

红外双波段成像光谱仪光学系统的设计与分析

贾文波, 秦天翔, 黄蕴涵, 吕知洋, 刘智颖*

长春理工大学光电工程学院, 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为在复杂环境下实现目标的高精度、高分辨率探测与识别, 基于红外双波段成像光谱仪的准确性高、虚警率低的优点, 针对像元大小为 $25\ \mu\text{m}$ 、阵列尺寸为 $384\ \text{pixel} \times 288\ \text{pixel}$ 的制冷型双色量子阱红外探测器, 设计了一款红外双波段共像面成像光谱仪。由于红外双波段系统的谱段较宽, 色差难校正, 所以前置望远物镜采用的是离轴两反系统。光谱分光系统采用谱线弯曲较小的 Offner 凸面光栅结构。为了获得更高的光谱分辨率和衍射效率, 同时为了更有效地利用探测器, 对光栅的双衍射级次进行设计, 中波波段和长波波段分别采用二级衍射和一级衍射进行分光。为了减小到达探测器的杂散光对成像结果的影响, 设计了二次成像中继系统, 用以保证系统实现 100% 的冷光阑效率。为了更好地进行光瞳衔接匹配, 各部分系统均实现了远心性。最终系统的成像结果显示, 点列斑均方根半径小于一个像元, 调制传递函数接近衍射极限, 没有明显的冷反射现象, 成像质量较好, 符合红外双波段成像光谱仪的设计要求。

关键词 光学设计; 成像光谱仪; 红外双波段; Offner 结构; 光谱分辨率

中图分类号 TH744.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2311002

1 引言

成像光谱仪的优点为图谱合一, 可以同时采集地物地貌特征和光谱特征^[1], 在目标探测和识别、军事遥感等领域具有重要用途^[2-5]。对于复杂的探测环境, 红外双波段探测具有明显优势。中波红外系统主要用于观测温度较高的目标, 不仅可用于观测高温物体的辐射光谱特征, 而且在湿热环境下进行观测的优势更加明显; 长波红外系统主要用于观测常温物体, 形成物体的轮廓影像, 在靠近热源和存在杂散辐射的情况下, 长波红外的侦察能力更强^[6-7]。因此, 红外双波段光谱成像技术在军事和民用领域均具有重大意义。

双波段光谱仪主要有两种结构形式, 一种是能分别响应不同波段的两个探测器共用一个望远物镜系统, 另一种是能响应两个波段的双色探测器实现完全共光路系统^[8-9]。2000 年, 美国航空航天局研制出了 Hyperion 成像光谱仪^[10], 该仪器的两套光谱系统共用一个前置望远系统; 在光谱系统的入射狭缝后安装

分光镜, 将光束分为可见近红外(400~1000 nm)和短波红外(1000~2500 nm)两个通道, 通过两套光谱系统实现双波段探测。2014 年, 德国空间中心主导研制的 HSI(Hyperspectral Instrument)^[11]中的望远系统采用离轴三反结构, 光线经视场分离器后分别进入可见近红外(420~1000 nm)和短波红外(1000~2450 nm)两个 Offner 结构通道, 在 Offner 的主镜和三镜前安装曲面棱镜作为色散元件; 该系统同样通过两套光谱系统实现双波段探测。2004 年, LeVan 等^[12]基于双波段红外焦平面阵列设计了一款红外中波和长波双波段双衍射级次共光路平面光栅成像光谱仪, 其输入 F 数为 2.3, 输出 F 数为 4, 工作波段为中波 $3.5\sim 6\ \mu\text{m}$ (二级衍射)和长波 $7\sim 12\ \mu\text{m}$ (一级衍射)。2010 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张浩等^[13]在 LeVan 等工作的基础上, 利用 Offner 结构凸面光栅的双衍射级次, 设计了中长波红外双衍射级次共路 Offner 成像光谱仪; 其工作波段为 $3\sim 6\ \mu\text{m}$ (二级衍射)和

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-04-16; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61805025, 61705018)、吉林省科学技术发展项目(20200401055GX)、北京信息科技大学光电测试及仪器教育部重点实验室资助项目(OMTIKF2020001)

通信作者: *lzyecccc@126.com

6~12 μm(一级衍射)。由于采用双探测器的光学系统的体积较大、成本较高,所以双波段共光路系统的研究越来越重要。本文对红外双波段成像光谱仪的整体进行了设计,在设计过程中采用模块化思想,将光谱仪的三个部分分别进行设计;然后将各部分衔接匹配成一个整体,通过光学设计软件进行优化,最终较好地获得了目标红外双波段的光谱信息。本设计可以实现红外探测系统的探测搜索功能。

2 红外双波段成像光谱仪的组成与主要参数

红外双波段成像光谱仪由前置望远物镜、Offner 光谱分光系统和中继系统三部分组成。本研究团队针对一款制冷型双色量子阱红外探测器设计了一个 F 数为 2.5 的红外双波段共像面成像光谱仪,其探测器的像元大小为 25 μm,阵列尺寸为 384 pixel × 288 pixel,工作波段分为中波(4.4~5.4 μm)和长波(7.8~9.2 μm)两个波段。该系统的设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统的设计参数

Table 1 Design parameters of proposed optical system

Parameter	Value
Wavelength / μm	4.4~5.4, 7.8~9.2
F number	2.5
Distortion / %	<1
Spatial resolution / mrad	0.1
Detector array size / (pixel × pixel)	384 × 288
Detector pixel size / (μm × μm)	25 × 25
Dispersion width / mm	7.2

3 红外双波段成像光谱仪系统的设计原理

3.1 前置望远物镜的设计原理

反射式望远物镜由于不存在色差而被广泛应用于红外成像光谱仪中。反射式系统主要包括共轴两反、离轴两反和离轴三反系统。共轴两反系统存在中心遮拦,不仅影响进入系统的光通量,还会降低整个系统的成像质量;离轴三反系统的自由度较多,不利于系统的装调和检测;离轴两反系统的自由度较少,并且具有无遮拦、大视场、高像质和轻量化等特点。综合考虑后,本文采用离轴两反系统进行设计。

3.2 Offner 光谱分光系统的设计原理

将反射式 Offner 中继系统的第二块反射镜更换为凸面光栅便成为 Offner 型光谱分光系统,该系统为同心三反系统,满足罗兰圆结构;该系统的三级

赛德尔像差可自动校正,谱线弯曲和色畸变均较小,具有良好的光学性能。Offner 光谱分光系统的结构如图 1 所示。Offner 中继结构中的 M_1 和 M_3 是同一个反射镜的两个部分。由于引进凸面光栅带来的不对称性^[14]破坏了 Offner 系统的远心性,所以在 Offner 光谱分光系统中将反射镜分为两个小凹面镜,用来保证系统的远心性。设凹面镜 M_1 、 M_3 的半径分别为 R_1 、 R_3 ,凸面光栅 G_2 的半径为 R_2 。 C 为三个元件共同的球心,光栅刻线方向垂直于主平面, O 为入射狭缝的中心点, I 为出射狭缝的中心点, A 、 H 、 B 分别为入射光线的主光线在 M_1 、 G_2 、 M_3 上的入射点,入射光线的主光线和出射光线的主光线平行,且均垂直于物像平面,形成远心系统。光栅 G_2 的入射角为 θ_2 ,衍射角为 θ'_2 ,球面镜 M_1 的入射角为 θ_1 ,球面镜 M_3 的出射角为 θ_3 。

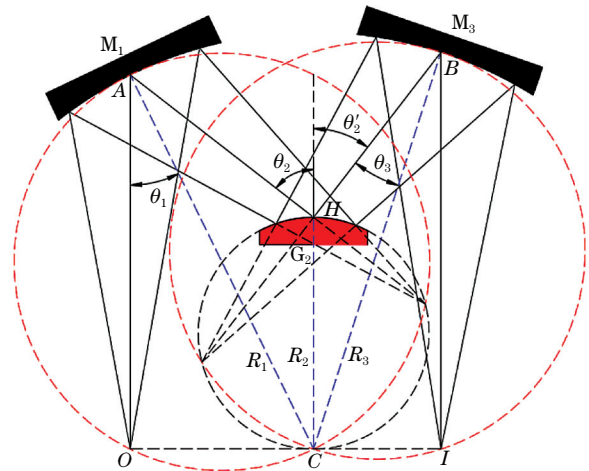


图 1 Offner 光谱分光系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of Offner spectroscopic system

对于 Offner 型光谱分光系统而言,像散为其主要像差,因此,本文采用中心波长消像散的方法来确定系统的初始结构。

由文献[5]可知凸面光栅的曲率半径 R_2 为

$$R_2 = h_{\text{spec}} / (mn \Delta \lambda), \quad (1)$$

式中: h_{spec} 为光谱色散宽度; m 为衍射级次, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; n 为光栅的线密度; $\Delta \lambda$ 为光谱范围。

光栅满足 Bragg 关系的色散方程,即

$$\sin \theta'_2 = \sin \theta_2 - mn \lambda. \quad (2)$$

离轴物点经凸面光栅所成的子午像点和弧矢像点满足方程

$$\frac{\cos^2 \theta_2}{r} + \frac{\cos^2 \theta'_2}{r'_{M3}} = \frac{\cos \theta_2 + \cos \theta'_2}{R_2}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'_{S3}} = \frac{\cos \theta_2 + \cos \theta'_2}{R_2}, \quad (4)$$

式中: r 为入射光到 M_1 表面参考点的距离; r'_{M3} 和

r'_{S3} 分别为子午面和弧矢面内的像点到 M_3 表面参考点的距离。

由于狭缝的中心点在子午方向上,因此 M_1 、 G_2 和 M_3 的物像都在罗兰圆上。根据图 1 中的几何关系可得

$$\sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2 / R_1 \quad (5)$$

$$\sin \theta_3 = R_2 \sin \theta'_2 / R_3, \quad (6)$$

$$l_{AH} = R_1 \cos \theta_1 - R_2 \cos \theta_2, \quad (7)$$

$$l_{BH} = R_3 \cos \theta_3 - R_2 \cos \theta'_2, \quad (8)$$

$$r = R_1 \cos \theta_1, \quad (9)$$

$$r'_{M3} = R_3 \cos \theta_3. \quad (10)$$

当系统在选定的中心波长处消像散时,

$$|r'_{M3} - r'_{S3}| = 0. \quad (11)$$

在已知光谱色散宽度、衍射级次和光谱范围的情况下,给定光栅的曲率半径 R_2 和光栅的入射角 θ_2 后,通过以上公式可以得到满足要求的初始结构。

3.3 中继系统的设计原理

制冷型红外双波段成像光谱仪需要对背景辐射的杂散光进行抑制,将制冷探测器的冷光阑作为整个光学系统的光阑可以有效降低背景辐射。由于光谱分光系统无法直接实现冷光阑匹配,所以需要设计二次成像中继系统。在设计时,由于光谱分光系统的放大倍率为 -1 ,所以中继系统相当于直接与望远物镜相匹配,其光路如图 2 所示。为了简化设计,

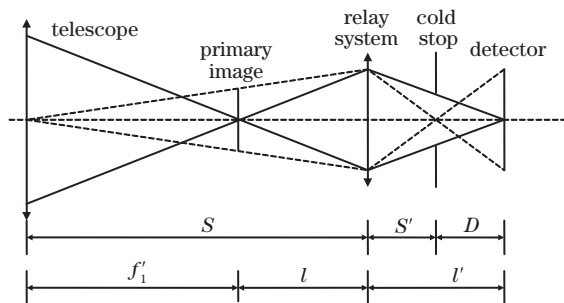


图 2 中继系统的结构图

Fig. 2 Structure diagram of relay system

中继系统的放大倍率 $\beta = -1$,根据高斯光学可以求得中继系统的焦距。最后对系统进行消色差设计,通过合理的玻璃组合和光焦度分配,可以得到满足设计要求的初始结构。

4 系统的设计与仿真

4.1 红外双波段成像光谱仪望远物镜光学系统设计

离轴两反系统是在共轴系统的基础上采用视场离轴的方法实现的,当光阑位于次镜的物方焦面时,可以实现远心系统。望远物镜的焦距可以由空间分辨率求得,计算公式为

$$\sigma = \frac{\delta}{f'_1}, \quad (12)$$

式中: σ 为空间分辨率; δ 为像元尺寸; f'_1 为系统焦距。

已知空间分辨率为 0.1 mrad ,像元大小为 $25 \mu\text{m}$,因此系统的焦距为 250 mm 。通过光学设计软件进行优化,最终得到的望远物镜的结构图如图 3 所示。望远物镜的点列图和调制传递函数(MTF)如图 4 所示。由图 4 可知,前置望远系统的成像质量良好,点列斑均方根半径小于一个像元,MTF 接近衍射极限,满足设计要求。

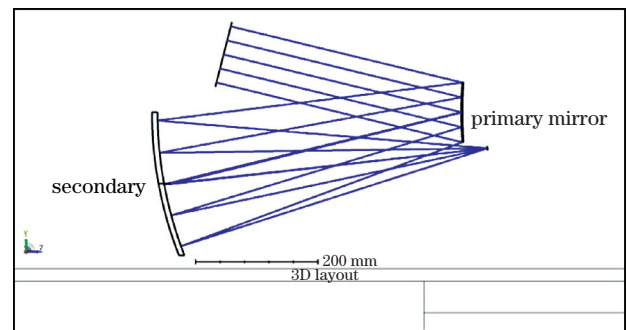


图 3 望远物镜结构图

Fig. 3 Structure of telescope objective

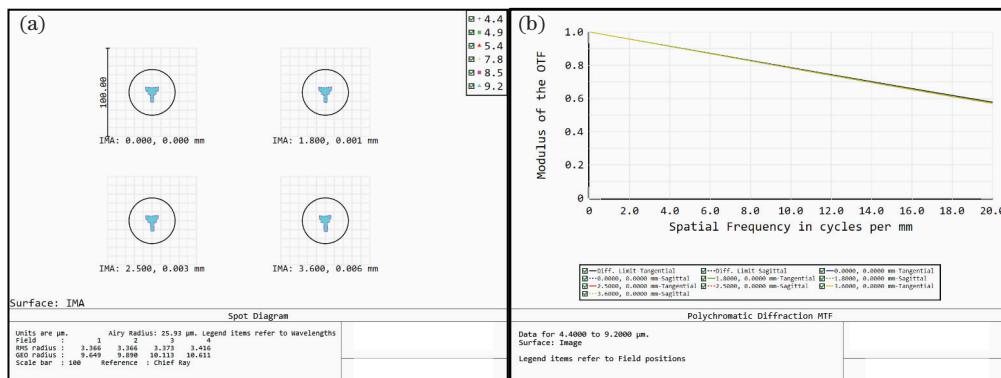


图 4 望远物镜的点列图和 MTF。(a)点列图;(b)MTF

Fig. 4 Spot diagram and MTF of telescope objective. (a) Spot diagram; (b) modulation transfer function (MTF)

4.2 红外双波段成像光谱仪的 Offner 光谱分光系统设计及衍射效率

4.2.1 红外双波段成像光谱仪 Offner 光谱分光系统设计

系统的光谱范围包括中波波段 $4.4 \sim 5.4 \mu\text{m}$ (二级衍射)和长波波段 $7.8 \sim 9.2 \mu\text{m}$ (一级衍射)。系统采用一级衍射进行设计,中波二级衍射对应长波一级衍射的光谱范围为 $8.8 \sim 10.8 \mu\text{m}$,所以系统设计时取光谱范围为 $7.8 \sim 10.8 \mu\text{m}$,中心波长为 $9.3 \mu\text{m}$ 。根据探测器的参数,取色散宽度为 7.2 mm 。假设光栅 G_2 的曲率半径为 240 mm ,光栅入射角 θ_2 为 26° ,由 3.2 节的(1)~(11)式可以计算出初始结构的基本参数。由(1)式求得光栅常数 $d = 100 \mu\text{m}$ 。最终优化的结构如图 5 所示。中波中心波长和长波中心波长的点列图如图 6 所示,MTF 曲线如图 7 所示。点列斑均方根半径均小于探测器的一个像元,MTF 在截止频率 20 lp/mm

处均接近衍射极限。系统的场曲和畸变如图 8 所示,场曲小于 0.1 mm ,畸变小于 0.002% ,成像质量较好。

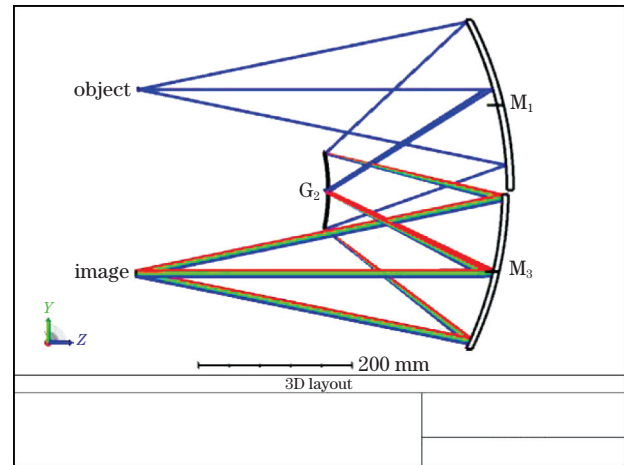


图 5 Offner 系统结构图

Fig. 5 Offner system structure diagram

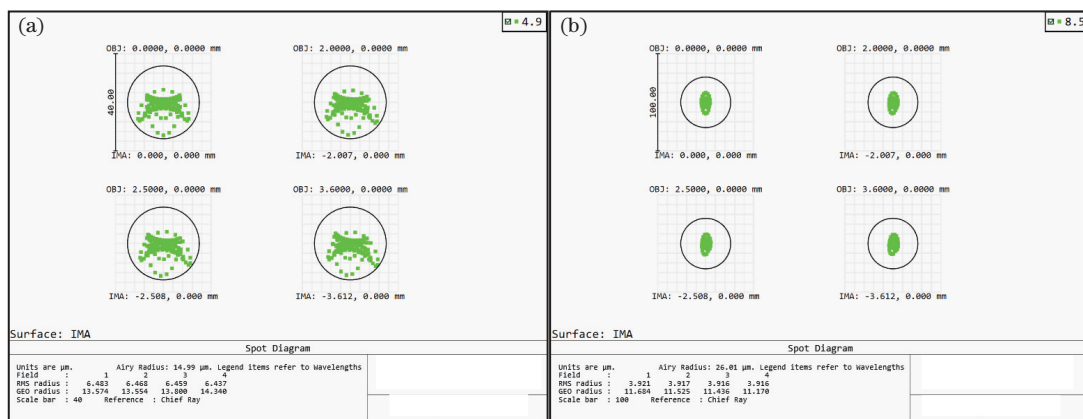


图 6 Offner 结构的点列图。(a)中波 $4.9 \mu\text{m}$; (b)长波 $8.5 \mu\text{m}$

Fig. 6 Spot diagrams of Offner structure. (a) Middle wave $4.9 \mu\text{m}$; (b) long wave $8.5 \mu\text{m}$

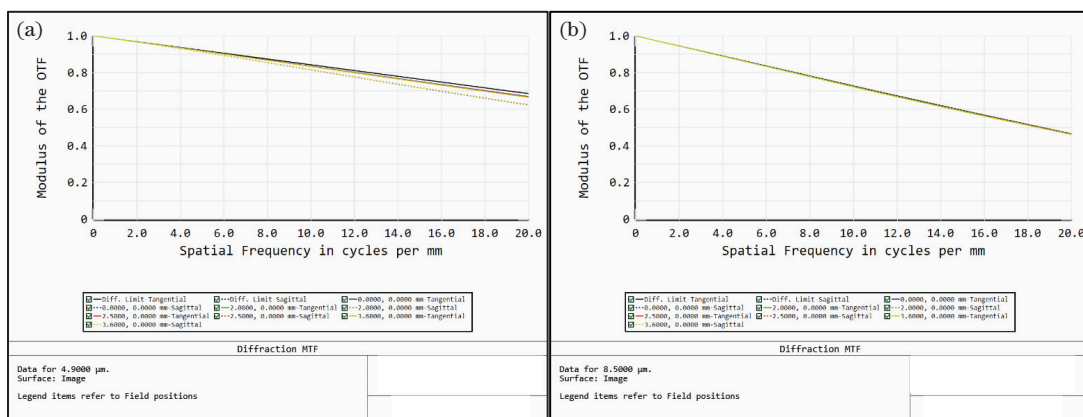


图 7 Offner 结构的 MTF。(a)中波 $4.9 \mu\text{m}$; (b)长波 $8.5 \mu\text{m}$

Fig. 7 MTF of Offner structure. (a) Middle wave $4.9 \mu\text{m}$; (b) long wave $8.5 \mu\text{m}$

4.2.2 红外双波段成像光谱仪的衍射效率

光栅的衍射效率是评价光栅光谱仪成像质量的

重要指标,双波段光栅的衍射效率更为重要。闪耀光栅由于衍射效率高而被广泛应用^[15-16],闪耀光栅

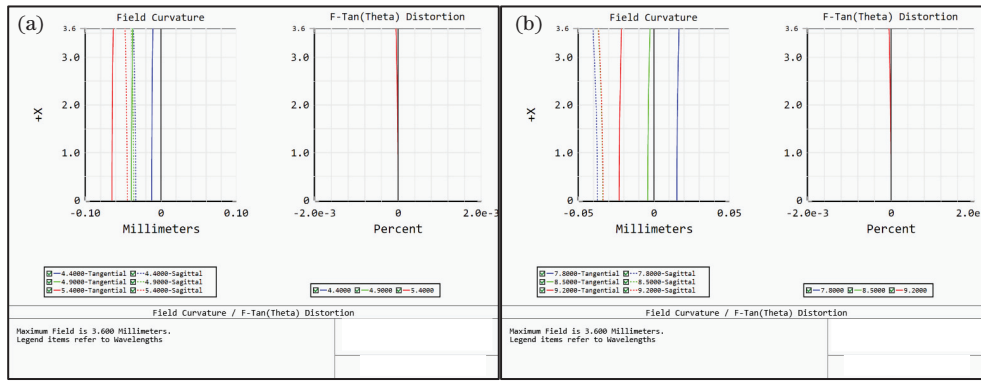


图 8 Offner 结构的场曲和畸变。(a)中波;(b)长波

Fig.8 Field curvature and distortion of Offner structure. (a) Middle wave; (b) long wave

结构如图 9 所示。假设光栅具有 N 个槽, 出射衍射光的强度分布为

$$I(x_1) = |U(x_1)|^2 = I_0 \text{sinc}^2[a(u - u_0 - \varphi)] \times \left\{ \frac{\sin[\pi N(u - u_0)d]}{\sin[\pi(u - u_0)d]} \right\}^2, \quad (13)$$

其中, $u = \frac{\sin \theta_m}{\lambda}, u_0 = \frac{\sin \theta_0}{\lambda}, \varphi = \frac{1}{\lambda} (\cos \theta_0 + \cos \theta_m) \times \tan \alpha$, 则衍射效率的计算公式为

$$\eta = \left(\frac{a}{d} \right)^2 \text{sinc}^2[a(u - u_0 - \varphi)] \times \left\{ \frac{\sin[\pi N(u - u_0)d]}{\sin[\pi(u - u_0)d]} \right\}^2. \quad (14)$$

当 $u - u_0 = \varphi$ 时, 第一个因子取得中央主极大, 此时 $\sin \theta_m - \sin \theta_0 = (\cos \theta_0 + \cos \theta_m) \tan \alpha$; (15)
当 $u - u_0 = m/d$ 时, 第二个因子取得主极大, 所以光栅的设计参数应该选取

$$\frac{1}{\lambda} (\cos \theta_0 + \cos \theta_m) \tan \alpha = \frac{m}{d}. \quad (16)$$

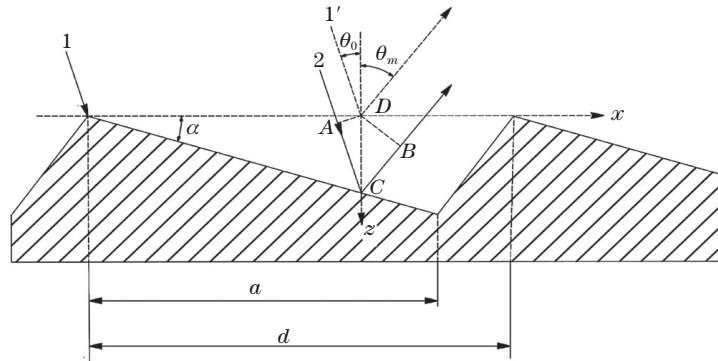


图 9 闪耀光栅示意图

Fig.9 Schematic of blazed grating

当闪耀波长 λ_0 为 $9.8 \mu\text{m}$, 入射角 θ_2 为 $26^\circ, 3.22^\circ$ 。以 λ 为变量, 根据(14)式绘制双衍射级次归一化的衍射效率曲线, 结果如图 10 所示。从图 10

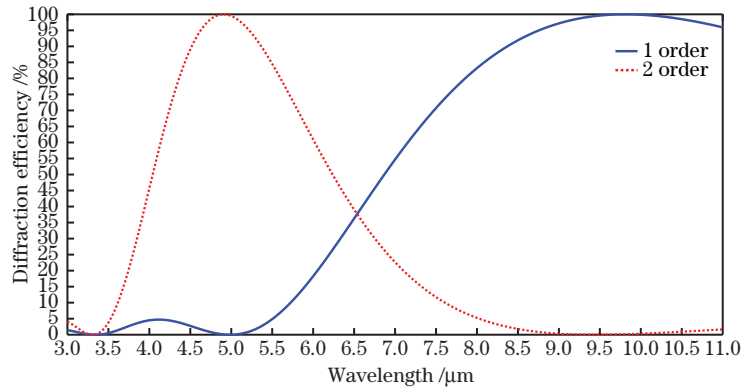


图 10 凸面光栅的衍射效率曲线

Fig.10 Diffraction efficiency of convex grating

中可以看出,凸面光栅在长波波段(7.8~9.2 μm)的衍射效率在 80% 以上,在中波波段(4.4~5.4 μm)的衍射效率在 85% 以上,系统的衍射效率较高。

4.3 红外双波段成像光谱仪中继系统的 optical 设计

中继系统为 1:1 结构,透镜材料为 Ge、ZnSe、ZnS 与 Ge。对系统进行消色差设计,最终优化的结构如图 11 所示,其中透镜 2 和透镜 5 的后表面为偶次非球面。中继系统的点列图和 MTF 如图 12 所示,点列斑均方根半径小于一个像元,MTF 接近衍射极限。

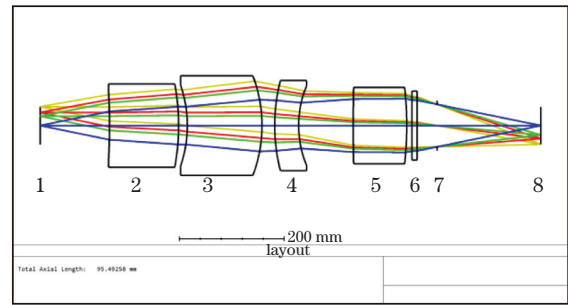


图 11 中继系统结构图(1:物面,2~5:透镜,6:保护玻璃,7:冷光阑,8:像面)
Fig.11 Structure of relay system (1: object plane, 2-5: lens, 6: protective glass, 7: cold stop, 8: image plane)

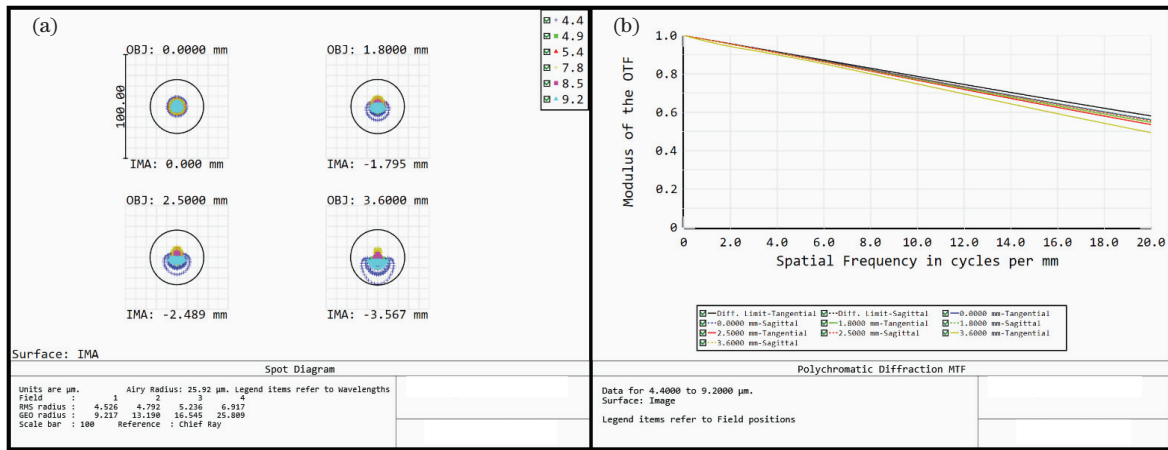


图 12 中继系统的点列图和 MTF。(a)点列图;(b)MTF

Fig.12 Spot diagram and MTF of relay system. (a) Spot diagram; (b) MTF

4.4 红外双波段成像光谱仪的整体系统

将前置望远物镜、Offner 光谱分光系统和中继系统三部分拼接后的整体系统结构如图 13 所示。整体系统在中心波长处的点列图和 MTF 分别如图 14 和图 15 所示,中波中心波长下的 5 nm 分辨率图和长波中心波长下的 10 nm 分辨率图如图 16 所示,场曲和畸变如图 17 所示。

由图 14 和图 15 所示的点列图及 MTF 图可以

看出,整体系统的点列斑均方根半径均小于探测器的一个像元,MTF 接近衍射极限,成像质量较好。由图 16 可知,红外双波段成像光谱仪在中心波长 4.9 μm 和 8.5 μm 处的光谱分辨率均优于 10 nm。由图 17 可知,系统的畸变小于 1%,满足设计要求。通过以上分析可以看出,红外双波段成像光谱仪的整体成像质量较好,符合红外双波段成像光谱仪的设计要求。

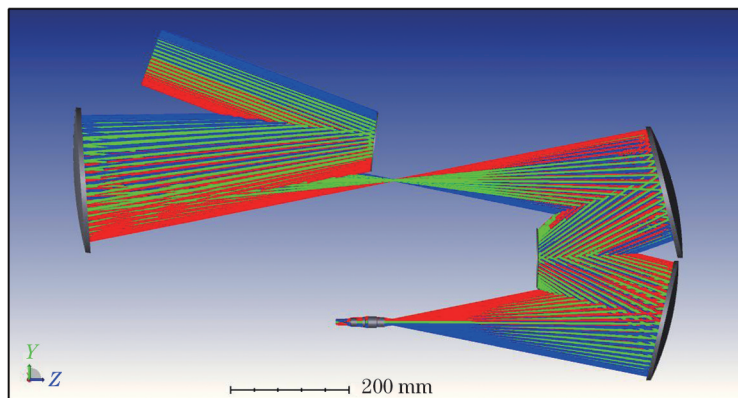


图 13 整体系统的结构图

Fig.13 Structure diagram of overall system

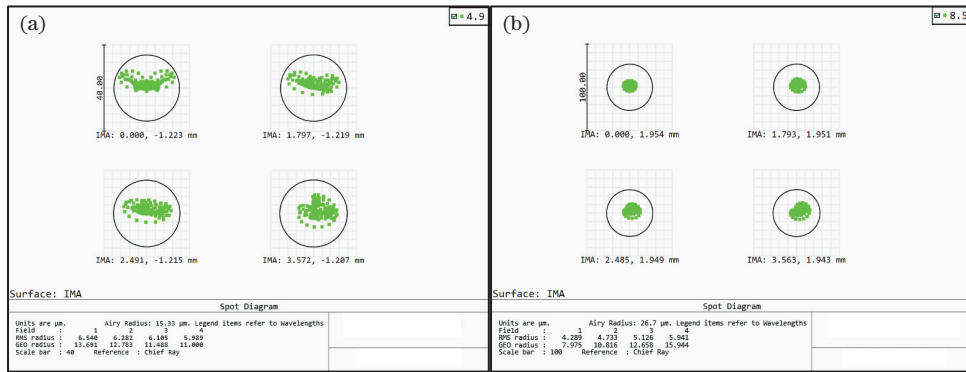


图 14 整体系统的点列图。(a)中波 4.9 μm; (b)长波 8.5 μm

Fig. 14 Spot diagrams of overall system. (a) Middle wave 4.9 μm; (b) long wave 8.5 μm

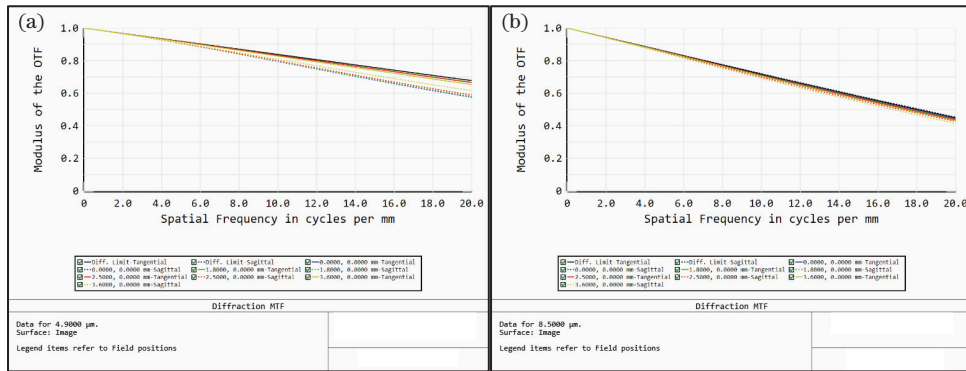


图 15 整体系统的 MTF。(a)中波 4.9 μm; (b)长波 8.5 μm

Fig. 15 MTF of overall system. (a) Middle wave 4.9 μm; (b) long wave 8.5 μm

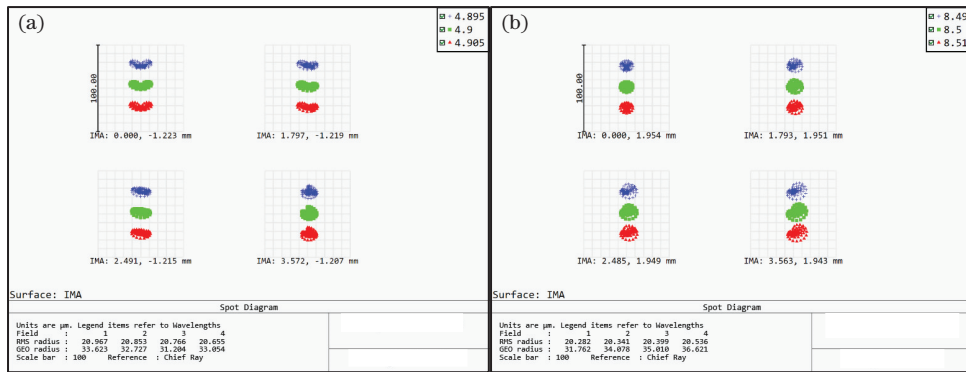


图 16 光谱分辨率图。(a)中波; (b)长波

Fig. 16 Diagrams of spectral distinguishability. (a) Middle wave; (b) long wave

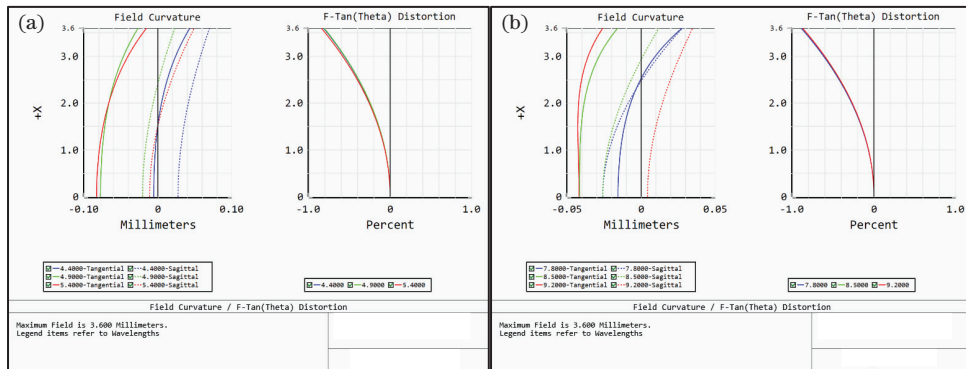


图 17 整体系统的场曲和畸变。(a)中波; (b)长波

Fig. 17 Field curvature and distortion of overall system. (a) Middle wave; (b) long wave

5 系统的冷反射分析

制冷型红外光谱系统由于探测器表面温度与环境温度相差较大,探测器辐射出的冷光线经光学系统反射后再次成像于探测器表面会出现冷反射现象^[17]。冷反射现象会导致探测器的灵敏度降低,对成像质量造成影响。评价系统冷反射发生的概率主要看系统的 YNI 和 I/IBAR 这两个参数的大小,满足其中一个参数的绝对值大于 1,便不会发生明显的冷反射现象。当两个参数的绝对值均小于 1 时,需要对系统进行反向追迹,观察反射光线能否重新会聚在探测器上。由于反射式系统不存在冷反射现象,所以对系统中的透射式系统即中继系统进行冷反射分析。中继系统的结构如图 11 所示。光学系统的冷反射参数如表 2 所示。

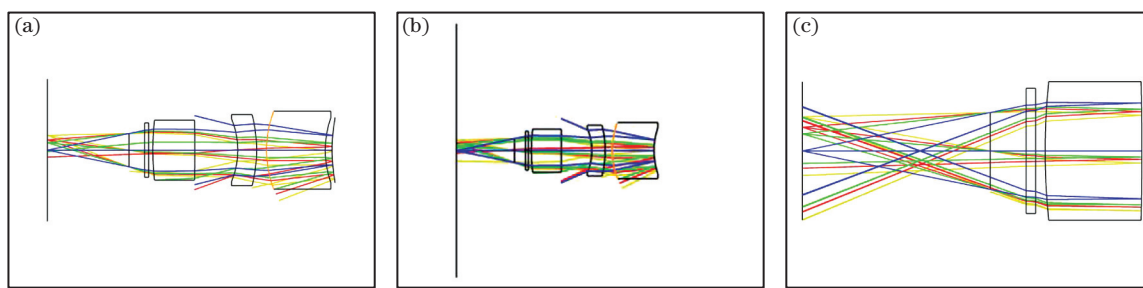


图 18 冷反射反向追迹。(a)第 2 面;(b)第 3 面;(c)第 7 面

Fig. 18 Narcissus reverse ray tracing. (a) Surface 2; (b) surface 3; (c) surface 7

第 2、3、7 面上的反射光线不会在探测器上会聚形成亮斑,故系统没有明显的冷反射现象。

6 结 论

基于制冷型双色量子阱红外探测器的特点,本研究团队设计了一款红外双波段共像面光谱成像系统。基于模块化设计方法,将前置望远物镜、光谱分光系统和中继系统分别进行设计。前置望远物镜为离轴两反系统,空间分辨率为 0.1 mrad。光谱分光系统采用 Offner 凸面光栅结构形式,凸面光栅采用双衍射级次,中波波段(4.4~5.4 μm)采用二级衍射,长波波段(7.8~9.2 μm)采用一级衍射。此外,对光栅的衍射效率进行了分析。三个系统通过光瞳衔接匹配实现了制冷型红外双波段成像光谱仪的整体设计,系统整体结构紧凑,相对孔径较大(F 数为 2.5),光谱范围宽,全视场全波段内的点列斑均方根半径均小于探测器的一个像元,双波段的分辨率优于 10 nm,畸变小于 1%,MTF 在截止频率 20 lp/mm 处接近衍射极限,系统没有明显的冷反射现象,双波段衍射效率均在 80% 以上,成像质量较好,满足红

表 2 系统的冷反射参数

Table 2 Narcissus parameters of system

Surface	YNI	I/IBAR
1	0.49	-5.526
2	-0.32	0.294
3	-0.54	0.425
4	-1.11	0.708
5	0.47	-1.127
6	1.25	80.985
7	0.38	-0.591
8	-1.41	1.427
9	-0.99	1.123
10	-0.98	1.123

从表 2 所示的冷反射参数中可以看出,系统在第 2、3、7 面上的 YNI 值和 I/IBAR 值的绝对值均小于 1,容易发生冷反射现象。对第 2、3、7 面进行反向追迹,追迹结果如图 18 所示。由图 18 可知在

外双波段成像光谱仪的设计要求。

参 考 文 献

- [1] Zeng C B, Liu B, Xia Z D, et al. Optimal design of spectroscopic structure based on prism-grating combination[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2105001.
曾朝斌, 刘宾, 夏正德, 等. 棱镜-光栅组合分光结构参数的优化方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2105001.
- [2] Yang T T, Chen X H, Zhao Z C, et al. Fast alignment of an Offner imaging spectrometer using a spherical autostigmatic method[J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1324-1331.
杨拓拓, 陈新华, 赵知诚, 等. Offner 分光成像系统的球面自准直法快速装调[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1324-1331.
- [3] Zheng Z Z, Yang Z, Qin Y T, et al. Structure analysis and experiment of an Offner-type short-wave infrared imaging spectrometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 053001.
郑志忠, 杨忠, 秦远田, 等. Offner 型短波红外成像光谱仪的结构分析与实验[J]. 激光与光电子学进

- 展, 2020, 57(5): 053001.
- [4] Chen W, Zheng Y Q, Xue Q S. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 15-21.
陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 15-21.
- [5] Tong Y J, Wu G, Zhou Q, et al. Design method of Offner-type imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1148-1152.
佟亚军, 吴刚, 周全, 等. Offner 成像光谱仪的设计方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1148-1152.
- [6] Ma Y L, Liu W Z, Wang W S. Optical system design of a new type infrared dual-band seeker [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7544: 75443X.
- [7] Pan Z F, Liu S, Zhang P. Design of a dual-band / dual-FOV infrared telescope [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(9): 71-75.
潘枝峰, 刘莎, 张鹏. 红外双波段/双视场望远系统设计[J]. *电光与控制*, 2014, 21(9): 71-75.
- [8] Yang X J, Wang Z Q, Sun Q, et al. Optical system design for a dual-band space imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1): 50-54.
杨新军, 王肇圻, 孙强, 等. 空间双波段成像光谱仪红外光学系统的设计[J]. *光子学报*, 2005, 34(1): 50-54.
- [9] Jiang L, Hu Y, Dong K Y, et al. Passive athermal design of dual-band infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3353-3357.
江伦, 胡源, 董科研, 等. 红外双波段光学系统被动式消热差设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3353-3357.
- [10] Pearlman J S, Barry P S, Segal C C, et al. Hyperion, a space-based imaging spectrometer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1160-1173.
- [11] Sacks J D, Lloyd J M, Zhu Y, et al. The environmental benefits mapping and analysis program-community edition (BenMAP-CE): a tool to estimate the health and economic benefits of reducing air pollution [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 104: 118-129.
- [12] LeVan P D, Jepson D M. Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 3045-3054.
- [13] Zhang H, Fang W, Ye X, et al. Dual-order overlapped Offner imaging spectrometer in middle- and long-wave infrared regions [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 965-974.
张浩, 方伟, 叶新, 等. 中/长波红外双衍射级次共路 Offner 成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 965-974.
- [14] Xue Q S, Lin G Y, Song K F. Optical design of spaceborne shortwave infrared imaging spectrometer with wide field of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(5): 20114005.
薛庆生, 林冠宇, 宋克非. 星载大视场短波红外成像光谱仪光学设计[J]. *光子学报*, 2011, 40(5): 20114005.
- [15] Yang F Z, Chen X H, Zhao Z C, et al. Visible-infrared 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.
- [16] Liu Q, Wu J H, Guo P L, et al. Fabrication of convex blazed grating with high diffraction efficiency [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0313001.
刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0313001.
- [17] Yang M, Xu W B, Tian Y Z, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1511001.
杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1511001.

Design and Analysis of Optical System of an Infrared Dual-Band Imaging Spectrometer

Jia Wenbo, Qin Tianxiang, Huang Yunhan, Lü Zhiyang, Liu Zhiying^{*}
School of Opto-Electronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract

Objective An imaging spectrometer is the fusion of imaging technology and spectral technology that uses multiple channels to detect targets. We can obtain spatial information and spectral information on the target at the same time. According to the different spectral characteristics of different objects, targets can be identified and analyzed in detail to obtain more comprehensive data. An infrared dual-band imaging spectrometer can detect and recognize targets with high precision and resolution in a complex environment. It also has the advantages of high accuracy and low false alarm rate. A middle wave infrared imaging spectrometer is used to detect the spectrum of radiation from high-temperature objects. It is mainly used to detect volcanic activity and red alert for forest fires in civil use. It can be used in the military field to detect high-temperature exhaust gas from aircraft and tanks. A long wave infrared imaging spectrometer is used to detect objects at normal temperatures. It is very useful in mineral resource exploration and atmospheric gas detection. It is also used in the military to identify camouflaged targets with strong stray radiations. Therefore, research on infrared dual-band spectral imaging technology is of great significance to the development of military and civilian fields.

Methods The front telescope objective system, the spectral spectroscopic system, and the secondary imaging relay system of the infrared dual-band common image plane imaging spectrometer were designed using the modular design method. Because the infrared dual-band system had wide spectra and chromatic aberration was difficult to correct, the front telephoto objective adopted an off-axis two-mirror system with few degrees of freedom. The spectroscopic system adopted an Offner convex grating structure with less smile. We designed the diffractive order of the system. The diffractive order of the middle wave band was second order, and the diffractive order of the long wave was first order. The dual diffraction orders could obtain a better spectral resolution, and make more effective use of the detector in the meantime. The blazed wavelength of the convex grating was the center wavelength of the middle wave band, which could ensure a high diffraction efficiency for both bands. To reduce the influence on the imaging results of stray light reaching the detector, we designed the secondary imaging relay system to ensure that the optical system showed 100% cold-stop efficiency. Each part of the system had telecentricity. Through pupil connection and matching, the overall system design was completed. The imaging quality of the system was evaluated and analyzed through the spot diagram, modulation transfer function (MTF) curve, and distortion curve. We analyzed the narcissus phenomenon of the system. Through real ray tracing, the values of YNI and I/IBAR were obtained for each surface of the transmission system. If one of the parameters is greater than 1, no obvious narcissus will occur. If the values of the two parameters are both less than 1, it is necessary to analyze the narcissus phenomenon further through reverse tracing.

Results and Discussions The finally designed infrared dual-band common image plane imaging spectrometer has good imaging quality. The spectral resolution of the imaging spectrometer is high, the spectral resolution of the center wavelength of the middle wavelength band is better than 5 nm, and the spectral resolution of the center wavelength of the long-wavelength band is better than 10 nm (Fig. 16). We design the blaze wavelength of the convex grating to ensure the dual-band diffraction efficiency of the imaging spectrometer is relatively high and the diffraction efficiency of the middle wave band and the long wave band are both higher than 80% (Fig. 10). The narcissus phenomenon of the refrigerated imaging spectrometer was analyzed and the results showed that the system had no obvious narcissus phenomenon (Fig. 18).

Conclusions In this paper, an infrared dual-band common image plane imaging spectrometer was designed for the refrigerated dual-color quantum-well infrared detector. The pixel size of the detector is 25 μm , the array size is

384 pixel \times 288 pixel , and the working spectral range includes middle wave 4.4–5.4 μm and long wave 7.8–9.2 μm , F number is 2.5. Through the modular design method, the front telephoto objective system, Offner spectroscopy system, and relay system are designed separately. The front telephoto objective system is an off-axis two-mirror system with a spatial resolution of 0.1 mrad. The dual-band diffraction efficiency of the Offner spectroscopy system is higher than 80%, and the smile and keystone are small. The relay system achieves 100% cold-stop efficiency. The three systems compose the overall design of the refrigerated infrared dual-band imaging spectrometer through pupil connection and matching. The design results show that, in the full wavelength band and full field of view, the root mean square radius of the spot diagram is smaller than the size of a single pixel of the detector, the modulation transfer function is close to the diffraction limit, the spectral resolution is better than 10 nm, the distortion is less than 1%, and there is no obvious narcissus phenomenon. The imaging quality of the system is good, which meets the design requirements of the infrared detection system.

Key words optical design; imaging spectrometer; infrared dual-band; Offner structure; spectral resolution

OCIS codes 110.3080; 300.6340; 050.2770