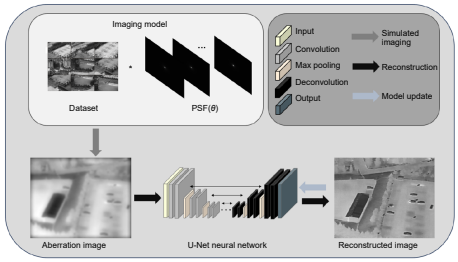
Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程
数智光场调控专题

Article
2025 年, 第 52 卷, 第 11 期

DOI: 10.12086/oee.2025.250224 CSTR: 32245.14.oee.2025.250224

深度学习辅助的二次相位超透镜实现 170°视场高质量成像



刘 博[1]，张运强[2]，谢 鑫[1,2*]，甘雪涛[1]，赵建林[1]

[1]西北工业大学物理科学与技术学院，光场调控与信息感知工业和信息化部重点实验室，陕西省光信息技术重点实验室，陕西 西安 710129；
[2]空基信息感知与融合全国重点实验室，河南 洛阳 471000

摘要：二次相位超透镜能够将入射光的旋转对称性转换为焦斑的平移对称性，在大视场成像方面具有重要潜力。然而，其固有的严重像差影响了实际成像质量。为此，本文构建了基于 U-Net 卷积神经网络的图像恢复模型，旨在通过结合后端图像处理的方法提升二次相位超透镜的成像性能。结果表明，在 0°至 85°半视场角范围内，恢复图像的成像质量获得显著提升——平均结构相似性 (SSIM) 从 0.74 提高至 0.78 以上，平均峰值信噪比 (PSNR) 从 16.0 dB 提升至 21.5 dB 以上。特别是在 85°大角度入射下，恢复图像的 SSIM 仍然可达 0.7455，PSNR 超过 20.0 dB，实现了 170°视场的高对比度成像。该方法无需引入额外光学元件，显著提升了超透镜在增强现实/虚拟现实 (AR/VR) 及生物医学成像等紧凑型系统中的适用性。

关键词：二次相位；超透镜；大视场；深度学习

中图分类号：O436 **文献标志码：**A

刘博，张运强，谢鑫，等. 深度学习辅助的二次相位超透镜实现 170°视场高质量成像 [J]. 光电工程，2025，**52**(11): 250224
Liu B, Zhang Y Q, Xie X, et al. Deep learning-assisted quadratic metalens enables high-quality imaging within a 170° field of view[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(11): 250224

Deep learning-assisted quadratic metalens enables high-quality imaging within a 170° field of view

Liu Bo[1], Zhang Yunqiang[2], Xie Xin[1,2*], Gan Xuetao[1], Zhao Jianlin[1]

[1]Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Key Laboratory of Light Field Manipulation and Information Acquisition, Ministry of Industry and Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China;
[2]National Key Laboratory of Air-Based Information Perception and Fusion, Luoyang, Henan 471000, China

Abstract: Quadratic phase metalens can transform the rotational symmetry of incident light into the translational symmetry of focal spots, showing significant potential for wide-field-of-view imaging. However, its inherent severe aberrations affect the actual image quality. To address this, this paper constructs an image restoration model based

收稿日期：2025-07-27；修回日期：2025-09-29；录用日期：2025-09-30；网络出版日期：2025-11-25
基金项目：空基信息感知与融合全国重点实验室和航空科学基金联合资助项目 (20220001053004)；陕西省科协青年人才托举计划 (20230521)
*通信作者：谢鑫，xinxie@nwpu.edu.cn
版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

on a U-Net neural network, aiming to enhance the imaging performance of the quadratic phase metalens by incorporating post-processing methods. The results demonstrate that within the half-field-of-view range of 0° to 85°, the imaging quality of the restored images is significantly improved — the average structural similarity (SSIM) increases from 0.74 to above 0.78, and the average peak signal-to-noise ratio (PSNR) rises from 16.0 dB to above 21.5 dB. Particularly at a large incident angle of 85°, the SSIM of the restored image can still reach 0.7455, with a PSNR exceeding 20.0 dB, achieving high-contrast imaging over a 170° field of view. This method does not require additional optical components, thus significantly enhancing the potential applicability of metalenses in compact systems such as augmented reality/virtual reality (AR/VR) and biomedical imaging.

Keywords: quadratic phase; metalens; large field of view; deep learning

1 引　言

超表面是一种能够在亚波长尺度下对电磁波进行灵活调控的人工二维结构，它突破了超材料三维结构的限制，有利于光学系统向轻量化、微型化方向发展[1-2]。其中，超透镜作为一种典型的超构光学元件，已在成像[3-4]以及增强现实/虚拟现实 (AR/VR)[5-6]等领域展现出巨大潜力。然而，单层超透镜存在显著的离轴像差问题，导致其成像视场受限，无法获得更为丰富的物空间信息，制约了其在大视场成像领域的实际应用发展[7-8]。

为突破视场限制，研究者们提出了多种解决方案。其中，通过在超透镜前端集成孔径光阑，能够优化光线路径，并且有效减少彗差、像散等离轴像差对边缘视场成像质量的破坏，从而在一定程度上拓宽超透镜的成像视场[9]。此外，相较于单层超透镜，双层构型超透镜通过增加额外的相位调制层，能够有效地校正离轴像差，进一步扩展成像视场[10-12]，但这类结构对制备过程中的对准精度要求极高。值得关注的是，Pu 等[13]提出的二次相位超透镜设计，在物空间旋转对称性与像空间平移对称性之间建立了数学映射关系，其理论成像视场接近 180°，为实现大视场成像开辟了新途径。然而，该方法在大视场成像过程中存在严重的像差，导致成像质量显著下降。尽管引入孔径光阑[14-15]或波矢滤波元件[16-17]等辅助结构可补偿这些像差，但同时会降低器件效率且增加系统复杂度。因此，在不引入额外光学元件的前提下实现大视场高质量成像，已成为阻碍超透镜实际应用的关键瓶颈。近年来，超透镜与深度学习的结合为突破传统光学限制提供了新思路。通过神经网络对超透镜的成像结果进行计算处理，被证实能够提升分辨率，并将有效视场扩展至 70°以上[18-19]，这为解决视场角受限问题提供了行之有效的手段。

本文提出了一种针对二次相位超透镜的深度学习图像恢复模型。首先，设计了具有二次相位分布的超透镜，分析了不同入射角度下的聚焦性能。进一步，构建并优化了基于 U-Net 的卷积神经网络模型，用于恢复像差图像。在 0~85°不同半视场角下对峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM) 进行综合评估，结果表明，所设计的超透镜在不同视场角下，成像结果与真实图像之间的平均 SSIM 大于 0.74，平均 PSNR 超过 16.0 dB。经过 U-Net 神经网络对图像恢复后，其平均 SSIM 大于 0.78，平均 PSNR 大于 21.5 dB。此外，在 85°大角度入射条件下，该神经网络仍能有效恢复像差图像，恢复后的图像 SSIM 达 0.7455，PSNR 达 20.6691 dB。这些结果证实了所设计的图像恢复模型能够建立像差图像与真实图像之间的映射关系，从而有效提升二次相位超透镜的成像质量。

2 二次相位超透镜设计

2.1 设计原理

对于二次相位超透镜，其在位置 (x, y) 处的空间变化相位分布[13]可表示为

$$\varphi(x,y) = -\frac{k_0(x^2+y^2)}{2f}, \tag{1}$$

式中：$k_0=2\pi/\lambda$ 为自由空间波数，其中 λ 为波长；f 为焦距。当入射光束在 x–z 平面内以偏离光轴的角偏差 θ_i 斜入射到二次相位超透镜时，像平面上的焦斑相较于垂直入射情形沿 x 轴产生 $f\sin\theta_i$ 的横向偏移。相应的输出相位分布可推导为

$$\begin{aligned}\varphi(x,y) &= -\frac{k_0}{2f}(x^2+y^2) + k_0 x\sin\theta_i \\ &= -\frac{k_0}{2f}\left[(x-f\sin\theta_i)^2+y^2\right] + \frac{f k_0 \sin^2\theta_i}{2},\end{aligned} \tag{2}$$

式中：$k_0 x\sin\theta_i$ 为斜入射光引入的梯度相位。该二次相位超透镜有效地将入射光的旋转对称性转换为焦斑的平移对称性。这种固有的横向位移机制在显著抑制离轴彗差的同时，实现了工作视场角的拓宽。

2.2 结构设计与分析

设计的二次相位超透镜如图 1 所示。图 1(a) 插图展示了超透镜的单元结构，其上方为硅柱，基底为氟化钙，并按正方形晶格周期排列。单元结构参数定义为周期 p=6 μm，柱高 h=6 μm。图 1(a) 展示了透射效率随硅柱半径 R 的变化曲线，尽管透射率存在轻微波动，但始终保持较高水平，平均透射率超过 0.96。图 1(b) 展示了相移随 R 的变化关系，通过改变硅柱半径 R 可实现 0~2π 范围的连续相位调制，满足超透镜相位设计需求。此外，根据式 (2) 对二次相位超透镜的相位分布进行设计，结果如图 1(c) 所示，其中设计波长为 11 μm，超透镜半径 R 为 400 μm，焦距 f 为 350 μm。随后，基于单元结构参数与相移之间的映射关系，构建了超透镜的全模结构，如图 1(d) 所示。

为了验证所设计的二次相位超透镜的大视场聚焦性能，仿真分析了不同入射角度下的聚焦情况，结果如图 2 所示。随着入射角增大，焦点的理论位移量为 $\Delta x=f\sin\theta$，仿真结果与理论值高度吻合。同时，在 0° 至 85°半视场角范围内，入射角增大对聚焦光斑质量的影响几乎可忽略，均能实现有效聚焦。值得注意的是，聚焦光斑周围存在明显的杂散光，导致成像分辨率下降。

3 基于 U-Net 神经网络的图像恢复模型

3.1 设计原理

为提升二次相位超透镜的成像质量，本文基于 U-Net 神经网络架构建立了一种图像恢复模型，其结构示意图如图 3 所示，其中灰色箭头表示通过点扩散函数 (PSF) 卷积生成退化图像的过程，蓝色箭头表示 U-Net 网络训练流程，黑色箭头表示图像恢复过程。训练数据集采用 Suo 等[20] 提供的 2029 幅高分辨率图像

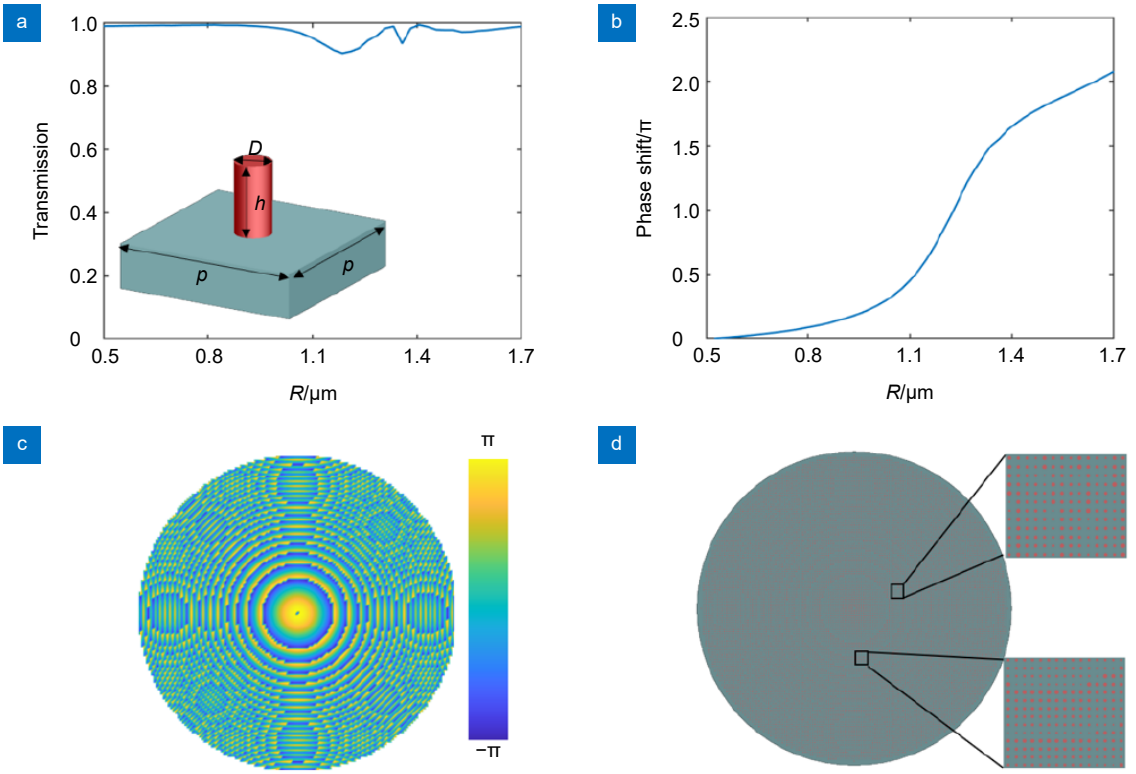


图 1 二次相位超透镜。(a) 硅纳米柱在波长 λ=11 μm 下的透射率随半径变化曲线，插图为单元结构示意图；(b) 纳米柱半径 R 与相移的对应关系；(c) 二次相位超透镜的目标相位分布；(d) 二次相位超透镜的整体结构示意图

Fig. 1 The quadratic metalens. (a) Transmittance versus radius for silicon nanopillars at wavelength λ=11 μm, with the schematic of the unit cell structure shown in the inset; (b) Corresponding relationship between nanopillar radius R and phase shift; (c) Target phase distribution of the quadratic metalens; (d) Schematic diagram of the overall structure of the quadratic metalens

(分辨率为 640 pixel×512 pixel)。其中，1500 幅图像用于网络训练，300 幅用于验证，229 幅用于最终性能评估。为模拟超透镜的成像退化过程，目标图像通过与二次相位超透镜在不同视场角对应的点扩散函数 (PSF) 进行卷积运算实现 (图 3 灰色箭头所示)。为确保模拟的准确性，像元尺寸的设定需满足奈奎斯特采样定理，这里，像元尺寸 $\Delta x = 1$ μm，之后对 PSF 进行离散化采样并裁剪至合适的尺寸。在卷积过程中，根据不同视场角选取对应的 PSF 核，并严格保证其中心与图像像素网格中心对齐。此外，该优化框架采用

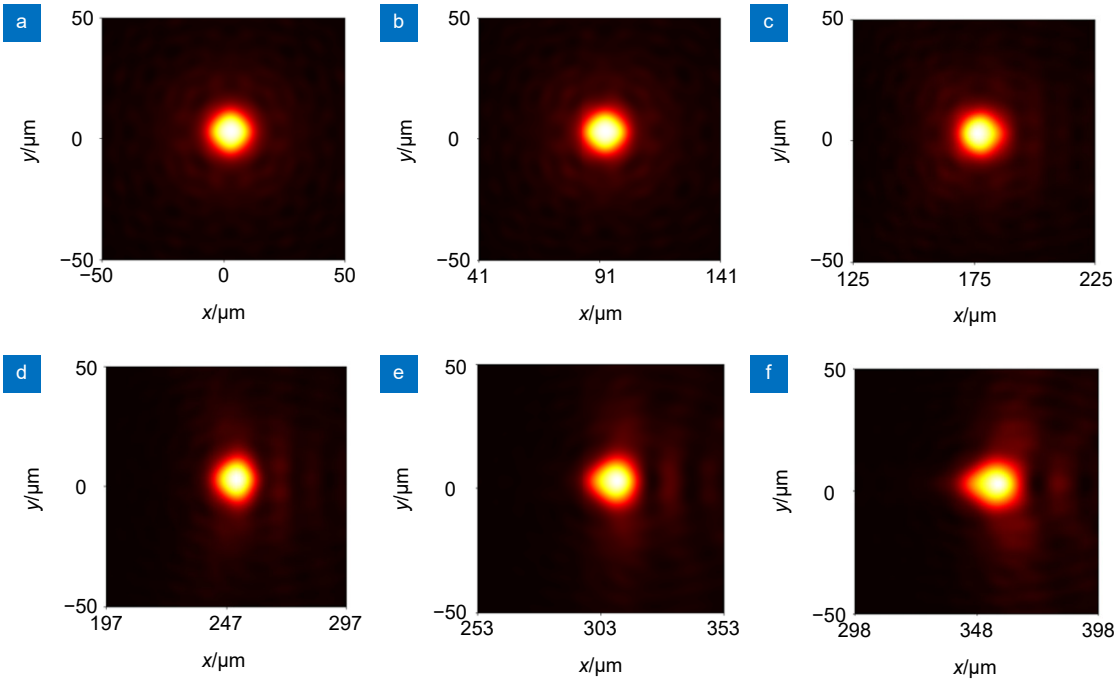


图 2　不同入射角度下二次相位超透镜聚焦性能的仿真结果。(a-f) 分别对应 0°、15°、30°、45°、60°和 85°入射角的聚焦结果

Fig. 2　Focusing performance of the quadratic metalens under different incident angles. (a-f) Focusing results corresponding to incident angles of 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, and 85°, respectively

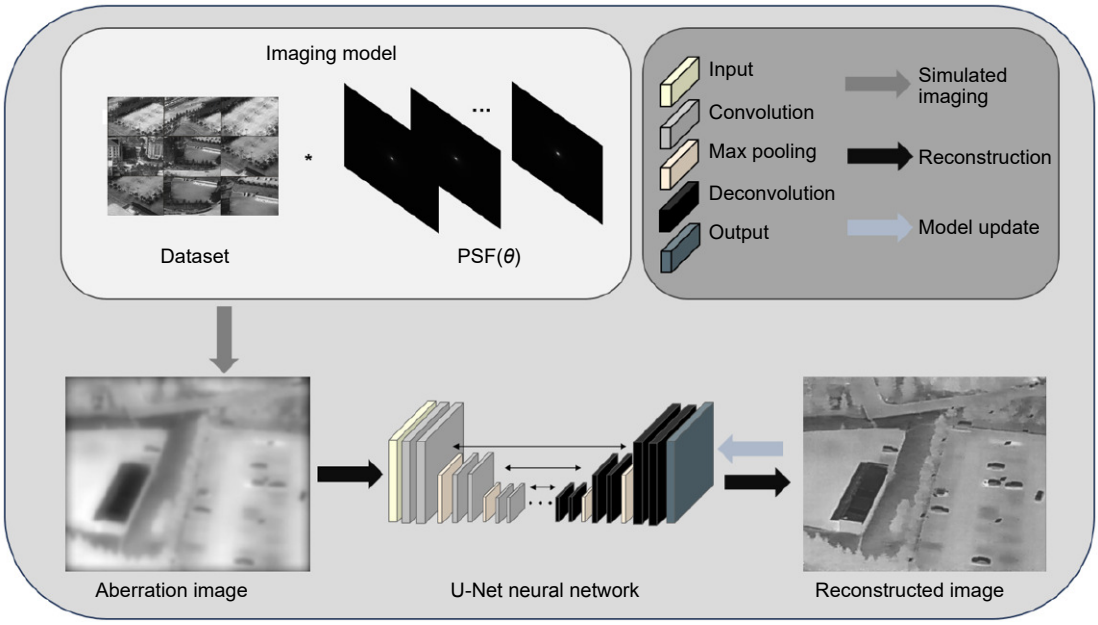


图 3　基于深度学习的超透镜模型

Fig. 3　Deep learning-based metalens model

均方误差 (MSE) 作为损失函数，结合 Adam 优化器进行求解，以保障像差校正学习过程中的稳定收敛，具体神经网络超参数列于表 1。

如图 4 所示，这里采用 U-Net 神经网络实现图像恢复。相比其他神经网络结构，U-Net 通过引入跳跃连接机制，在一定程度上缓解了深层网络中梯度消失的问题。此外，U-Net 结构简洁、参数量较少，适用于小规模数据集的训练，在有限计算资源条件下仍能够取得较好的图像恢复效果。U-Net 神经网络采用对称的四层编码器-解码器结构，编码器路径通过多次下采样操作逐步提取退化图像的多尺度特征，并压缩其空间维度；解码器路径则通过上采样操作逐步恢复图像的空间分辨率，并借助跳跃连接融合编码器相应层级的高分辨率细节特征，从而有效保持重建图像的空间结构完整性。训练过程中，采用 MSE 作为损失函数，通过反向传播优化网络参数，该过程如图 3 蓝色箭头所示。

3.2 结果与讨论

为系统评估二次相位超透镜的成像性能以及神经网络的图像恢复能力，图 5 对比了该超透镜的直接成像结果与经图像恢复模型处理后的结果。由图 5 可知，二次相位超透镜在不同视场角下均表现出良好的成像稳定性。这一特性源于其将入射光的旋转对称性有效地转换为焦斑的平移对称性，同时保持了焦斑轮廓的完整性。然而，受其固有像差影响，原始成像结果的对比度和分辨率相对较低。相比之下，经 U-Net 神经网络后处理的图像，其对比度与分辨率均得到显著提升，效果更接近于最右侧列所示的目标图像。此外，由于 U-Net 神经网络在重建过程中难以完全复原丢失的高频信息以及所用的 MSE 损失函数更倾向于平滑优化，因此恢复图像质量与目标图像存在一定的差距。这可以通过引入物理成像先验知识或采用更为复杂的神经网络结构等方法，进一步提升图像的恢复效果。

表 2 对比了不同半视场角下的图像恢复效果。随

表 1　神经网络超参数

Table 1　Neural network hyperparameters

Parameters of network	The inverse network
Optimizer	Adam
Learning rate	0.001
Batch size	10
Activation function	ReLU
Loss function	MSE

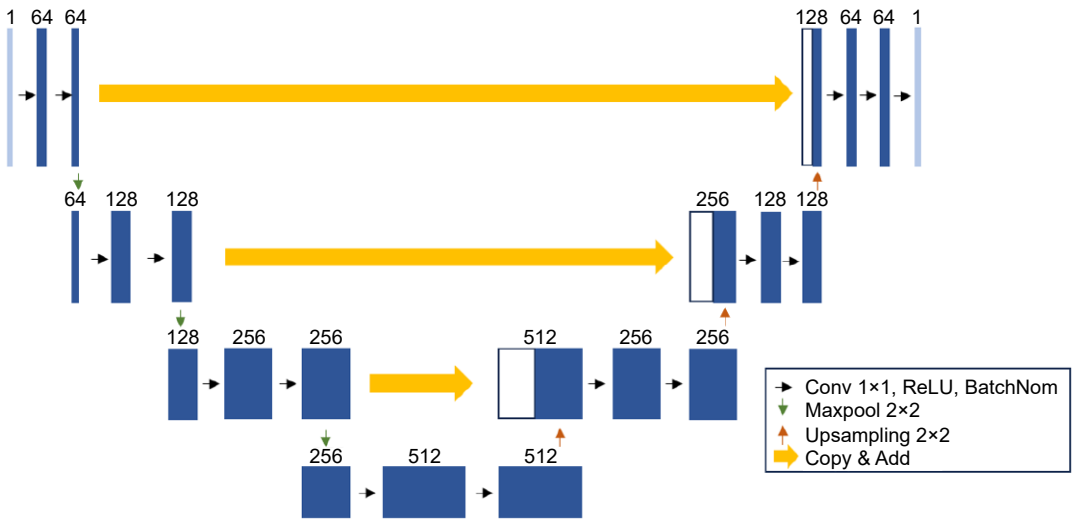


图 4　U-Net 神经网络结构

Fig. 4　U-Net neural network architecture

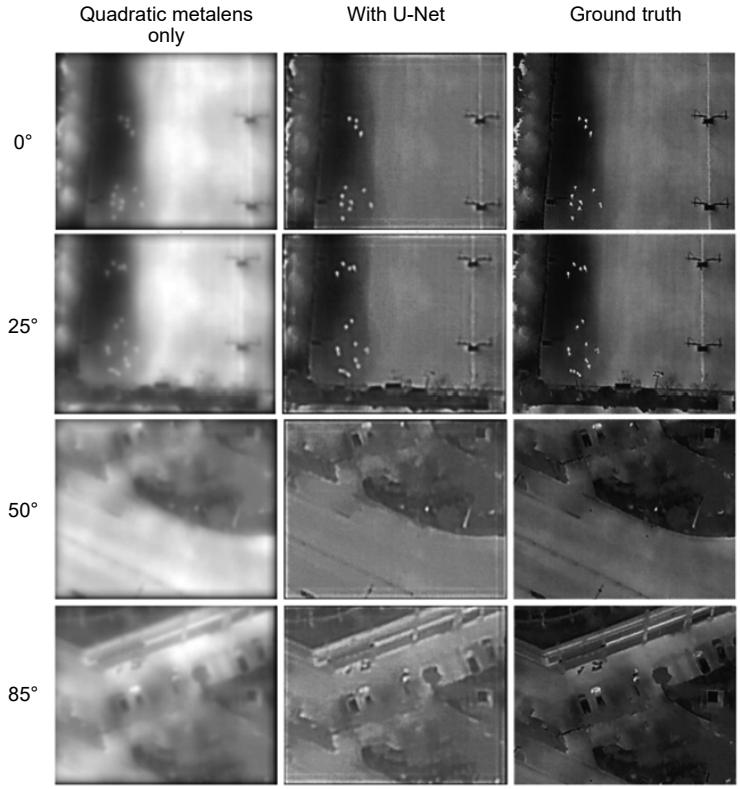


图 5　有无经过图像恢复模型处理后的二次相位超透镜成像效果对比

Fig. 5　Imaging comparison of the quadratic metalens with and without image restoration processing

表 2　不同半视场角下图像恢复模型的性能提升效果对比

Table 2　Comparison of performance improvements by the image restoration model at different half-field angles

Half-FOV/(°)	SSIM		PSNR/dB	
	Without	With	Without	With
0	0.7547	0.8004	16.2346	21.8880
25	0.7506	0.7972	16.1002	21.9000
50	0.7509	0.7918	16.0815	21.7523
85	0.7347	0.7455	15.7193	20.6691

着半视场角的增大，成像质量呈现缓慢下降的趋势。值得注意的是，经图像恢复模型处理后，所有视场角下的成像结果在 SSIM 与 PSNR 两项指标上均获得显著提升。SSIM 从感知层面评估了图像在亮度、对比度和结构信息方面的保真度，其值越接近 1，代表图像的结构完整性越好；而 PSNR 则从信号角度反映了图像像素值的误差水平，数值越高说明失真越小。在 85°的半视场角条件下，恢复后图像的 SSIM 和 PSNR 分别达到 0.7455 和 20.6691 dB，显著优于原始退化图像。以上结果表明，所设计的图像恢复模型能够有效恢复图像细节，提升成像质量。

4　结　论

本研究提出了一种深度学习辅助的大视场高分辨超透镜成像方案。首先基于传播相位的原理设计了二次相位型超透镜；进一步，构建了基于 U-Net 神经网络的图像恢复模型以提升其成像质量。结果表明，经该图像恢复模型处理后，不同视场下的 PSNR 和 SSIM 指标均维持在较高水平。尤为重要的是，该方法融合超透镜的前端光学设计与神经网络的后端图像处理，在不引入额外光学元件且保持单层紧凑结构的前提下，实现了 170°的大视场高分辨成像。当前该工作主要针对单波长设计，未来将进一步探索宽带成像

性能，通过优化网络结构、采用数据与物理先验融合等方法，实现宽波段高分辨率重建，推动超透镜在微型成像系统中的实际应用。

作者贡献

刘博，张运强：研究资料的收集、分析，论文写作；谢鑫，甘雪涛，赵建林：指导论文选题、论文修改。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Xu T, Wang C T, Du C L, et al. Plasmonic beam deflector[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(7): 4753−4759.

[2] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333−337.

[3] Colburn S, Zhan A L, Majumdar A. Metasurface optics for full-color computational imaging[J]. *Sci Adv*, 2018, **4**(2): eaar2114.

[4] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, **13**(3): 220−226.

[5] Lee G Y, Hong J Y, Hwang S, et al. Metasurface eyepiece for augmented reality[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 4562.

[6] Li Z Y, Lin P, Huang Y W, et al. Meta-optics achieves RGB-achromatic focusing for virtual reality[J]. *Sci Adv*, 2021, **7**(5): eabe4458.

[7] Zhang S Y, Kim M H, Aieta F, et al. High efficiency near diffraction-limited mid-infrared flat lenses based on metasurface reflectarrays[C]//*Proceedings of 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2016: 1–2.

[8] Hayward T M, Qadri S N, Brimhall N, et al. Multilevel diffractive lens in the MWIR with extended depth-of-focus and wide field-of-view[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(10): 15384−15391.

[9] Engelberg J, Zhou C, Mazurski N, et al. Near-IR wide-field-of-view Huygens metalens for outdoor imaging applications[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(2): 361−370.

[10] Groever B, Chen W T, Capasso F. Meta-lens doublet in the visible region[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(8): 4902−4907.

[11] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**(1): 13682.

[12] Huang Z Y, Qin M S, Guo X W, et al. Achromatic and wide-field metalens in the visible region[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(9): 13542−13551.

[13] Pu M B, Li X, Guo Y H, et al. Nanoapertures with ordered rotations: symmetry transformation and wide-angle flat lensing[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(25): 31471−31477.

[14] Kuang Y, Wang S, Mo B C, et al. Palm vein imaging using a polarization-selective metalens with wide field-of-view and extended depth-of-field[J]. *npj Nanophoton*, 2024, **1**(1): 24.

[15] Zhang F, Pu M B, Li X, et al. Extreme-angle silicon infrared optics enabled by streamlined surfaces[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(11): 2008157.

[16] Dong L H, Kong W J, Zhang F, et al. Ultra-thin sub-diffraction metalens with a wide field-of-view for UV focusing[J]. *Opt Lett*, 2024, **49**(5): 1189−1192.

[17] Xie T, Zhang F, Pu M B, et al. Ultrathin, wide-angle, and high-resolution meta-imaging system via rear-position wavevector filter[J]. *Laser Photonics Rev*, 2023, **17**(9): 2300119.

[18] Liu Y, Li W D, Xin K Y, et al. Ultra-wide FOV meta-camera with transformer-neural-network color imaging methodology[J]. *Adv Photonics*, 2024, **6**(5): 056001.

[19] Park Y, Kim Y, Kim C, et al. End-to-end optimization of metalens for broadband and wide-angle imaging[J]. *Adv Opt Mater*, 2025, **13**(9): 2402853.

[20] Suo J S, Wang T Y, Zhang X Z, et al. HIT-UAV: a high-altitude infrared thermal dataset for Unmanned Aerial Vehicle-based object detection[J]. *Sci Data*, 2023, **10**(1): 227.

作者简介

刘博 (2001-)，男，博士研究生，主要从事光学超构表面等方面的研究。

E-mail：bo_liu@mail.nwpu.edu.cn

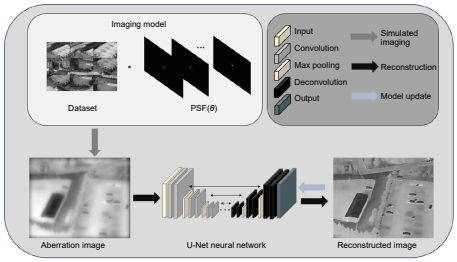
【通信作者】谢鑫 (1992-)，男，博士，副教授，主要从事光学超构表面、广义几何相位、液晶光子器件等方面的研究。

E-mail：xinxie@nwpu.edu.cn

扫描二维码，获取 PDF 全文

Deep learning-assisted quadratic metalens enables high-quality imaging within a 170° field of view

Liu Bo[1], Zhang Yunqiang[2], Xie Xin[1,2*], Gan Xuetao[1], Zhao Jianlin[1]



Deep learning-assisted imaging model

Overview: Metalenses, as typical metasurfaces, show enormous potential in revolutionizing compact optical systems, especially in imaging and augmented reality/virtual reality (AR/VR) applications. However, their single-layer structure inherently causes significant off-axis aberrations, which severely restrict the achievable field of view (FOV). Although quadratic metalenses provide a theoretical approach to achieving a 180° FOV by converting the rotational symmetry of incident light into the translational symmetry at the focal plane, their inherent severe aberrations greatly impair their practical imaging performance. To overcome these fundamental limitations, we constructed an image restoration model based on the U-Net neural network, aiming to enhance the imaging capability of quadratic metalenses through a synergistic back-end image processing method. First, a quadratic metalens was designed and fabricated based on the principle of propagation phase modulation. This device uses calcium fluoride as the substrate and high-aspect-ratio silicon nanopillars as the resonant structures. This metalens can achieve continuous and efficient phase modulation from 0 to 2π at λ=11 μm, with an average optical transmittance of over 96%. Meanwhile, we developed a deep learning-based image restoration model with a U-Net architecture. This network has been specially trained to learn the complex aberration degradation process: it accurately simulates optical aberrations by convolving aberration-free real images with spatially variant point spread functions (PSF) that characterize the full-FOV performance of the metalens; subsequently, it uses the mean squared error (MSE) loss function to learn a robust mapping from these aberrated images to high-fidelity reconstructed images. The results show that within the half-FOV range of 0° to 85°, the average structural similarity index measure (SSIM) of the restored images significantly increases from 0.74 to over 0.78, and the peak signal-to-noise ratio (PSNR) also drastically rises from 16.0 dB to more than 21.5 dB. Notably, even at the extreme off-axis angle of 85°, the restored images can still maintain high quality, with an SSIM of 0.7455 and a PSNR of 20.669 dB. This method successfully achieves high-contrast imaging with a 170° full FOV using a single-layer metalens, and the PSNR of the extreme edge FOV is relatively improved by more than 31.5%. Additionally, it effectively suppresses the stray-light aberrations inherent in the translational symmetry conversion mechanism. Compared with traditional correction schemes that rely on complex double-layer metalens designs or lossy aperture stops, our method significantly reduces system complexity, weight, and manufacturing constraints. This provides an attractive path for developing ultra-compact, high-performance imaging systems suitable for next-generation AR/VR headsets, minimally invasive biomedical endoscopes, wide-area surveillance, and other applications, and also promotes the integration of nanophotonics and computational imaging.

Liu B, Zhang Y Q, Xie X, et al. Deep learning-assisted quadratic metalens enables high-quality imaging within a 170° field of view[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(11): 250224; DOI: 10.12086/oee.2025.250224

Foundation item: National Key Laboratory of Air-based Information Perception and Fusion and Aeronautical Science Foundation of China (20220001053004), Youth Talent Support Program of Shaanxi Association for Science and Technology (20230521)

[1]Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Key Laboratory of Light Field Manipulation and Information Acquisition, Ministry of Industry and Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China; [2]National Key Laboratory of Air-Based Information Perception and Fusion, Luoyang, Henan 471000, China

* E-mail: xinxie@nwpu.edu.cn