CN 51-1346/O4 ISSN 1003-501X (印刷版) ISSN 2094-4019 (网络版)



### 基于端到端混合多阶衍射透镜设计的理论与实验研究

赵玺竣,范斌,廖军

#### 引用本文:

赵玺竣,范斌,廖军. 基于端到端混合多阶衍射透镜设计的理论与实验研究[J]. 光电工程,2025, **52**(5):250023. Zhao X J, Fan B, Liao J. Theoretical and experimental study on end-to-end hybrid multi-order diffractive lens design[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(5): 250023.

https://doi.org/10.12086/oee.2025.250023

收稿日期: 2025-02-05; 修改日期: 2025-03-12; 录用日期: 2025-03-12

# 相关论文

一种用于驾驶场景下手机检测的端到端的神经网络 戴腾,张珂,尹东 光电工程 2021, **48**(4): 200325 doi: 10.12086/oee.2021.200325

基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及测试

王玲,刘博,吴城,罗兰,杨玉强 **光电工程 2024**, **51**(3): 240032 doi: 10.12086/oee.2024.240032

基于昇腾处理器的边端人体动作识别算法设计与实现 赵冬冬,赖亮,陈朋,周鸿超,李亦然,梁荣华 光电工程 2024, **51**(6): 240072 doi: 10.12086/oee.2024.240072

望远镜光程稳定性测量方案设计及噪声理论分析

赵凯,范纹形,海宏文,张锐,范磊 光电工程 2023, **50**(11): 230158 doi: 10.12086/oee.2023.230158

更多相关论文见光电期刊集群网站



http://cn.oejournal.org/oee









DOI: 10.12086/oee.2025.250023

CSTR: 32245.14.0ee.2025.250023

# 基于端到端混合多阶衍射透镜 设计的理论与实验研究

赵玺竣<sup>1,2,3</sup>,范 斌<sup>1,2,3\*</sup>,廖 军<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室,四川成都 610209; <sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所薄膜光学相机总体室,四川成都 610209; <sup>3</sup>中国科学院大学,北京 100049; <sup>4</sup>军事航天部队装备部军事代表局驻成都地区军事代表室,

四川 成都 610209



摘要:提出一种支持可见光与中波红外 (MWIR) 双波段计算成像的混合多阶衍射透镜设计。通过在同一基底的前后两面上应用不同深度的衍射结构,并利用端到端优化框架对这些结构参数进行优化,成功开发出一种能够在 640~800 nm 可见光波段和 3700~4700 nm MWIR 波段实现高效聚焦的衍射器件。结合专门设计的图像重建网络,实现单片式双波段计算成像系统,具备结构简单、轻量化及低成本等优势。实验结果显示,直径为 40 nm 的原型样机分别 在可见光波段和 MWIR 波段的静态传函达到 50.0% 和 4.4%;在室温条件下,红外波段噪声等效温差不超过 80 mK,验证该设计方案的有效性和实用性。

关键词:计算成像; 端到端优化; 衍射元件; 双波段成像 中图分类号: O436

文献标志码: A

赵玺竣,范斌,廖军. 基于端到端混合多阶衍射透镜设计的理论与实验研究 [J]. 光电工程,2025,**52**(5): 250023 Zhao X J, Fan B, Liao J. Theoretical and experimental study on end-to-end hybrid multi-order diffractive lens design[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(5): 250023

# Theoretical and experimental study on end-toend hybrid multi-order diffractive lens design

Zhao Xijun<sup>1,2,3</sup>, Fan Bin<sup>1,2,3\*</sup>, Liao Jun<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics Thin Film Camera Overall Assembly Chamber, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>4</sup>The Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Equipment Department of the Military Aerospace Forces in Chengdu, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: This paper presents a hybrid multi-order diffractive lens that supports dual-band computational imaging

基金项目: 国家自然科学基金 (62075220)

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

收稿日期: 2025-02-05; 修回日期: 2025-03-12; 录用日期: 2025-03-12

<sup>\*</sup>通信作者:范斌, fanbin@ioe.ac.cn。

in both visible and mid-wave infrared (MWIR) bands. By applying diffraction structures of varying depths on both sides of the same substrate and optimizing these structural parameters using the end-to-end optimization framework, we successfully developed a diffractive element capable of efficient focusing in the visible light band (640~800 nm) and the MWIR band (3700~4700 nm). Coupled with a specially designed image reconstruction network, this approach realizes a monolithic dual-band computational imaging system with simplicity, lightweight construction, and low cost. Experimental results show that the prototype with a diameter of 40 mm achieves static modulation transfer functions of 50.0% in the visible light band and 4.4% in the MWIR band. Under room temperature conditions, the noise equivalent temperature difference in the infrared band does not exceed 80 mK, confirming the effectiveness and practicality of the proposed design.

Keywords: computational imaging; end-to-end optimization; diffractive elements; dual-band imaging

# 1 引 言

随着应用场景对光电探测需求的复杂化和多样化, 现代光电探测系统在体积、重量和成像波段等方面的 要求日益提高。为此,许多紧凑型双波段成像光学系 统采用了前端卡塞格林系统来压缩光路并避免色差<sup>[1-5]</sup>, 通过分光镜将两个波段的光束分离到各自的通道后校 正残余像差。然而,由于传统双波段成像系统依赖复 杂的后镜组结构及前后端系统的精确装调对准,在复 杂性、重量和成本方面仍存在较大限制。

计算成像技术融合了光学、电子学与图像处理等 多个领域的知识,通过将光学系统和图像处理模块视 为一个整体并进行协同设计与优化,从而优化光学系 统的复杂性或提升其性能表现。其中,端到端优化框 架在计算机视觉<sup>[68]</sup>、先进光学系统设计<sup>[9-12]</sup>等方面受 到广泛关注。该框架包括前端的光学编码器以及后端 神经网络解码器,通过测量重建输出图像与真实值之 间的残差,并利用 Pytorch/TensorFlow 自动微分求解 器,将损失的梯度反向传播来共同优化光学系统和图 像重建网络的参数,以达成特定目标的最佳计算光学 系统设计。在目前端到端衍射透镜设计的研究中,大 多数工作<sup>[13-17]</sup>仍基于传统衍射透镜,仅使用一个或少 数几个衍射阶次,通过牺牲特定波长的聚焦效率来实 现多波长共焦成像,以此扩展衍射透镜的成像谱段。 尽管这种方法在一定程度上扩展了成像谱段,但它也 带来了点扩散函数 (point spread function, PSF) 旁瓣能 量分布增加以及共焦波长范围有限等问题,这些问题 限制了成像质量和可用带宽,进而影响了最终的成像 效果及其应用范围。因此,寻求一种能够在不显著降 低成像质量的前提下扩展成像谱段的方法尤为重要。

相比之下,多阶衍射透镜 (multi-order diffractive lens, MODLs)<sup>[18-19]</sup>则具有更宽的成像谱段。图 1 展示 了多阶衍射透镜在不同光谱和离焦量条件下的光斑强 度 (通过斯特列尔比来衡量),其中Δf为焦距变化量, λ 为波长, SR 为实际光斑强度与理想光斑强度的比值。 利用更多的衍射阶次,MODLs 在其设计焦距处实现 了多个波长高效地共焦成像。在这一过程中, MODLs 不仅展示了衍射特性导致的轴向色差 (标记 为 2 型 LCA),还展现了折射特性引起的轴向色差 (标记 记为 1 型 LCA),其中 1 型 LCA 成为限制成像带宽的 关键。然而,即便存在这一限制,相较于传统方法, MODLs 依然极大地拓展了成像谱段,提供了更优的 成像能力。这使得它在面对需要同时覆盖可见光与红 外等多个波段的应用时,成为一个极具潜力的选择。



图 1 MODL 的色散特性 Fig. 1 Dispersion characteristics of MODL

为了扩展 MODLs 的设计空间并实现双波段成像 的目标,本文提出将 MODL 的背面也作为衍射表面 纳入设计变量,进而提出了混合多阶衍射透镜 (hybrid multi-order diffractive lens, HMODL) 的端到端设计。 这种设计方案旨在克服现有端到端衍射透镜设计的局 限性,但其实施面临几个关键挑战:

首先,目前缺乏针对 HMODL 的精确模拟模型。 现有的方法通常依赖于 ZEMAX 软件中的光线追迹法, 这种方法通过简化衍射表面为局部光栅来处理<sup>[18,20]</sup>, 无法有效应对非连续的衍射表面;或者采用基于传统 衍射透镜的薄元近似模型<sup>[21]</sup>,忽略了多阶衍射表面的 实际结构深度以及边缘非近轴条件导致的误差。其次, 准确模拟加工误差对成像性能的影响需要大幅增加 PSF 尺寸,这会带来巨大的计算内存负担,这一问题 限制了优化的效率与可行性。

为了解决上述问题,本文首先提出 Ray-Wave 模型,用于精确计算 HMODL 的 PSF,从而实现对真值 图像退化过程的模拟。Ray-Wave 模型使用相干光线 追迹模拟 HMODL 中多阶衍射表面和后衍射面的相位 调制分析,利用双二次线性插值将相干光线累计相位 转换为标准相位图,然后利用瑞利-索末菲衍射积分 计算 HMODL 的 PSF,为 HMODL 的光学像差和"衍 射效应"提供精确模拟。然后,本文分析了单点金刚 石车削加工 (MODLs 常用加工方法)的加工精度误差 对图像带来的影响,通过修正的图像退化模型,在考 虑加工误差的情况下模拟 HMODL 的退化图像,同时 不必计算大尺寸的 PSF,降低了计算内存的负担。

综上所述,本文的具体贡献如下:

1)本文提出了一种 Ray-Wave 模型,用以准确地 模拟 HMODL 的相位调制和计算 PSF,该模型促进 了 HMODL 端到端设计的实现。

2) 本文定量分析了单点金刚石车削加工的加工精 度误差对成像图像带来的影响,基于此分析,本文修 正了原有的 HMODL 图像退化模型,在确保考虑加工 误差影响的同时,显著降低了计算内存的需求,提高 了模拟效率。

3)本文展示了目前所知的首个单片式可见光 (visible light, VIS)/中波红外 (mid-wave infrared, MWIR) 双波段计算成像相机的原型样机,并通过实际双波段 成像实验验证了所提出的 HMODL 端到端设计方案的 有效性。这一成果不仅证明了该设计方案在实际应用 中的潜力,也为未来衍射元件的设计和应用提供了技 术经验和参考依据。

## 2 理论及仿真

接下来,本文构建了 HMODL 的端到端优化框架, 该框架的核心在于精确构建 HMODL 成像所需的各个 组件,以确保最终实现 HMODL 的优化设计目标。这 些关键组件包括:HMODL 的表面模型、Ray-Wave 模型(用以计算 HMODL 的 PSF)、HMODL 的图像退 化模型以及图像重建网络。然后,端到端优化计算最 终输出图像的损失函数和损失的梯度,并将损失函数 的梯度反向传播到各个设计参数。这种优化策略允许 同时调整光学系统的物理参数和图像重建网络的参数, 以最小化重建图像与真实图像之间的差异。

#### 2.1 HMODL 的表面模型

所提 HMODL 包含前后两个衍射表面,其中前表 面为多阶衍射表面,后表面为常规衍射表面。为了满 足单点金刚石车削连续加工的工艺要求,多阶衍射表 面必须在局部周期内保持连续。为此,采用多个相干 的非球面环带拼接的形式来表达多阶衍射表面,以保 证其局部周期的连续性,表达式为

$$\begin{cases} h_1(\rho) = a_{1,j}\rho^1 + a_{2,j}\rho^2 + zoff_j, \\ R_{j-1}^2 \le \rho \le R_j^2 \\ \rho = r^2 \end{cases} ,$$
 (1)

式中:  $h_1(\rho)$ 为多阶衍射表面的矢高; r为径向坐标,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $a_{1,j}$ 、 $a_{2,j}$ 分别为多阶衍射表面第j个非 球面环带的二次项和四次项系数;  $zoff_j$ 为第j个非球 面环带的轴向偏移量,它由多阶衍射表面的衍射阶数 决定;  $R_j$ 为第j个非球面环带的最大径向半径。由于 多阶衍射表面表现出更好的色散性质,因此它通常提 供主要的光焦度; 而 HMODL 的后衍射表面主要用于 校正两个波段的色差和衍射效率而几乎不承担光焦度, 可视作相位掩膜,因此可以直接建立表面高度与调制 相位的关系,表达式为

$$\tilde{E}_{2+}(r) = \tilde{E}_{2-}(r) \exp[ik(n_1 - 1)h_2(r)], \qquad (2)$$

式中:  $\tilde{E}_{2-}(r)$ 和 $\tilde{E}_{2+}(r)$ 分别为后衍射表面调制前后的 复振幅光场; k为波数,  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $n_1$ 为前表面后方 介质的折射率,即 HMODL 基底材料的折射率;  $h_2(r)$ 为后衍射表面在径向半径 r 处的高度。

#### 2.2 Ray-Wave 模型

传统衍射透镜的设计基于薄元近似 (thin element approximation, TEA) 模型,该模型将衍射元件视作无限薄的相位掩膜,提供了良好的简化。但是,在非近

轴条件下工作的多阶衍射表面显然不满足 TEA 的条件<sup>[22]</sup>。为此,本文提出 Ray-Wave 模型,它在光学空间使用相干射线追迹来模拟 HMODL 的相位调制,再在像空间中使用自由衍射积分来模拟 HMODL 的衍射效应。以 HMODL 为例,具体推导如下:

该模型首先以此计算了采样光线与每个光学表面的相交和折射,用ins(·)隐式地给出相交函数,ref(·) 显式地给出折射函数,以此来描述相交和折射两个过程。若采样光线的坐标*o*=(*x*,*y*,*z*),传播方向*d*=(*m*,*l*,*n*),其中*m*、*l*、*n*分别为*x*、*y*、*z*方向的方向余弦。描述相交的隐式函数ins(·)可表示为

$$\operatorname{ins}(x, y, z) = h_i(\rho) - z \to 0, \qquad (3)$$

式中: *h<sub>i</sub>*(*ρ*)不失一般性地表示为第*i*个光学表面的矢高。当ins(*x*,*y*,*z*)=0时,光线与光学表面严格相交。由于多阶衍射表面采用了4次高阶项,式(3)通常难以求得闭式解,但是可用迭代法求得其数值解,迭代方法如下:

假设第 q 次迭代时,光线的位置为o<sup>q</sup>,则下一次 迭代的更新策略为

$$\boldsymbol{o}_i^{q+1} = \boldsymbol{o}_i^q + \operatorname{ins}\left(\boldsymbol{o}_i^q\right)\boldsymbol{d} , \qquad (4)$$

上述迭代当ins(o<sup>q</sup><sub>i</sub>) ≤ 1 nm时,即可认为追迹光线 与光学表面相交。事实上,当光线与光轴的夹角在 45°以内时,上述迭代方法收敛的次数不超过 20 次 (通常 2~3 次即可收敛)。一旦求得与光学表面的交点, 就可以根据 Snell 定律计算光线的折射ref(·)。不失一 般性地,假设光线与第 *i* 个光学表面的交点为o<sub>i</sub>,入 射和出射的方向向量分别为d<sub>i</sub>和d<sub>i+1</sub>,光线入射第 *i* 个光学表面前后的介质折射率分别为n<sub>i</sub>和n<sub>i+1</sub>。根据 Snell 定律可得

$$\boldsymbol{d}_{i+1} = \operatorname{ref}\left(\boldsymbol{d}_{i}, \boldsymbol{n}_{i}\right) = \frac{n_{i}}{n_{i+1}}\boldsymbol{d}_{i} + \gamma \boldsymbol{n}_{i}, \qquad (5)$$

$$\gamma = \frac{n_i}{n_{i+1}} \left| \boldsymbol{d}_i \cdot \boldsymbol{n}_i \right| - \sqrt{1 - \frac{n_i}{n_{i+1}} \left( 1 - \left| \boldsymbol{d}_i \cdot \boldsymbol{n}_i \right|^2 \right)}, \quad (6)$$

式中: *n*<sub>i</sub>是光线与光学表面相交的法向向量。*n*<sub>i</sub>可表示为

$$\boldsymbol{n}_{i} = -\frac{\left[2h_{i}'(\rho)x \quad h_{i}'(\rho)x \quad 1\right]}{\sqrt{\left[2h_{i}'(\rho)x\right]^{2} + \left[2h_{i}'(\rho)y\right]^{2} + 1}},$$
(7)

式中: $h_i'(\rho)$ 是第i个光学表面高度关于 $\rho$ 的导数。对于 HMODL 的多阶衍射表面和后衍射表面,分别为

$$\begin{cases} h'_{1}(\rho) = a_{1,j} + 2a_{2,j}\rho , \quad R^{2}_{j-1} \le \rho \le R^{2}_{j} \\ h'_{1}(\rho) = 0 \end{cases}$$
(8)

Ray-Wave 在完成与每个光学表面的相交和折射 后,记录相干光线的光程*t*<sub>i</sub>,在完成所有光学表面的 光线追迹后,得到光线所累积的总光程*t*,表达式为

$$t = \sum_{i} t_{i} = \sum_{i} n_{i} |\boldsymbol{o}_{i} - \boldsymbol{o}_{i-1}|.$$
(9)

对于 HMODL 的后衍射表面,根据式 (2),它的 光程是它高度轮廓的线性映射,表达式为

$$t_2 = h_2(r) \cdot (n_1 - 1) . \tag{10}$$

Ray-Wave 通过计算采样光线在所有光学表面的 相交与折射,得到光线在最后一个光学表面上累积的 总光程  $t_o$ 为了实现快速衍射传播计算,还需要将采 样光线的光程矩阵转换为标准网格采样的波场,其原 理如图 2。其中,光波场采样点(蓝色圆圈)的光程  $t_{interp}$ 是通过对其周围 4 个采样光线点(红色圆圈)的光程  $t_{t1}$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 和 $t_4$ 进行扩展双线性插值得到。假设光波 场采样点与周围 4 个采样光线的距离分别为 $d_1$ 、 $d_2$ 、  $d_3$ 和 $d_4$ ,令插值权重为 $w_i = 1/d_i^2$ ,则估计的光波场采 样点的插值光程为

$$t_{\text{interp}} = \frac{w_1 t_1 + w_2 t_2 + w_3 t_3 + w_4 t_4}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} . \tag{11}$$

然后,HMODL 的透射复振幅光场为

$$\tilde{E}(\boldsymbol{o}_{\rm H}) = \exp\left[ikt_{\rm interp}\left(\boldsymbol{o}_{\rm H}\right)\right], \qquad (12)$$



图 2 光波场光程插值计算示意图 Fig. 2 Schematic diagram of interpolation calculation for optical path in light wave field

式中: **o**<sub>H</sub>为 HMODL 的透射复振幅光场的采样点, 这里使用了它的向量形式。为了计算像平面 I 的复光 场,本文使用第一种形式的瑞利-索末菲衍射积分, 表示为

$$\tilde{E}(\boldsymbol{o}_{\mathrm{I}}) = \iint_{\mathrm{H}} \tilde{E}(\boldsymbol{o}_{\mathrm{H}}) \frac{\exp(ik|\boldsymbol{o}_{\mathrm{I}} - \boldsymbol{o}_{\mathrm{H}}|)}{i2\lambda|\boldsymbol{o}_{\mathrm{I}} - \boldsymbol{o}_{\mathrm{H}}|^{2}} (|\boldsymbol{o}_{\mathrm{I}} - \boldsymbol{o}_{\mathrm{H}}| + f_{0}) \boldsymbol{d}^{2} \boldsymbol{o}_{\mathrm{H}},$$
(13)

式中: $o_1$ 为像平面复振幅光场的采样点; $f_0$ 为 HMODL 的设计焦距或与像平面的距离。HMODL 的 PSF 可进一步写为

$$PSF(\boldsymbol{o}_{I}) = \left| \tilde{E}(\boldsymbol{o}_{I}) \right|^{2} . \tag{14}$$

事实上,HMODL 作为旋转对称结构的光学元件, 当只考虑轴上像差时,采样光波场的相位也是旋转对 称的。因此它的光线追迹采样可压缩至一维,二维复 光波场可以通过一维采样光线插值得到。应说明的是, 插值计算过程是高度线性,因此不会改变模型的可微 性质。通过以上操作,可以大大降低 HMODL 光学成 像模型的计算量和计算内存需求。

至此, Ray-Wave 模型即完成了非近轴状态下对 HMODL 的 PSF 计算。为了验证所提出的 Ray-Wave

模型的有效性,以波长为 720.5 nm、口径为 40 mm、 焦距为 121.7 mm 的非球面与一个连续相位面的组合 透镜设计为例,其结构如图 3(a)所示,该设计保证了 相位的连续性,因此可使用 ZEMAX 软件的模拟值作 为参考值。分别使用 TEA 模型、ZEMAX 软件和 Ray-Wave 模型计算了它的 PSF,结果如图 3(b)所示,其 中横轴表示像素索引值,纵轴表示 PSF 的归一化 强度。

不难看出,所提出的 Ray-Wave 模型与 ZEMAX 软件实例得到了几乎一致的计算结果,而基于 TEA 模型计算结果则存在较大偏差。该实例说明了 Ray-Wave 方法对非近轴条件下多层衍射元件的模拟具有 可靠的计算精度。



图 3 使用各模型计算非球面和衍射面组合的实例。(a)非球面和衍射面组合的透镜结构;(b)分别使用 TEA、Zemax 和所 提出的 Ray-Wave 模型计算结果



#### 2.3 考虑加工精度的图像退化模型

首先,在不考虑任何加工误差的情况下,HMODL 在双波段上的图像退化模型可表述为

$$i_{b_{1}} = \sum_{\lambda \in \Lambda_{1}} Q_{1}(\lambda) \cdot (\text{PSF}_{\lambda} \otimes i_{c_{1}}) + noise_{1}$$
  

$$i_{b_{2}} = \sum_{\lambda \in \Lambda_{2}} Q_{2}(\lambda) \cdot (\text{PSF}_{\lambda} \otimes i_{c_{2}}) + noise_{2} , \qquad (15)$$

式中: $i_{c1}$ 和 $i_{c2}$ 分别为可见光波段和中波红外波段的清晰原始图像; $Q_1(\lambda)$ 和 $Q_2(\lambda)$ 分别为两个波段的光谱响应权重;PSF<sub> $\lambda$ </sub>为波长  $\lambda$  处的 PSF; noise<sub>1</sub>、noise<sub>2</sub> 分别为可见光和中波红外探测器的噪声;  $\otimes$ 为卷积算符。

HMODL 拟采取的加工方法为单点金刚石车削方 法,该加工方法不受衍射元件表面结构深度的限制, 同时可保证 0.5 µm 以内的面型精度,非常契合 HMODL 的加工要求。但是,考虑到双波段成像的需 求,HMODL 仅能采用 ZnS 作为基底材料。对于可见 光波段 (中心波长 720.5 nm) 而言, 在 ZnS 上 0.5 µm 的加工精度对应 0.93 倍光程调制误差,因此加工误 差带来的影响不应该被忽视。为了模拟加工误差对 HMODL 成像质量的影响,本文在光谱上以 0.5 nm 的采样间隔, 计算了在存在和不存在加工误差时, HMODL 在可见光波段的 PSF, 以及其退化的图像。 为了保证模拟精度, PSF 的尺寸为 1001×1001。应说 明的是,本文在HMODL的后衍射表面上,对其高度 轮廓加入了均值为 0、标准差为 0.16 µm 的随机扰动 (在 -0.5 μm 至 +0.5 μm 的 范 围 内 的 置 信 概 率 为 99.73%),来模拟车削刀具在元件表面上的精度误差。 PSF 的计算结果如图 4 所示。为了更清楚地看到在有 /无加工误差时 PSF 的区别,这里对 PSF 取对数处理。 可以看出,当存在加工误差时,HMODL的 PSF 的旁 瓣能量高出约一个数量级,并且分布极广。事实上, 这些分布极广、值极小的旁瓣能量在整个像面范围内 可以等效为一个大尺寸的常数矩阵 *A*,其值远小于探 测器的探测精度 (1/255),在实践上难以测出,因此 HMODL 的退化模型可进一步写为

$$i_{\rm b} = \sum_{\lambda \in \Lambda} \left[ (\mathrm{PSF}_{\lambda}' + \mathbf{A}) \otimes i_{\rm c} \right] + noise$$
$$= \sum_{\lambda \in \Lambda} \mathrm{PSF}_{\lambda}' \otimes i_{\rm c} + \mathbf{A} \otimes i_{\rm c} + noise , \qquad (16)$$

式中: PSF<sub>4</sub>'是可观测的 PSF,其值应大于探测器的 探测精度 (1/255)。A ⊗ i<sub>c</sub>实际上是对图像做均值滤波, 其直接作用是导致图像的对比度下降。图 5显示了在 有/无加工误差时,HMODL的模拟成像结果。其中 图 5(a) 是原始的清晰图像,图 5(b) 是无加工误差 HMODL 的模拟图像,图 5(c) 是有加工误差时 HMODL 的模拟图像。通过计算 HMODL 对黑白图像的模拟成 像结果,加工误差导致图像对比度下降的因子约为 70%。因此,在端到端优化框架中,可以直接通过降







图 5 HMODL 加工误差对其成像质量的影响。 (a) 真值图像; (b) 无加工误差时 HMODL 的模拟图像; (c) 有加工误差时 HMODL 的模拟图像

Fig. 5 Impact of HMOLD processing errors on its imaging quality. (a) Ground truth image; (b) Simulated image of HMOLD without processing errors; (c) Simulated image of HMOLD with processing errors

低图像对比度来模拟矩阵 A 对图像的影响,这样可以 避免计算尺寸过大的 PSF,从而在减少计算内存负担 的同时,模拟加工精度误差对 HMODL 成像的影响。

针对红外波段的图像,其主要受环境热辐射的影响,而目前还缺少可靠的方法定量估计该因素对红外 成像对比度的影响。由于图像在进入重建网络之前会 进行对比度归一化和拉伸处理,因此其估计值不需要 十分精确,主要依靠经验对红外波段图像的对比度施 加了 10% 的衰减因子,以模拟红外图像受环境辐射 的影响。

#### 2.4 图像重建网络

重建网络直接接入 HMODL 的后端,将 HMODL 的输出图像作为输入图像。为了避免之前图像对比度 衰减对重建网络参数优化的影响,在这里对残余训练 的图像数据集做了对比度归一化处理。如图 6 所示, 重建网络基础模块采用 NAF 模块,该模块精心优化 了网络的基本组件,降低了网络块内和块间的复杂性 和计算成本,并同时保持了网络非线性拟合的能力。 网络基于 U 型网络结构,并保持编码器和解码器之 间的跳跃连接,从而增强了网络在局部信息的识别能 力和图像细节的保留能力。在图 6 中,"Conv-n2c-k<sub>c</sub>3s1-g2"表示一个卷积层 Conv,输出通道数 n 为 2c(c 为输入通道数),卷积核 k<sub>c</sub>大小为"3×3",步幅 s 为 1, 卷积分组数 g 为 2。 应说明的是,NAFNet 网络已被广泛认可为一种 高效且成熟的图像复原网络结构。然而,由于篇幅 限制,本文的重点在于探讨如何利用端到端优化框架 实现 HMODL 的设计目标。因此,仅对图像重建网络 结构进行了简要介绍,建议感兴趣的读者阅读参考文 献<sup>[23]</sup>以获取关于该网络结构的详细信息。

#### 2.5 端到端优化框架的参数设置

端到端优化框架的优化参数包括光学系统的参数 和图像重建网络的参数。光学系统的参数包括 HMODL前表面所有非球面环带的二次项系数*a*<sub>1</sub>、四 次项系数*a*<sub>2</sub>、轴向偏置*zoff*和后衍射表面的高度参 数(采样间隔为4μm)。其中,HMODL的多阶衍射表 面的非球面环带高次项系数与成像像差或斯特列尔比 是高阶非线性关系,容易得到局部最优的结果和不合 理的光学结构。因此,从一个合理的初始位置开始优 化是有必要的。

由于 HMODL 的前表面为多阶衍射表面,它同时 表现出折射和衍射性质,特别是在可见光波段,折射 性质引起的色差是主要的色差来源。因此容易想到, 利用前后表面的消色差关系来设置 HMODL 端到端优 化的初始结构。根据消色差理论,前后两个表面的光 焦度应满足

 $\phi_1 \phi_2$ 

NAFblock

图 6 NAFNet 图像重建网络的结构

Fig. 6 Structure of NAFNet image reconstruction network

式中: $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 分别是前表面和后表面的光焦度;  $v_1$ 、 $v_2$ 分别是前表面和后表面的阿贝数。 $v_1$ 、 $v_2$ 的表 达式为

$$\begin{cases}
\nu_1 = \frac{n_0 - 1}{n_{\rm S} - n_{\rm L}} \\
\nu_2 = \frac{\lambda_0}{\lambda_{\rm S} - \lambda_{\rm L}}
\end{cases},\tag{18}$$

式中: *n*<sub>s</sub>、*n*<sub>L</sub>、*n*<sub>0</sub>分别为可见光波段最小波长、最大 波长和设计波长处的折射率; *λ*<sub>s</sub>、*λ*<sub>L</sub>和 *λ*<sub>0</sub>分别为可见 光波段的最小波长、最大波长和设计波长。由于多阶 衍射表面和后衍射表面在同一片基底上,则 HMODL 在可见光波段的总光焦度为

$$\phi_{\rm VIS} = \phi_1 + \phi_2 \ . \tag{19}$$

根据式 (17) 和式 (18), 可得 HMODL 两个波段的焦距关系为

$$\begin{cases} \phi_{\rm VIS} = \frac{\upsilon_1 - \upsilon_2}{\upsilon_1} \phi_1 \\ \phi_{\rm MWIR} = \frac{n_{0,\rm MWIR} - 1}{n_{0,\rm VIS} - 1} \phi_1 \end{cases},$$
(20)

式中: $n_{0,VIS}$ 和 $n_{0,MWIR}$ 分别是可见光波段和中波红外波 段在设计波长下的折射率。考虑到本章所使用的中波 红外探测器的冷光阑孔径适配f/2 - f/4的光学系统,以 及成像光路中需要考虑分光片/反射镜所需要的空间, 确定 HMODL 在 两个 波 段 的 成 像 焦 距 为  $f_{MWIR}$  = 144.0 mm和 $f_{VIS}$  = 121.7 mm,设计波长分别是 $\lambda_{0,MWIR}$  = 4200.0 nm和 $\lambda_{0,VIS}$  = 720.5 nm。在这里,初始结构的 高度轮廓参数可以在近轴近似下得到,表达式为

$$h_{\text{paraxial}} = \frac{\text{mod}\left(\sqrt{f^2 + r^2} - f, M\lambda_0\right)}{n_0 - 1} , \qquad (21)$$

式中: M 为衍射阶数; mod(·) 为取余函数。

在中波红外的设计波长处,分别取*M*<sub>1</sub>=112和 *M*<sub>2</sub>=0.15(中波红外不需要后表面校正色差,因此衍 射阶接近 0),可得到在近轴近似条件下导出的 HMODL初始结构。可以使用 *SR* 作为判断 HMODL 的聚焦和衍射效率高低的指标。利用式 (1) 对多阶衍 射表面拟合,并通过 Ray-Wave 模型计算 HMODL 初始结构下,它的 SR 随波长和焦距的变化,结果如 图 7 所示。可以看出,HMODL 的初始结构在两个波 段的 SR 相当低,特别在可见光波段,HMODL 已经 无法有效地聚焦;此外,即便在中波红外波段,初始 结构的 SR 也非常低,其最大值仅为 0.4。

然后,基于 Pytorch 软件包提供的自动微分求 解器,设置了光学优化参数和网络参数的学习率。 考虑到 HMODL 中高次项系数与成像像差或斯特列 尔比的高阶非线性关系,给其设置了很小的学习率, 以保证优化过程收敛。对*a*<sub>1</sub>、*a*<sub>2</sub>、*zoff*和后表面高度 参数的学习率分别为1×10<sup>-8</sup>、1×10<sup>-18</sup>、1×10<sup>-7</sup>和 1×10<sup>-6</sup>。

此外,还额外设置了一个光学损失函数,通过约 束优化波长的斯特列尔比 *SR*<sup>2</sup>,来提高 HMODL 的衍 射效率,帮助光学系统在初始阶段正确收敛。这种做 法避免了直接以最终重建图像的偏差作为唯一的优化 目标,因为仅关注图像重建偏差可能会忽略光学系统 的衍射效率影响,从而导致优化过程陷入局部最优的 情况。定义光学损失的表达式为

$$loss_{\rm opc} = \sum_{\lambda} ||1 - SR_{\lambda}||_2^2 \,. \tag{22}$$

在图像重建模块中,为了校正加工误差以及环境 辐射等因素对图像对比度的影响,首先对输入图像的 对比度在[0,1]的范围内进行拉伸和归一化,随后送 入网络以驱动网络学习光学系统的先验信息,并重建 图像。这个阶段网络和光学系统都将根据图像质量损 失,即重建图像的残差来优化参数。网络参数采用 Adam 优化算法,在前 50 个 epoch 的初始学习率设定 为1×10<sup>-4</sup>,然后使用余弦退火调度策略,在后 150 个 epoch 内衰减到零。定义图像质量的损失表达式为

$$loss_{img} = ||i_{rec} - i_c||_1$$
, (23)



图 7 HMODL 初始结构下的斯特列尔比随光谱和焦距的变化

Fig. 7 Variation of Strehl ratio with spectrum and focal length under initial structure of HMOLD



其中: κ为当前迭代次数, K = 200为总迭代次数。 式 (24)保证了 HMODL 在优化的初始阶段优先接受 光学损失的引导,在其到达合理位置后再以最终成像 质量为目标进行联合优化。

本章使用 LLVIP<sup>[24]</sup> 中的可见光-红外数据集,来

驱动 HMODL 计算成像框架的端到端学习。使用 2.2 小节提出的 Ray-Wave 模型,追迹光线的采样数为 12001,像平面 (PSF)的尺寸为 101×101。设置的补丁 大小为 256×256,每个批次的补丁数量为 4。整个训 练在 Intel(R) core(TM) i7-11800H 和 NVIDIA RTX 3070 GPU 上完成,耗时 20 h。整个训练框架如图 8 所示。

#### 2.6 仿真结果与分析

图 9 和图 10 展示了 HMODL 在端到端优化框架



图 8 HMODL 双波段计算成像的端到端优化框架





图9 训练过程中可见光波段的 PSF、退化图像和重建图像

Fig. 9 PSF, degraded images, and reconstructed images in visible band during training process

中迭代次数为 0、20、40、100 和 200 次时, 系统分 别在两个波段上的 PSF (顶行)、光学退化图像 (中间 行)和重建图像(底行)的变化过程。

在训练初期,光学系统首先依据光学损失进行快 速收敛,在40次迭代后,光学系统已基本收敛。此 后,随着光学损失占比的减少,图像质量损失成为优 化过程中主导的因素,指导重建网络和光学系统的进 一步优化。到100次迭代时,所有关键指标均已趋于 稳定,表明系统性能已显著提升。最终,在200次迭 代时,系统接近最优状态,显示出最佳的成像质量和 稳定性。

在训练的最后阶段,图像的峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)和结构相似度 (structural similarity, SSIM) 等评价指标出现了一定的波动,这 可能是由于训练集和测试集之间的差异引起的。选择 测试集上表现最优的一次迭代结果作为最终的系统参 数。图 11 展示了在最优参数下,双波段的 PSF 及其 计算成像的细节。

此外,为了观察优化后 HMODL 的色散特性,计 算了其 SR 在光谱和焦距上的变化,如图 12 所示。优



PSNR=33.98 dB, SSIM=0.98



PSNR=14.32 dB, SSIM=0.66

PSNR=30.15 dB, SSIM=0.87

图 11 最优参数的模拟成像结果

Fig. 11 Simulation imaging results with optimal parameters

250023-81



https://doi.org/10.12086/oee.2025.250023





化后的 HMODL 在两个波段上均已实现消色差 (主要 是折射性质的色差), 红色虚线和黑色虚线分别代表 可见光波段和红外波段的设计焦距。尽管仍存在衍射 性质的色差, 但这些色差可以在后续的图像重建网络 中得到校正。同时, 相比于图 7 中 HMODL 初始结构 的 *SR*, 图 12 显示优化后两个波段共焦波长处的 *SR* 显著提高, 即 HMODL 的聚焦能量已经集中于某一衍 射级次或方向, 这表明 HMODL 在两个波段上的衍射 效率明显提升。

图 13(a) 展示了优化后前表面 (多阶衍射表面) 的 高度轮廓。多阶衍射表面直接基于式 (1) 的参数化模 型进行优化,这种模型不仅能够精确描述前表面的复 杂结构,还便于后续的连续性车削加工,从而确保制 造精度和可靠性。为了便于与前多阶衍射表面对准, 后表面也使用单点金刚石车削工艺实现。将衍射后表面的高度轮廓也用式(1)进行参数化拟合,其结果如图 13(b)所示。表 1 为多阶衍射表面的各非球面环带的具体参数。

# 3 实验结果

#### 3.1 HMODL 原型样机

本章采用单点金刚石车削工艺对 HMODL 的前 后表面进行实际加工,其参数设置与 2.6 小节中描 述的一致。使用的基底材料是宽波段 ZnS,孔径为 40 mm,在设计的可见光波段和 MWIR 波段的 F 数 分别为 3.0 和 3.6,如图 14(a)所示。由于缺乏可见光 和 MWIR 波段的专用分光器,在光路中间放置了一 块可拆卸反射镜来替代可见光/MWIR 分光器。可拆





表1 HMODL 的多阶衍射表面参
-------------------

Table 1	Parameters	of multi-order	diffractive	surface	for HMODI
	r arameters	or multi-order	umacuve	Sunace	

j	<i>r</i> /mm	$a_{j,1}$	$a_{j,2}$	$zoff_j$
1	7.6000	2.7410×10 <sup>-3</sup>	-9.068×10 <sup>-9</sup>	-9.176×10 <sup>-9</sup>
2	10.7400	2.738×10 <sup>-3</sup>	-9.076×10 <sup>-9</sup>	-0.3759
3	13.1500	2.735×10⁻³	-9.077×10 <sup>-9</sup>	-0.7518

卸反射镜使波段间的成像模式转换更便捷,如 图 14(b) 所示。其中,可见光波段传感器的像元尺寸 为 3.45 μm,分辨率为 2048×2448;而 MWIR 波段传 感器的像元尺寸为 15 μm,分辨率为 640×512。由于 仅使用 HMODL 单片光学元件进行成像,几乎省去了 镜头装配的环节。

#### 3.2 双波段成像实验

在成像实验之前,首先对 HMODL 原型样机进行 了进一步校正。具体来说,使用 640 nm 长波通滤光 片和 800 nm 短波通滤光片的组合来获取可见光 (VIS) 波段上的目标波段。对于 MWIR 波段,探测器

# a HMODL b VIS sensor MWIR sensor

图 14 HMODL 的原型样机。 (a) 加工的 HMODL; (b) HMODL 双波段成像系统 Fig. 14 Prototype of HMODL. (a) Fabricated HMODL; (b) Dual-

band imaging system of HMODL

#### https://doi.org/10.12086/oee.2025.250023

的光谱探测范围几乎和目标波段 3700 nm 至 4700 nm 重合。在实验室条件下,使用 2.8 m 焦距的平行光管 来模拟无限远的场景。为了准确校准 HMODL 在目标 波段的点扩散函数 (PSF),分别使用卤素灯光源和红 外差分黑体作为可见光波段和 MWIR 波段的光源。 图 15 展示了校准后的 PSF 以及相应的光路设置。

可以观察到,图 15 中实际测得的 PSF 形状与 图 11 中的仿真结果存在一定误差。具体原因如下: 首先,实际成像时波长在光谱上是连续的,比仿真时 所使用的采样波长更加丰富;其次,虽然在设计阶段 已经模拟了金刚石车削精度误差带来的影响,但实际



图 15 HMODL 原型样机的测试光路以及 PSF 校准结果 Fig. 15 Test optical path of HMODL prototype and PSF calibration results



Scene1

Scene2

Scene3

图 16 户外场景成像结果 Fig. 16 Imaging results of outdoor scenes

加工中误差复杂多样,这在设计阶段难以完全模拟。 有效的解决办法是通过测量系统实际的 PSF,并将其 加入到训练数据集中,对网络参数进行微调,以适应 现实中的透镜加工误差。

此外,根据参考文献<sup>[25]</sup>中的方法,将衍射极限 光斑的3倍半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM)范围内的光强之和与整个像面范围内的光强 之和的比值,作为成像衍射元件的衍射效率。在VIS 波段的宽带衍射效率为28%。因为 MWIR 波段本身 还受环境热辐射影响,在此仅评价 VIS 波段的宽带衍 射效率。

图 16显示了原型样机对三个室外场景的可见光 波段和红外波段所捕获/重建的图像,顶行为可见光 波段的成像结果,底行为红外波段的成像结果。应说 明的是,MWIR 探测器的冷光阑作为成像系统的视场 光阑,遮挡了 MWIR 波段边缘视场的光线,导致图 像出现渐晕现象。为了解决这一问题,分别在可见光 波段和红外波段的图像上选取了中心处 1468 pixel× 1468 pixel 和 400 pixel×400 pixel 大小的区域作为感兴 趣区域 (region of interest, ROI)。这两个区域的大小确 保了两个波段成像视场一致,均为 3.36°全视场。其 中,场景 1显示了在两个波段上的图像在重建前后的 对比度和细节变化。可以看出,HMODL 在可见光波 段的实际成像结果存在明显的对比度衰减情况,经过 所提图像重建模块后恢复为高对比度图像,侧面说明 了所提加工精度误差图像退化模型的有效性。场景 2 显示了原型样机对不同深度的物体的成像效果:近处 的灯杆约为 30 m,而远处的房屋约为 243 m。相比于 传统成像相机,所提 HMODL 双波段成像相机具有大 景深成像能力。场景 3 证明了原型样机在 VIS/MWIR 双波段的信息探测能力。在 VIS 波段,阴影下的灯杆 和黑色塑料袋里的手是难以发现的,而这些在 MWIR 波段非常明显。

## 4 数据分析

本小节使用的光路设置如图 15 所示,能定量评价 HMODL 原型样机的成像性能。首先测试了原型样机的分辨能力,由于缺少可见光和 MWIR 波段通用的标准分辨率目标,本小节使用一块具有特定角频率标记的四目标分辨率靶来测试双波段的分辨能力。如图 17 所示,四目标的分辨率靶的角频率 *f*<sub>0</sub> 由粗到细分别为:35 cycle/mrad、45 cycle/mrad、60 cycle/mrad和 70 cycle/mrad。由于该靶标的标定基于一个 20 m 焦距的平行光管,它实际的空间频率*f*<sub>1</sub>的换算公式为

$$f_{\rm t} = \frac{f_{\rm \theta}}{20} \,. \tag{25}$$







图 18 原型样机在可见光波段对 A1 分辨率板成像结果 Fig. 18 Imaging results of prototype on A1 resolution plate in visible band

计算得到他们对应的空间频率分别为 1.75 lp/mm、 2.25 lp/mm、 3.00 lp/mm 和 3.50 lp/mm。

图 17 表明, HMODL 原型样机在可见光波段的 像面频率至少为 63.27 lp/mm, 而在 MWIR 波段仅为 2.25 lp/mm, 对应的像面频率在 34.37 lp/mm 以上。 实际上,可见光波段的像面分辨率远高于标定靶标的 最高频率 (63.27 lp/mm),为了进一步测量原型样机在 可见光波段的分辨力,使用 ZBN 35003-1989 国家专 业标准分辨率 A1 号靶标测试原型样机在可见光波段 的分辨率,结果如图 18 所示。结果表明,原型样机

在可见光波段可分辨到 A1 号板第 16 单元,对应原 型样机 134.30 lp/mm 的像面频率。事实上这个频率已 经接近系统的 Nyquist 频率 (144.93 lp/mm),此时限 制系统分辨率的主要因素是探测器的像元尺寸,而不 是 HMODL 的光学分辨率。

为了进一步探索原型样机在两个波段下对各个频

率分量的信息的响应能力,在室内条件下,通过平行 光管模拟无限远的成像目标,使用倾斜边缘法计算了 原型样机在两个波段上的调制传递函数 (modulation transfer function, MTF)曲线。在测试中,可见光波段 和 MWIR 波段所使用的光源分别是卤素光和红外差 分黑体,测试结果分别如图 19 所示。



(b) HMODL 在 MWIR 波段重建前后的 MTF 曲线

Fig. 19 MTF of prototype under indoor conditions in both visible and infrared bands. (a) MTF curves of HMODL before and after reconstruction in visible band; (b) MTF curves of HMODL before and after reconstruction in MWIR band

室内 MTF 测试表明,原型样机经过计算重建后, 在可见光波段内的 MTF 曲线已接近衍射极限,在 Nyquist 频率处保持了约 50.0% 的调制度,而在 MWIR 波段下的 Nyquist 调制度为 4.4%。以 10.0% MTF 作为极限对比度,原型样机在 MWIR 的极限像 面分辨率为 27.21 lp/mm,约为衍射极限 (50.00 lp/mm)的 54.0%。参考衍射极限的 MTF 曲线,在 MWIR 波段下的成像分辨率较可见光波段稍差,这可 能是由于 MWIR 波段受到严重的环境辐射影响,在 单片元件成像的情况下难以实现 100% 冷光阑效率。 此外,背景辐射的影响使得 MWIR 波段的 PSF 难以 准确测得,阻碍了 MWIR 重建网络对光学系统先验 信息的学习。需要注意的是,在分析时应主要关注 Nyquist 频率以内的频率分量响应,因为超过 Nyquist 频率的结果可能是不真实的。

另外,本小节通过在室外拍摄距离约 10 m 的棋 盘格图像,对原型样机成像视场的一致性和室外成像 的稳定性也作出定量评估,测试结果如图 20 所示。 图 20(a) 是可见光测试结果,图 20(b) 是 MWIR 波段 的测试结果。应说明的是,黑白相间棋盘格图案理论 上只能在可见光波段被准确观察到,因为黑色方格和 白色方格在可见光波段的反射率差异,可以产生分析 所需的边缘。然而,由于黑白方格在阳光下对电磁波 谱的吸收率差异,产生了有趣的现象。黑色方 格吸收更多热量,这使得他们在 MWIR 波段上因为 温度差异也产生了"黑白边缘",尽管其对比度正好 相反。

可以看出,相比于室内的测试结果,原型样机在





Fig. 20 MTF tests of prototype at different fields of view outdoors. (a) Visible band checkerboard images taken by prototype outdoors and MTF curves before and after restoration at different fields of view; (b) MWIR band checkerboard images taken by prototype outdoors and MTF curves before and after restoration at different fields of view.

两个波段上的 MTF 曲线都有一定程度的下降,这是 由于棋盘格依靠外部光源反射,不能产生具有强对比 度的边缘,尤其是 MWIR 波段,仅依靠黑白方格略 微的温度差异产生的弱边缘进行测试。图 20 表明了 原型样机在中心视场和边缘视场处成像性能的一致性。 至少在 2.39°视场范围内,HMODL 原型样机受轴外 像差影响较小。

最后,为了证明 HMODL 原型样机的实用性,测 试了系统的噪声等效温差 (noise equivalent temperature difference, NETD),用来评估成像系统在 MWIR 波段 能够检测到的最小温差。NETD 测试高度依赖于探测 器图像的灰度值,因此测试过程中未包含重建网络。 温度范围设置为 25.0 ℃ 至 29.5 ℃,间隔为 0.5 ℃。 在 25.0 ℃ 至 29.5 ℃ 范围内,光学系统和探测器组合 的最大 NETD 为 80 mK,而单独的探测器最大 NETD 为 25 mK,如图 21 所示。





# 5 结 论

针对当前端到端衍射元件宽波段优化方法中存在的缺陷——以牺牲其他波长的衍射效率为代价来实现 多波长共焦成像,提出了一种使用双层衍射结构的 HMODL的设计方案。该设计方案旨在保证高聚焦效 率的同时校正色差,从而拓展衍射元件的成像波段。

具体而言,以单片 HMODL 在可见光 (640~ 800 nm)和 MWIR (3700~4700 nm) 双波段计算成像的 应用为例,首先解决了双层 HMODL 的分析模型问题。 由于多阶衍射表面具有更深的结构深度,在双层衍射 结构和非近轴条件下,传统的 TEA 模型不再适用。 因此,提出了 Ray-Wave 模型,该模型结合了相干光 线追迹计算和波动光学理论,实现了对 HMODL 光场 调制作用及成像模型的精确分析。接下来,构建了 HMODL 前后表面的计算模型,确保其与单点金刚石 车削加工工艺要求兼容。在此基础上,使用轻量级 NAF 模块构建了用于重建 HMODL 双波段成像的 NAFNet 网络。根据最终成像质量,对 HMODL 的光 学参数和网络参数进行了端到端优化。

实验结果表明,通过这种端到端的设计方法,成 功实现了 40 mm 口径的 HMODL 设计,并在可见光 和 MWIR 双波段上取得了高质量的仿真计算成像结 果。室内和室外的成像实验结果表明,HMODL 在可 见光波段和 MWIR 波段的 Nyquist 频率的静态传函分 别为 50.0% 和 4.4%,其在至少 3.36°的成像视场的范 围内保持较好的空间一致性,此外还具有至少 30~243 m 的大景深成像效果。所提模型首次实现了 仅用单片衍射元件实现可见光/MWIR 双波段成像, 为未来高性能、多功能的智能光学系统设计提供了新 的思路和技术参考。

利益冲突:所有作者声明无利益冲突

## 参考文献

- [1] Wang L, Liu B, Wu C, et al. Characteristics analysis and test of LiDAR based on diffraction lens receiving[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(3): 240032.
   王玲, 刘博, 吴城,等. 基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及 测试[J]. 光电工程, 2024, **51**(3): 240032.
- [2] Park K W, Han J Y, Bae J, et al. Novel compact dual-band LOROP camera with telecentricity[J]. Opt Express, 2012, 20(10): 10921–10932.
- [3] Li R C, Feng L J, Xu K J, et al. Optical design of an integrated imaging system of optical camera and synthetic aperture radar[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(22): 36796–36812.
- [4] Li R C, Zou G Y, Feng L J, et al. Design of a dual-band compact integrated remote sensing system for visible light and long-wave infrared[J]. *Appl Sci*, 2021, **11**(20): 9370.
- [5] Guo Y L, Yu X, Yu T, et al. Design of visible and IR infrared dualband common-path telescope system[J]. *Proc SPIE*, 2017, 10616: 1061613.
- [6] Pinilla S, Fröch J E, Miri Rostami S R, et al. Miniature color camera via flat hybrid meta-optics[J]. Sci Adv, 2023, 9(21): eadg7297.
- [7] Bayati E, Pestourie R, Colburn S, et al. Inverse designed extended depth of focus meta-optics for broadband imaging in the visible[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(11): 2531–2540.
- [8] Jeon D S, Baek S H, Yi S, et al. Compact snapshot hyperspectral imaging with diffracted rotation[J]. ACM Trans Graph, 2019, 38(4): 117.
- [9] Sun Q L, Wang C L, Fu Q, et al. End-to-end complex lens design with differentiate ray tracing[J]. ACM Trans Graph, 2021, 40(4): 71.
- [10] Yang X G, Fu Q, Heidrich W. Curriculum learning for ab initio

https://doi.org/10.12086/oee.2025.250023

deep learned refractive optics[J]. *Nat Commun*, 2024, **15**(1): 6572.

- [11] Yang X G, Souza M, Wang K Y, et al. End-to-end hybrid refractive-diffractive lens design with differentiable ray-wave model[C]//S/GGRAPH Asia 2024 Conference Papers, Tokyo, 2024: 47. https://doi.org/10.1145/3680528.3687640.
- [12] Tseng E, Mosleh A, Mannan F, et al. Differentiable compound optics and processing pipeline optimization for end-to-end camera design[J]. ACM Trans Graph, 2021, 40(2): 18.
- [13] Nikonorov A, Skidanov R, Fursov V, et al. Fresnel lens imaging with post-capture image processing[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Boston, 2015: 33–41. https://doi.org/10.1109/CVPRW.2015.7301373.
- [14] Peng Y F, Fu Q, Heide F, et al. The diffractive achromat full spectrum computational imaging with diffractive optics[C]// SIGGRAPH ASIA 2016 Virtual Reality Meets Physical Reality: Modelling and Simulating Virtual Humans and Environments, Macau, China, 2016: 4.

https://doi.org/10.1145/2992138.2992145.

- [15] Peng Y F, Sun Q L, Dun X, et al. Learned large field-of-view imaging with thin-plate optics[J]. ACM Trans Graph, 2019, 38(6): 219.
- [16] Sitzmann V, Diamond S, Peng Y F, et al. End-to-end optimization of optics and image processing for achromatic extended depth of field and super-resolution imaging[J]. ACM Trans Graph, 2018, 37(4): 114.

#### 作者简介



赵玺竣 (1996-), 男, 博士研究生, 研究方向为 计算光学、衍射光学、深度学习等。 E-mail: 18581992960@163.com

- [17] Akpinar U, Sahin E, Meem M, et al. Learning wavefront coding for extended depth of field imaging[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2021, **30**: 3307–3320.
- [18] Milster T D, Kim Y S, Wang Z C, et al. Multiple-order diffractive engineered surface lenses[J]. *Appl Opt*, 2020, **59**(26): 7900–7906.
- [19] Wang Z C, Kim Y, Milster T D. High-harmonic diffractive lens color compensation[J]. *Appl Opt*, 2021, **60**(19): D73–D82.
- [20] Zhang Q B, Yu Z Q, Wang M G, et al. Centimeter-scale achromatic hybrid metalens design: a new paradigm based on differentiable ray tracing in the visible spectrum[Z]. arXiv: 2404. 03173, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.03173.
- [21] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. 4th ed. USA: W. H. Freeman, 2017.
- [22] Laborde V, Loicq J, Habraken S. Modeling infrared behavior of multilayer diffractive optical elements using Fourier optics[J]. *Appl Opt*, 2021, **60**(7): 2037–2045.
- [23] Chen L Y, Chu X J, Zhang X Y, et al. Simple baselines for image restoration[C]//17th European Conference on Computer Vision, Tel Aviv, 2022: 17–33. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20071-7\_2.
- [24] Jia X Y, Zhu C, Li M Z, et al. LLVIP: a visible-infrared paired dataset for low-light vision[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, Montreal, 2021: 3489–3497. https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.00389.
- [25] Mohammad N, Meem M, Shen B, et al. Broadband imaging with one planar diffractive lens[J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 2799.



【通信作者】范斌(1977-),男,研究员。 2006年从中国科学院光电技术研究所获得博士 学位,并于2010年5月至8月访问美国亚利 桑那大学进行研究。近年来,主要从事先进光 学制造技术和光学系统成像技术的研究。 E-mail: fanbin@ioe.ac.cn



# Theoretical and experimental study on end-toend hybrid multi-order diffractive lens design

Zhao Xijun<sup>1,2,3</sup>, Fan Bin<sup>1,2,3\*</sup>, Liao Jun<sup>4</sup>



Computational imaging model and end-to-end optimization framework of HMODL

**Overview:** High-speed maneuvering platforms increasingly demand multi-band detection and lightweight electrooptical payloads. Addressing these needs, this paper introduces a novel hybrid multi-order diffractive lens (HMODL) design coupled with an advanced image reconstruction network. To the best of our knowledge, this is the first demonstration of achieving dual-band imaging (640-800 nm visible spectrum and 3700-4700 nm mid-wave infrared spectrum) using a single diffractive element. This breakthrough significantly reduces the size, weight, and complexity of optical systems required for such applications.

The HMODL design utilizes a dual-layer diffraction structure formed by the front and rear surfaces, where different diffraction orders are employed to focus light waves in each layer. This innovative approach provides high operability and flexibility, making it especially suitable for operation over a wide wavelength range. The dual-layer configuration enables efficient and simultaneous focusing of light across both visible and infrared bands, overcoming previous limitations associated with single-band or bulky multi-element designs.

A key aspect of this work is the development of a Ray-Wave imaging model specifically tailored for analyzing nonthin or multi-layer diffractive elements. Under reasonable approximations, this model offers a fast and accurate analytical method for deal with complex diffraction phenomena. It also facilitates the calculation of the point spread function (PSF), which is crucial for evaluating imaging performance. For rotationally symmetric models, the Kirchhoff diffraction integral can be efficiently computed through the optical path and intensity interpolation, enabling gradient calculations essential for end-to-end optimization frameworks.

Furthermore, we proposed a differentiable Ray-Wave model that enhances the accuracy and speed of simulations for multi-order diffractive lenses (MODLs). This model supports the optimization process by enabling precise gradient calculations, thereby improving the overall efficiency of the design and validation phases. By integrating this model into an end-to-end learning framework, the system autonomously learns optimal optical parameters without the need for extensive human expert guidance.

To validate our approach, we fabricated a prototype HMODL with a 40 mm aperture, demonstrating impressive spatial resolutions of 124 lp/mm in the visible band and 12 lp/mm in the infrared band. Additionally, the prototype achieved an infrared noise equivalent temperature difference (NETD)  $\leq 80$  mK at room temperature, confirming its practical utility in real-world scenarios. These results highlight the potential of HMODLs for enhancing the capabilities of electro-optical systems in various applications, including surveillance, navigation, and scientific research.

In summary, the main contributions of this paper are as follows: 1) the introduction of an HMODL design capable of dual-band imaging; 2) the development of a differentiable Ray-Wave model suitable for non-thin diffractive elements; 3) the fabrication and validation of a prototype showcasing superior imaging performance. These advancements pave the way for future innovations in compact and multi-functional optical systems.

Zhao X J, Fan B, Liao J. Theoretical and experimental study on end-to-end hybrid multi-order diffractive lens design[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(5): 250023; DOI: 10.12086/oee.2025.250023

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation (62075220)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; <sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics Thin Film Camera Overall Assembly Chamber, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; <sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>4</sup>The Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Equipment Department of the Military Aerospace Forces in Chengdu, Chengdu, Sichuan 610209, China \* E-mail: fanbin@ioe.ac.cn