

光谱维编码中红外光谱成像系统的光学设计

赵雨时, 贺文俊, 刘智颖, 付跃刚*

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 基于双 DMD 提出了一种光谱维编码的中波红外光谱成像系统, 利用空间维 DMD 完全补偿了光谱维编码 DMD 引起的像面倾斜。介绍了系统的组成和工作原理, 设计了焦距为 240 mm、 F 数为 3 的望远系统作为前置成像单元, 采用双光路 Offner 光栅成像系统配合光谱维编码 DMD 同时实现了光线的色散、编码和合光等多个功能, 设计了放大倍率为 1 的中继成像系统实现冷光阑匹配。通过整体优化设计实现了对双光路 Offner 光栅成像系统残余像差的补偿, 设计结果表明, 系统具有良好的空间成像和光谱性能, 作用距离满足设计要求。

关键词: 光学设计; 光谱成像; 编码孔径; 中波红外

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210700

Optical design of MWIR spectral imaging system encoding in spectral dimension

Zhao Yushi, He Wenjun, Liu Zhiying, Fu Yuegang*

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Dual-DMD based MWIR spectral imaging system encoding in spectral dimension was proposed, the tilt of image plane offset caused by the spectral encoding DMD was compensated by a DMD which in the spatial dimension. The composition and working principle of the system were introduced. As a front imaging unit, the telescopic system with a focal length of 240 mm and a F number of 3 was designed. The dual-pass Offner spectroscopic system and the spectral encoding DMD were used to realize multiple functions such as dispersion, encoding, and recombination. A relay imaging system with a magnification of 1 was designed to achieve strict matching of the cold stop. Through the integrated optimization design, the remaining aberrations of the dual-pass Offner spectroscopic system was compensated. The result of designing shows that the system has good spatial imaging and spectral performance, and the operating distance meets the design requirement.

Key words: optical design; spectral imaging; coded aperture; MWIR

收稿日期: 2021-09-22; 修订日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金 (61805025)

作者简介: 赵雨时, 男, 博士生, 主要从事光谱成像方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 付跃刚, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事仿生光学和光学测量等方面的研究。

0 引言

光谱成像技术是一种能够同时获取目标场景二维空间信息和一维光谱信息的技术,已被广泛应用于精细农业^[1-2]、资源探测^[3-5]、大气与海洋环境监测^[6-7]、医学诊断^[8]、军事侦察^[9]等多个领域。光谱成像系统根据信息获取方式,可以分为直接空间扫描式、直接波段扫描式及间接变换式等多种类型。直接空间扫描式光谱成像仪在某一瞬时只能获取一维空间信息和一维光谱信息,而另一维空间信息依赖光机扫描或搭载平台自身的运动扫描完成,如挥扫式^[10]、推扫式^[11],多用于机载或星载平台。直接波段扫描式光谱成像仪在某一瞬时只能获取二维空间信息,而光谱信息则需要对波段进行扫描完成,如滤光片式、声光可调滤光器(AOTF)式^[12]、液晶可调谐滤光片式^[13]等。间接变换式光谱成像仪则需要经过投影、规则或不规则变换等间接手段来获取空间和光谱信息,即需要对检测图像进行一定的变换处理,如空间投影变换^[14]、傅里叶变换^[15]、Hadamard变换^[16]等。

孔径编码光谱成像是一种新型的间接变换式光谱成像技术,可以通过少量的二维投影来感知三维空间的光谱数据立方体,具有光通量大、信噪比高、实时性好等优点。目前,孔径编码光谱成像系统主要分为两类:一类是在空间维度上进行编码的单色散孔径编码光谱成像仪^[17],另一类是在光谱维度上进行编码的双色散孔径编码光谱成像仪^[18]。数字微镜器件(DMD)作为一种理想的二进制编码器件,具有可多重编码、无运动部件、调制速率快等优点,其在孔径编码光谱成像系统中的应用得到了广泛关注^[19-21]。然而,无论是在空间维编码还是在光谱维编码,DMD的引入都会导致光谱成像系统的像面相对于光轴产生特定角度的倾斜,通常需要通过倾斜探测器来获得良好像质^[22]。但是,对于工作中波红外波段的孔径编码光谱成像仪,单纯倾斜探测器并不能解决上述问题,因为这样会导致光学系统与制冷型红外焦平面阵列的冷光阑无法实现严格匹配,严重的杂散辐射会降低信噪比,导致光谱成像仪性能的大幅降低。

文中基于双 DMD 设计了一种光谱维编码的中波红外光谱成像系统,通过在空间维增加一个微镜全开的 DMD,完全补偿了在光谱维上进行编码的 DMD 所

引入的像面倾斜。首先对系统的组成和工作原理进行了简要介绍,并给出了系统的设计指标要求,其次详细阐述了系统的光学设计方法、设计结果、以及像质评价,然后基于最小分辨温差(MRTD)估算了系统的作用距离,最后对工作进行了总结,给出了研究结论。

1 系统组成及工作原理

基于双 DMD 提出了一种在光谱维编码的中波红外光谱成像系统,该系统主要由望远系统、双光路 Offner 光栅成像系统、中继成像系统、两个 DMD 和制冷型中波红外探测器等几个部分组成,如图 1 所示。其中双光路 Offner 光栅成像系统由一个反射式凸面闪耀光栅和一个球面反射镜组成。

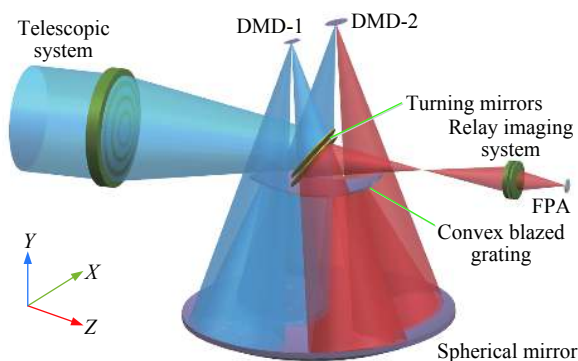


图 1 光谱维编码光谱成像系统光路示意图

Fig.1 Optical path diagram of spectral imaging system which encoded in spectral dimension

望远系统作为前置成像单元,主要实现对远处目标场景信息的获取,其焦距大小决定了整个系统的视场和空间分辨率等光学性能指标。来自目标场景的红外辐射光线经过望远系统,被折转平面镜反射后聚焦在 DMD-1 上,DMD-1 所有微镜单元均处于“开”态,将光线在 YZ 平面内反射 24°后进入双光路 Offner 光栅成像系统。DMD-1 位于望远系统的焦面位置,同时也与双光路 Offner 光栅成像系统的物面重合,主要用于补偿 DMD-2 所产生的像面倾斜。

光线经球面反射镜后到达凸面闪耀光栅,沿 X 方向产生色散,再次被球面反射镜反射后聚焦在 DMD-2 上,形成图谱混叠的色散像面。即来自同一物点的不同波长的像点被聚焦在 DMD-2 表面的不同位置,

通过控制 DMD-2 不同区域微镜单元的翻转状态就可实现对特定光谱通道的选通,也就是光谱维编码。被选通的光线被 DMD-2 在平行于 YZ 面的平面内反射 24°,再次经过双光路 Offner 光栅成像系统,被折转反射镜反射后到达像面实现不同波长光线的合光,即像面上得到的是无色散的目标场景图像。

DMD-1 和 DMD-2 均位于球面反射镜的球心附近,但沿着 X 方向有一定的偏心量。DMD-2 配合双光路 Offner 光栅成像系统一起同时实现对目标场景信息的色散、编码、合光等多个功能,因此,它是一个在光谱维度上进行编码的双色散孔径编码光谱成像系统。中继成像系统的作用是将双光路 Offner 光谱成像系统与制冷型中波红外探测器进行光瞳衔接,实现冷光阑严格匹配。

假设 DMD-2 所有微镜单元全部处于“开”态,且双光路 Offner 光栅成像系统和中继成像系统的放大倍率均为 1,则红外探测器采集的图像和 DMD-1 表面的图像完全相同,为全色二维空间图像。由此可见,在该系统中,二维空间信息由红外探测器直接获取,而光谱信息由 DMD-2 进行快速编码、调制和解码算法来获得。

系统的光学设计指标要求如表 1 所示,工作波长 3~5 μm ,作用距离不小于 3 km,空间分辨率优于 0.1 mrad。根据不同的应用场景,系统具有三种不同的光谱分辨率模式:100 nm 的高分辨率模式、200 nm 的中分辨率模式和 400 nm 的低分辨率模式。这三种模式仅仅体现在编码模板和解码复原算法上有差异,通过 DMD-2 加载不同的编码模板,可以实现三种模式的快速切换。光谱分辨率越高,则需要编码和解码的次数越多,光谱数据立方体的获取速度越慢,实时性越差。文中以高分辨率模式所要求的光谱分辨率指标进行光学系统设计,制冷型中波红外探测器采用

Telops 公司生产的 TEL-4666 型焦平面阵列,像素数为 640×512,像元尺寸为 15 μm ,F 数为 3.0,25 $^{\circ}\text{C}$ 时噪声等效温差 (NETD) 为 15.68 mK。两个 DMD 均选用德州仪器的 DLP9500,微镜数为 1 920×1 080,微镜尺寸为 10.8 μm ,微镜翻转角度为 $\pm 12^{\circ}$ 。

2 光学系统设计

光谱维编码中波红外光谱成像系统的光学设计主要包括望远系统、双光路 Offner 光栅成像系统以及中继成像系统的设计。在光学参数匹配的前提下,先分别独立设计这三个子系统,然后再组合进行整体优化设计,通过对系统参数进行微调实现像差校正,以获得更好的成像质量。

2.1 望远系统的设计

为了保证每个视场的主光线都可以垂直入射到 DMD-1 上,望远系统被设计为像方远心光路。考虑到 DMD 的有效使用面积与探测器焦平面尺寸的匹配关系,双光路 Offner 光栅成像系统和中继成像系统的放大倍率均被设计为 1,因此系统的空间分辨率主要与望远系统的焦距及红外探测器的像元尺寸相关:

$$\frac{15 \mu\text{m}}{f} \leq 0.1 \text{ mrad} \quad (1)$$

可得焦距 $f \geq 150 \text{ mm}$ 。考虑红外热成像的作用距离与大气传输特性有关,为保证在天气状况不好的情况下也能达到设定的作用距离,实际工程中对空间分辨率的设计必须预留一定的余量。按照工程经验,将望远系统的焦距设计为 240 mm。不同于传统的光谱成像仪,该系统没有狭缝,因此其视场主要由红外探测器的像面大小和焦距决定。红外探测器的像面尺寸为 9.6 mm×7.68 mm,则对角线 $L=12.3 \text{ mm}$,可计算出半视场角为:

$$\omega = \arctan\left(\frac{L}{2f}\right) = 1.47^{\circ} \quad (2)$$

为了抑制杂散辐射,每个子系统的 F 数都应该与红外探测器的 F 数严格相同,即都等于 3。可计算出望远系统的入瞳直径为 80 mm。望远系统的初始结构由焦距、视场和 F 数等技术参数决定。以像方远心和像面大小作为约束条件,利用点列图和调制传递函数 (MTF) 来评估优化过程中系统的成像质量,设计结果如图 2 所示。

表 1 光学系统的设计参数

Tab.1 Design paremeters of optical system

Parameter	Value
Wavelength range/ μm	3-5
F-number	3.0
Operating range/km	≥ 3
Spatial resolution/mrad	≤ 0.1
Spectral resolution/nm	100

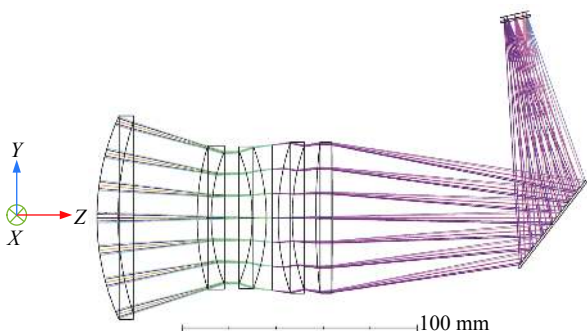


图 2 望远系统光路图

Fig.2 Layout of the telescopic system

望远系统由透射式结构实现,主要包括五片透镜、平面反射镜和 ZnS 窗口玻璃。为了满足 3~5 μm 宽光谱的应用需求,采用三片硅和两片锗透镜进行色差校正。平面反射镜绕 X 轴倾斜 39°,使光轴经过反射后向上旋转 78°,焦面与 Z 轴成 12°夹角以配合 DMD-1 实现其在双光路 Offner 光栅成像系统中的功能。

由于商用的 DMD 大多工作在可见光波段,其窗口玻璃在中波红外波段的透过率很低,因此将原始窗口玻璃更换为了厚度为 1 mm 的宽光谱 ZnS 窗口,并用分光光度计测试了镀增透膜的 ZnS 窗口的透过率,测试结果表明其在中波红外波段的平均透过率高于 97%。

望远系统的像质评价结果如图 3 所示。图 3(a)为各视场的点列图,所有视场的点斑都小于一个像元且在艾里斑内。红外探测器的像元尺寸为 15 μm ,其对应的奈奎斯特频率为 33.3 lp/mm。图 3(b)为 MTF 曲线,各视场 MTF 曲线均接近衍射极限,在奈奎斯特频率处的 MTF 值均大于 0.47,表明所设计的望远系统成像质量良好。

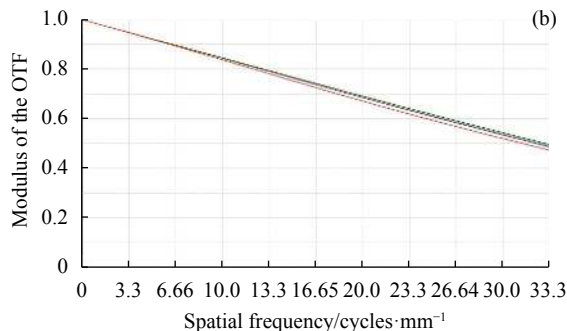
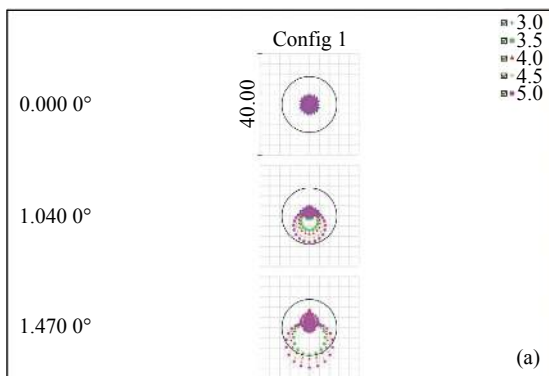


图 3 望远系统的像质评价。(a) 点列图;(b) MTF 曲线

Fig.3 Image quality evaluation of the telescopic system. (a) Spot diagram; (b) MTF curve

2.2 双光路 Offner 光栅成像系统的设计

由于具有结构简单紧凑、谱线弯曲和色畸变小、能够同时实现像差校正和光谱色散等优点^[23], Offner 光栅成像系统被广泛应用于推扫式光谱成像仪中。传统的 Offner 光栅成像系统因物面处放置狭缝而具有线视场,但文中提出的孔径编码光谱成像系统取消了狭缝,且考虑到 Offner 光栅成像系统并不是轴对称光学系统,因此双光路 Offner 光栅成像系统的视场用两个正交方向上(通常取与探测器像面的长边和短边平行的正交方向)的物高来表示。物方数值孔径取决于光学系统的 F 数:

$$NA = n \sin u = 1 \times \sin \left(\arctan \left(\frac{1}{2F} \right) \right) = 0.164 \quad (3)$$

式中: n 为物方空气折射率, $n = 1$; u 为物方孔径角。由于系统在光谱维编码, DMD-2 的有效面积应大于图谱混叠区域的面积,如图 4 所示,图谱混叠区域为成像区域和色散区域之和。DMD 的微镜单元通常沿对角线进行翻转,即其翻转轴与 DMD 的长边和短边均成 45°夹角,结合图 1 及系统工作原理, DMD-1 和 DMD-2 的翻转轴都应双光路 Offner 光栅成像系统的色散方向相同。

如图 4 所示,假设 DMD 微镜单元翻转轴为 V ,成像区域长 L_l 、宽 W_l ,则色散区域长度 $L_D = L_l$,色散距离 W_D 表示具有一定光谱范围的同一物点在双光路 Offner 光栅成像系统的色散像面上分开的最大距离。系统的光谱范围为 3~5 μm ,光谱分辨率为 100 nm,则光谱通道数为 $N=20$,色散距离应满足:

$$W_D \geq N \times \sqrt{2} \times \Delta = 0.305 \text{ mm} \quad (4)$$

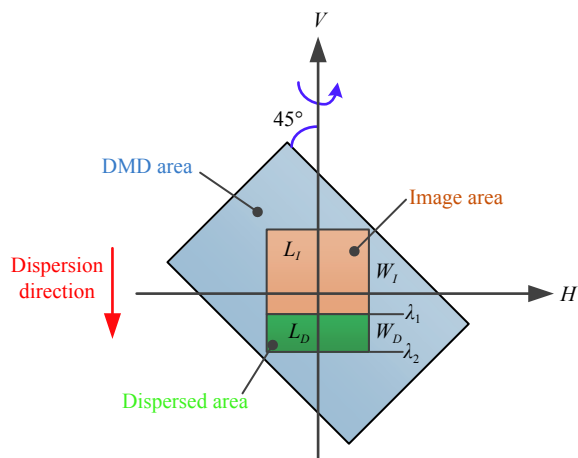


图 4 色散距离示意图

Fig.4 Schematic diagram of the dispersion distance

式中: Δ 为 DMD 的微镜单元尺寸。在同时满足 DMD-2 的有效面积大于图谱混叠区域的面积和公式 (4) 的前提下, 较大的色散距离能够提供更多的设计余量。将色散距离设计为 $W_D = 2.4 \text{ mm}$, 凸面闪耀光栅的周期为 $d = 100 \mu\text{m}$, 衍射级次为 $k = -1$ 级, 闪耀角为 1.1047° ^[24]。则可计算出凸面闪耀光栅的半径为:

$$R_g = \frac{dW_D}{k(\lambda_2 - \lambda_1)} = -120 \text{ mm} \quad (5)$$

球面反射镜的半径 $R_s = 2R_g = 240 \text{ mm}$ 。双光路 Offner 光栅成像系统设计参数见表 2。

表 2 双光路 Offner 光栅成像系统的设计参数

Tab.2 Design paremeters of the dual-pass Offner spectroscopic system

Parameter	Value
Wavelength range/ μm	3-5
Object plane size/ mm^2	9.6×7.68
Object space NA	0.164
Spectral resolution/ nm	100
Dispersion distance/ mm	2.4
Diffraction order of the grating	-1
Grating period/ μm	100
Blazed angle of grating/ $^\circ$	1.1047

Offner 光栅成像系统是光谱维编码中波红外光谱成像系统的核心部分, 其主要由凸面闪耀光栅和球面反射镜组成, 但是双光路的设计要求导致其光路布

局不同于传统的 Offner 光谱成像系统, 离轴配置和面视场使得系统的像差主要表现为像散。双光路 Offner 光栅成像系统的设计采用了近似的同心结构, 图 5(a) 为 YZ 平面内色散光路示意图, 物面和色散像面都绕 X 轴倾斜 12° , 并位于球面反射镜的球心附近, 但在 XY 平面沿 X 方向彼此分开, 分居球面反射镜的球心两侧而不严格对称, 如图 5(b) 所示。由于凸面闪耀光栅的色散作用, 色散像面的中心到球心的距离略大于物面中心到球心的距离。将从物面出发、经球面反射镜和凸面闪耀光栅到达色散像面的光线路径称

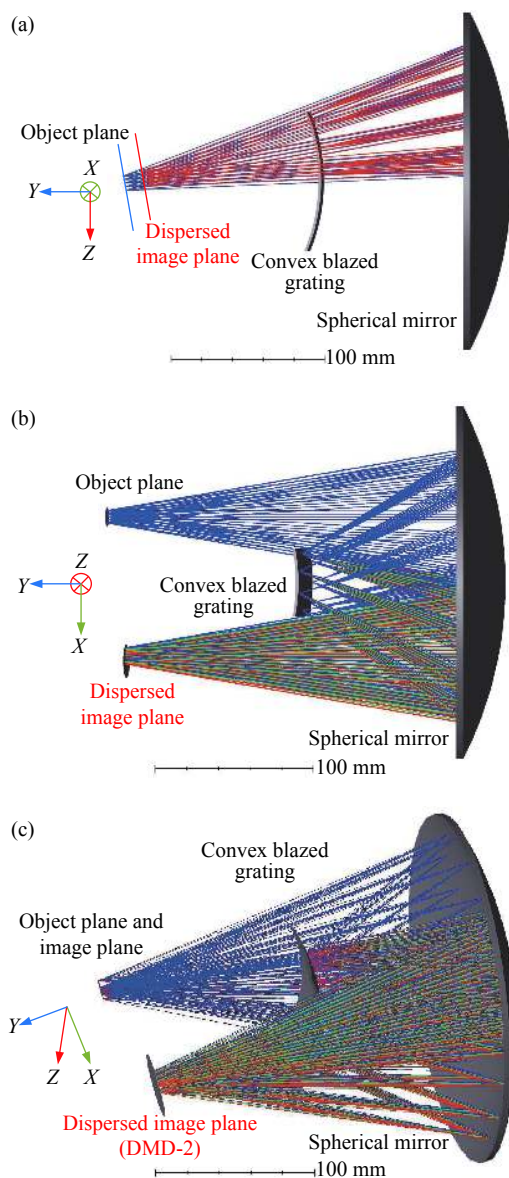


图 5 双光路 Offner 光栅成像系统的光学结构

Fig.5 Optical structure of the dual-pass Offner spectroscopic system

为色散光路,它利用图 5(a) 中球面反射镜和凸面闪耀光栅的上半部分。

图 6(a) 为色散像面上的点列图,对于任意波长,所有视场的点斑都聚焦在艾里斑内。图 7(a)~(c) 分别展示了波长为 3、4、5 μm 时的 MTF 曲线,可见在奈奎斯特频率处所有视场的 MTF 值均大于 0.34。如图 6(b) 所示,不同波长的光线被聚焦在色散像面的不同位置,相邻两个光谱通道的点斑偏移量为 120 μm ,正好等于色散距离除以光谱通道数的商值。该偏移量远大于 DMD 微镜单元的对角线尺寸,因此理论上可以获得更小的光谱分辨率。对 DMD 采取不同的像元合并策略即可获得不同的光谱分辨率。综上所述,来自物面的任意波长的光线都能够清晰成像在色散像面上,且沿色散方向线性平移,形成图谱混叠的色

散像面。

DMD-2 与色散像面重合,加载编码模板对目标场景的光谱数据立方体进行光谱选通,并将选通的光线反射回双光路 Offner 光栅成像系统的下半部分,光线再次经过球面反射镜和凸面闪耀光栅,被色散开的图像在像面处重新聚合,形成合光光路。图 5(c) 展示了目标场景在双光路 Offner 光栅成像系统中色散、编码、合光的传播过程,色散光路与合光光路关于 XY 平面对称。在像面处的点列图如图 6(c) 所示,不同波长的点斑在每个视场都重新汇合并聚焦在艾里斑内。如图 7(d) 所示,对比色散像面处的 MTF 曲线,像面处 MTF 曲线有一定程度的下降,并表现出明显的像散,主要源于系统的离轴配置、光路的非严格对称以及 DMD 引入的像差。

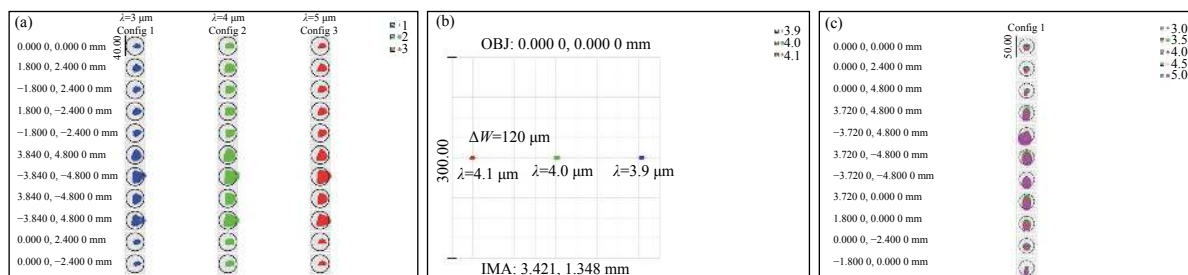


图 6 双光路 Offner 光栅成像系统的点列图

Fig.6 Spot diagram of the dual-pass Offner spectroscopic system

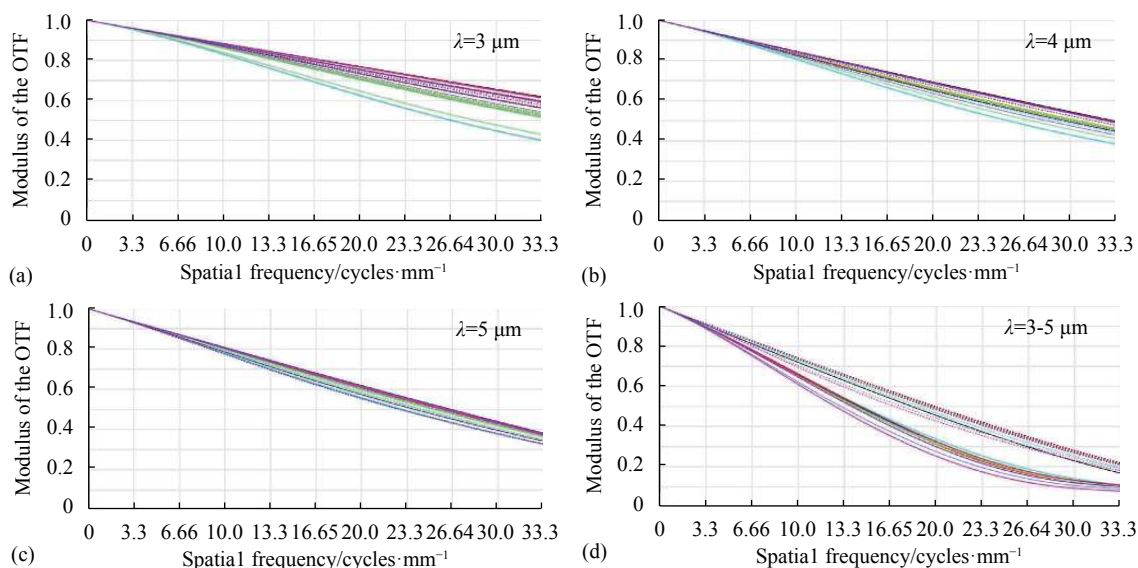
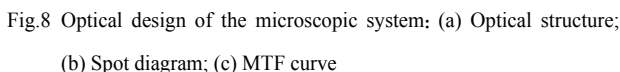


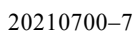
图 7 双光路 Offner 光栅成像系统的 MTF 曲线

Fig.7 MTF curves of the dual-pass Offner spectroscopic system

如图 8(a) 所示, 中继成像系统由 2 片硅和 3 片锗透镜构成, 总长 109.6 mm, 光学放大倍率为 1, F 数为 3, 红外探测器包含厚度为 1 mm 的硅窗口, 像面到窗口前端面的距离为 24.6 mm。图 8(b) 和图 8(c) 分别



系统整体优化设计后的光学结构如图 9(a) 所示, 红外探测器的冷光阑作为整个系统的孔径光阑, 以减小杂散辐射, 提高系统信噪比。系统中光学元件的布局较为合理, 为系统的机械结构设计提供了充足的空间。图 9(b) 和图 9(c) 分别为系统的点列图和 MTF 曲



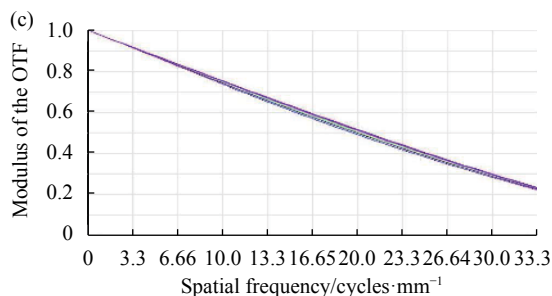


图 9 系统的整体优化设计: (a) 光学结构; (b) 点列图; (c) MTF 曲线
Fig.9 Integrated optimization of the system: (a) Optical structure;
(b) Spot diagram; (c) MTF curve

线,与图 6(c)和图 7(d)对比可以发现,轴外视场的点列图和 MTF 曲线都有明显改善,所有视场 MTF 值均大于 0.22。这意味着通过整体优化设计,实现了良好的像差平衡,提升了系统的成像质量。

3 作用距离的估算

红外成像最小分辨温差 (MRTD) 表示具有温差 ΔT_B 的目标经过给定距离的大气衰减后,可被红外成像系统分辨的温差。根据经验公式, MRTD 可用等效噪声温差 NETD 和系统传递函数表示^[25]:

$$MRTD = 0.757 \frac{NETD}{MTF_s} \quad (6)$$

式中: MTF_s 为红外系统总的传递函数。其等于光学系统传递函数、探测器传递函数、电学系统传递函数和显示器传递函数的乘积:

$$MTF_s = MTF_{optical} \times MTF_{CCD} \times MTF_{electric} \times MTF_{obv} \quad (7)$$

红外成像系统作用距离的显函数可表示为^[25]:

$$R = \ln \left[\frac{\Delta T_B}{MRTD \sqrt{\frac{7}{\varepsilon}}} \right] \beta + \frac{1}{2} \left(\frac{n}{A_T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中: ΔT_B 为目标和背景的温差; ε 为目标长宽比例; β 为大气衰减系数; n 为最小面积目标扫描线数,即条带数; A_T 为目标最小面积。但公式 (8) 中条带数是在观测概率为 50% 时根据约翰逊准则得到的,当观测概率为 P 时,需要对条带数进行修正^[26]:

$$P = \frac{(n/n_e)^E}{1 + (n/n_e)^E} \quad (9)$$

$$E = 2.7 + 0.7(n/n_e) \quad (10)$$

式中: n 为修正后条带数; n_e 为 50% 观测概率对应的条

带数。若以 80% 观测概率计算,则实现目标探测需要满足 $n = 1.452$ 。

文中选用的制冷型中波红外探测器对 25 °C 的目标噪声等效温差 (NETD) 为 15.68 mK。整个光学系统在奈奎斯特频率处的 $MTF_{optical} = 0.22$, 探测器传递函数通常取 $MTF_{CCD} = 0.64$, 电学系统传递函数接近理想值取 $MTF_{electric} = 0.95$, 显示器传递函数一般取 $MTF_{obv} = 0.64$ 。则由公式 (7) 可以计算出系统总的传递函数 $MTF_s = 0.107$, 结合公式 (6) 得 $MTRD = 0.11$ °C。

若以长 5 m、高 1.5 m 的家用轿车为探测目标,目标长宽比为 3.33,目标与背景温差为 1 °C,大气衰减系数取 0.065/km,结合公式 (8) 可估算出系统达到 80% 探测概率时的最大作用距离为 4.56 km,满足表 1 中作用距离不小于 3 km 的系统设计要求。

4 结 论

文中提出了一种基于双 DMD 的光谱维编码中波红外光谱成像系统的设计方案,该系统主要由望远系统、双光路 Offner 光栅成像系统、中继成像系统、两个 DMD 及中波红外探测器等部分组成。望远系统主要对远处目标场景的信息进行捕获。双光路 Offner 光栅成像系统配合光谱维编码 DMD 同时实现了对光线的色散、编码和合光等多个功能。空间维 DMD 完美补偿了在光谱维编码 DMD 所引入的像面倾斜。利用中继成像系统实现了冷光阑的严格匹配,降低了杂散辐射。像质评价结果表明,整体优化设计后系统各视场的点斑均聚焦在艾里斑内,奈奎斯特频率处 MTF 值大于 0.22,空间分辨率优于 0.1 mrad,光谱分辨率 100 nm。并基于 MRTD 估算出作用距离为 4.56 km。

参考文献:

- [1] Lu Xuheng, Meng Qinghua, Tang Liu, et al. Application of hyperspectral technology in the detection of crop diseases and pesticide residues [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(11): 4566-4574. (in Chinese)
- [2] Tian Minglu, Ban Songtao, Chang Qingrui, et al. Use of hyperspectral images from UAV-based imaging spectroradiometer to estimate cotton leaf area index [J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(21): 102-108. (in Chinese)

- [3] Dong Xinfeng, Gan Fuping, Li Na, et al. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(4): 454-464. (in Chinese)
- [4] Zhou Yan, Xiu Liancun, Yang Kai, et al. Infrared spectrum mineral mapping technique and its application [J]. *East China Geology*, 2019, 40(4): 289-298. (in Chinese)
- [5] Li Na, Dong Xinfeng, Gan Fuping, et al. Application evaluation of ZY-1-02 D satellite hyperspectral data in geological survey [J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(6): 186-191. (in Chinese)
- [6] Wang Jian, Cui Tianxiang, Wang Yi, et al. Cloud detection for GF-5 visible shortwave infrared advanced hyperspectral image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0928003. (in Chinese)
- [7] Wang Chang, Yin Songlin, Gao Yang, et al. Classification method of sea surface oil spill using UAV multi-spectral camera [J]. *Journal of Applied Oceanography*. 2021, 40(3): 540-546. (in Chinese)
- [8] Li Wei, Lv Meng, Chen Tianhong, et al. Application of a hyperspectral image in medical field: A review [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2021, 26(8): 1764-1785. (in Chinese)
- [9] Lin Tao, Liu Fei, Han Pingli, et al. Band selection method of spectrum detection about medium wave infrared stealth target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1047-1051. (in Chinese)
- [10] Wehra A, Lobrb U. Airborne laser scanning—An introduction and overview [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, 54(2-3): 68-82.
- [11] Mouroulis P, Green R O, Chrien T G. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13): 2210-2220.
- [12] Chang Lingying, Zhang Qiang, Qiu Yuehong. Design of optical system for broadband and integrated AOTF imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0722002. (in Chinese)
- [13] Chrien T G, Chovit C. Imaging spectrometer using a liquid crystal tunable filter [C]//Proceedings of SPIE, 1993, 1937: 256-261.
- [14] Descour M, Dereniak E. Computed-tomography imaging spectrometer: experimental calibration and reconstruction results [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4817-4826.
- [15] Hirakawa K. Fourier multispectral Imaging: Measuring spectra, one sinusoid at a time [C]//International Workshop on Computational Color Imaging, 2017, 10213: 3-12.
- [16] Shao Xiujuan, Hu Bingliang, Yan Peng. Design of multi-spectral adaptive spectrometer based on Hadamard transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 963-966. (in Chinese)
- [17] Ashwin Wagadarikar, Renu John, Rebecca Willett, et al. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): B44-B51.
- [18] Gehm M E, John R, Brady D J, et al. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 14013-14027.
- [19] Rueda H, Arguello H, Arce G R. DMD-based implementation of patterned optical filter arrays for compressive spectral imaging [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 32(1): 80-89.
- [20] Wu Yuehao, Mirza I O, Arce G R, et al. Development of a digital micromirror device based multishot snapshot spectral imaging system [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2692-2694.
- [21] Dong Xue, Xiao Xingchen, Pan Yining, et al. DMD-based hyperspectral imaging system with tunable spatial and spectral resolution [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16995-17006.
- [22] Goldstein N, Vujkovic-Cvijin P, Fox M, et al. DMD-based adaptive spectral imagers for hyperspectral imagery and direct detection of spectral signatures [C]//Proceedings of SPIE, 2009, 7210: 721008.
- [23] Wang Yang, Gu Zhiyuan, Meng Xiangyue, et al. Optical design of a miniaturized airborne push-broom spectrometer [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2627.
- [24] Xiong Zhencong, He Wenjun, Wang Qi, et al. Design and optimization method of a convex blazed grating in the Offner imaging spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(2): 383-391.
- [25] Zhao Miaojuan, Che Hong. Analysis of the efficient distance of O-E system for military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S2): 501-503. (in Chinese)
- [26] He Heng. Study on the range forecast of IR images detecting system under sea-sky background [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)