度; $\Delta\lambda$  为光谱采样间隔;F 为系统 F 数; $\tau(\lambda)$  为系 统透过率; $A_d$  为探测器像元面积; $D^*$  为峰值探测 率; $\Delta f$  为噪声等效带宽; $T_t$  为目标温度; $\epsilon(\lambda)$ 为目 标发射率;h 为普朗克常量;c 为光速;k 为玻尔兹曼 常量。在(4)式中,除背景辐照度外,其余参数均由 光学系统和探测器决定,因此在光学系统和探测器 指标确定的情况下,降低  $E_{\text{background}}$  是减小 NETD 的 有效办法。

 $E_{\text{background}}$ 的大小与制冷温度密切相关,可通过 仿真实际情况中的背景辐射来分析 $E_{\text{background}}$ 与温度 变化的关系。图 5 为中波红外分光成像系统光机模 型示意图,各元件的辐出度为发射率与黑体辐出度 的乘积,即  $\epsilon(\lambda)M(\lambda, T_c), T_c$ 为制冷温度。在 Lightools软件中建立光机系统仿真模型,表4给出 各元件的表面光学属性,将光机元件设置为辐射源, 探测器光敏面设置为接收器,共追迹1亿根辐出光 线,仿真不同制冷温度时背景辐射传递至像面的照



图 5 中波红外分光成像系统光机模型 Fig. 5 Optical-mechanical model of the mid-wave infrared spectroscopic imaging spectrometer

## 度,数据如表5所示。

表 4 光机元件表面光学属性

Table 4 Surface optical properties of optomechanical

components			
Element	Optical property		
Slit	Reflectivity 90%		
M EM1 EM9	Reflectivity 98.5%		
	Scattering coefficient 0. $02\%$		
C	Designed diffraction efficiency		
G	Absorptivity 1.5%		
	Absorptivity 90%		
Mechanical frame	Near-specular reflectivity $5\%$		
	Lambert scattering rate $5\%$		

采用的 HgCdTe 探测器的  $D^*$ 为 3 × 10<sup>11</sup> cm • Hz<sup>1/2</sup> • W<sup>-1</sup>, Δf 为 50 Hz, 假设探测 700 K的高温目标,其峰值辐射波长在 4 µm 附近。将不同制冷温度的  $E_{\text{background}}$  代入(4)式,求出对应的 NETD,如表 5 所示。可以看出,背景辐照度随制冷 温度降低而不断减小,当制冷温度大于 160 K 时 NETD 随制冷温度降低也迅速减小,而当制冷温度 低于 160 K 时,NETD 趋于稳定。为减轻制冷机研 制压力,取制冷温度为 160 K,即可满足指标要求,

第 41 卷 第 11 期/2021 年 6 月/光学学报

此时系统 NETD 为 0.13 K。

表 5	分光成像系统中 E background	与	NETD	随
	制冷温度的变化			

Table 5  $E_{\text{background}}$  and NETD of the spectroscopic imaging spectrometer change with the cooling temperature

$T_{\rm c}/{ m K}$	$E_{ m background}/( m W \cdot  m mm^{-2})$	NETD /K
200	$2.48 \times 10^{-8}$	2.12
180	$4.41 \times 10^{-9}$	0.92
160	5.20 $\times 10^{-10}$	0.13
140	3. $41 \times 10^{-11}$	0.04
120	9.27 $\times 10^{-13}$	0.03
100	6.27 $\times$ 10 <sup>-15</sup>	0.03

为满足系统常温装调和低温工作的实际情况, 对该分光成像系统进行消热差设计,由于该系统为 全反射式结构,可用同种材料的金属反射镜、衍射光 栅和机械件来相互匹配热膨胀,实现被动消热差。 光机元件均采用 6061 铝合金,图 6 为常温和制冷温 度下中心波长 MTF 曲线,可以看出两者几乎无差 异,系统从常温转移至制冷环境时,产生的热离焦量 为-0.03 mm,色散宽度减小 15 μm,最大谱线漂移 量为 5 μm,这些误差量对系统性能的影响十分小, 表明系统具有优的热稳定性。





# 4 原理样机研制与性能测试

根据光学系统设计结果,展开中波红外分光成 像系统原理样机研制。系统的关键元件狭缝和衍射 光栅均自主研发,以单晶硅片为基片,采用紫外光刻 和深硅刻蚀技术研制双狭缝元件,狭缝与其显微镜 测试照片如图 7 所示,狭缝宽度 *d* 测试值为 23.994 μm,单条狭缝长度测试值为 24.576 mm,与



图 7 狭缝与其显微镜测试图 Fig. 7 Slit and its microscope test chart

#### 第 41 卷 第 11 期/2021 年 6 月/光学学报

### 封面文章・研究论文

设计要求相符。

全铝合金的光学元件由金刚石车削制成,图 8 为研制的凸面闪耀衍射光栅和它的槽形测试图,光 栅周期 g 测试值为 52. 37  $\mu$ m,与设计槽密度 19.1 lp/mm 一致,槽深测试值为 2.57  $\mu$ m,对应闪 耀角 2.8°,较设计值 2.6°稍偏大。光栅衍射效率测 试曲线如图 9 所示,测试效率略低于设计值,且由于 闪耀角偏大,效率峰值向长波端偏移,但研制的光栅 仍具有高衍射效率,实测效率在波段内均高于 70%,峰值高达 86.4%。



图 8 自研的凸面闪耀衍射光栅与其槽形测试图 Fig. 8 Self-developed convex blazed diffraction grating and its groove shape test chart



Fig. 9 Grating diffraction efficiency curve

中波红外分光成像系统光机组件借鉴 Snaptogether<sup>[12]</sup>设计思想,每个光学元件与光机框架均 设计了配合基准,在光学元件和机械件的加工阶段 严格控制配合面的加工精度,装配时只需将光学元 件分别安装进机械框架对应的基座中,即可保证光 学元件的相对位置,做到只装不调。图 10 为研制完 成的样机与其光谱性能测试装置,样机包络尺寸为 90 mm×180 mm×190 mm,质量约 1.5 kg。为准 确测量光谱采样间隔、谱线弯曲和色畸变等性能,测 试所用探测器像元尺寸应小于实际探测器像元尺 寸,受实验条件所限,暂不具有小像元制冷型红外探 测器。考虑到可见光或近红外光线入射分光成像系 统时,入射光的高级衍射谱与对应的中波红外工作 级次谱线的几何形状与位置是一致的,利用可见光 和近红外光源来测试仪器性能,可避免背景辐射干 扰,具有便利性,可间接体现系统性能。测试采用卤 素灯光源与窄带滤光片组合输出波长为 830 nm、带 宽为 10 nm 的近红外光线,光源前有毛玻璃(匀光 作用)并尽量靠近狭缝,使进入分光成像系统的光线 足够充满孔径。测试所用探测器为小像元 CCD 探 测器,像元尺寸为 5.5 μm。探测器采集 830 nm 波 长的高级次衍射谱,如图 11 所示,其中 FWHM 为 半峰全宽,该波长-4和-5衍射级具有较强能量, 对应中波红外的 3320 nm 和 4150 nm 谱线。通过 提取谱线质心坐标计算系统线色散率,线色散率乘



图 10 样机光谱性能测试装置 Fig. 10 Spectral performance test setup of prototype

#### 第 41 卷 第 11 期/2021 年 6 月/光学学报

以实际像元光谱维尺寸即为光谱采样间隔;通过计 算特征谱线空间维质心位置与理想质心位置的偏 差,可以计算得到谱线弯曲值;使用平行光管和显微 镜头,在狭缝处生成宽波段点光源,分别采集点光源 位于狭缝两端和中心处的点色散线,计算狭缝两端 和中心处点色散线的斜率差值,再乘以色散宽度得 到色畸变值<sup>[13]</sup>。测试结果如表 6 所示,两个谱面的 光谱采样间隔分别为 50 nm 和 49.9 nm,最大谱线 弯曲为 1.5  $\mu$ m,占 4.7% 像元,最大色畸变为 0.6  $\mu$ m,占 2.5% 像元,均满足指标要求。



- 图 11 830 nm 高级次谱线
- Fig. 11 Advanced sub-spectrum lines at 830 nm

	表 6	样机光谱性能测试结	課
--	-----	-----------	---

Table 6 Spectral performance test results of prototype

Parameter	IMAG1	IMAG2
Spectral sampling distance /nm	50.0	49.9
Max smile $/\mu m$	1.2	1.5
Max keystone $/\mu m$	0.6	0.6
MTF@632.8 nm@-6th	0.00	0.01
order@21 lp/mm	0.83	0.81

借助传函仪测试样机调制传递函数,以 632.8 nm 波长光线的-6级衍射谱作为测试对象, 谱面1上不同视场奈奎斯特频率处 MTF 最低为 0.83,谱面2上 MTF 最低为 0.81,接近衍射极限 (632.8 nm 衍射极限为 0.84)。该测试结果表明, 样机在中波红外波段同样具有优的分光成像性能。

# 5 结 论

从静止轨道特点和技术要求出发,分析了中波 红外成像光谱仪光学系统指标参数,为满足宽幅要 求,设计了狭缝长、体积紧凑、适于拼接的双狭缝 Offner型分光成像系统。为提高系统灵敏度,采用 整机制冷的方式来抑制背景辐射,分析了噪声等效 温差与制冷温度的关系,并对分光成像系统进行消 热差设计。根据光学设计结果研制了原理样机,采 用可见光和近红外光源进行了光谱采样间隔、谱线 弯曲、色畸变、调制传递函数等分光成像性能的测 试,测试结果满足指标要求。

## 参考文献

[1] Krimchansky A, Machi D, Cauffman S A, et al. Next-generation geostationary operational environmental satellite (GOES-R series): a space segment overview [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5570: 155-164.

- [2] Aminou D M A, Jacquet B, Pasternak F, et al. Characteristics of the meteosat second generation (MSG) radiometer/imager: SEVIRI[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3221: 19-31.
- [3] Vaillon L, Schull U, Knigge T, et al. Geo-oculus: high resolution multi-spectral earth imaging mission from geostationary orbit [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10565: 105651V.
- [4] Tufillaro N, Davis C O, Valle T, et al. Behavioral model and simulator for the multi-slit optimized spectrometer (MOS) [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8870: 88700E.
- [5] Fishman J, Iraci L, Al-Saadi J, et al. The United States' next generation of atmospheric composition and coastal ecosystem measurements: NASA's geostationary coastal and air pollution events (GEO-CAPE) mission [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(10): 1547-1566.
- [6] Chrisp M P. Wide swath imaging spectrometer utlizing a multi-modular design: US7808635 [P]. 2010-10-05.
- [7] Wang S F. Theory and application of information optics [M]. Beijing: Beijing Posts and Telecommunications Press, 2010.
  王仕璠.信息光学理论与应用[M].北京:北京邮电大学出版社,2010.
- [8] Blanco X P, Orille C M, Couce B, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. Optics Express, 2006, 14(20): 9156-9168.
- [9] Zhu J C, Shen W M. Compact anastigmatic long-slit spectrometer[J]. Journal of Infrared and Millimeter

第 41 卷 第 11 期/2021 年 6 月/光学学报

Waves, 2019, 38(4): 542-548. 朱嘉诚, 沈为民. 紧凑型消像散长狭缝光谱仪光学系统[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(4): 542-548.

[10] Yang F Z, Chen X H, Zhao Z C, et al. Visibleinfrared imaging spectrometer for the exploration of asteroids [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0722002.
杨福臻,陈新华,赵知诚,等.面向小行星探测的可 见-红外光谱成像光学系统[J].光学学报, 2020, 40

(7): 0722002.
[11] Zhu J C, Zhao Z C, Shen S, et al. Analysis on NETD of thermal infrared imaging spectrometer[C]// 5th International Symposium of Space Optical Instruments and Applications, September 5-7, 2018, Beijing, China. Berlin: Springer, 2018, 232: 1-9.

- [12] Beier M, Hartung J, Kinast J, et al. Fabrication of metal mirror modules for snap-together VIS telescopes [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9633: 963313.
- [13] Mouroulis P Z, McKerns M M. Pushbroom imaging spectrometer with high spectroscopic data fidelity: experimental demonstration[J]. Optical Engineering, 2000, 39(3): 808-816.