

基于波前编码的紧凑型大光圈双波段系统设计

应一鸣, 杨波*, 王前进

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年7月7日; 录用日期: 2025年7月31日; 发布日期: 2025年8月12日

摘要

为满足在低照度环境下系统对高光通量和多光谱感知能力的需求, 针对传统折射式多光谱大光圈系统景深浅、宽波段色差校正困难的问题, 本文提出了一种基于波前编码的紧凑型大光圈双波段成像系统的设计。系统采用反射式结构作为多光谱光线的共同光路, 引入自由曲面以及非球面同时对两个波段的成像进行波前编码, 并使用分光棱镜对光谱进行分离, 对于编码图像, 使用了加入点扩散函数后的DeblurGANv2网络架构进行图像解码。结果表明, 该系统的两个波段的景深都拓展了10倍, 两个波段的调制传递函数在40 cycles/mm处都大于0.1, 图像解码能够较好地还原图像。

关键词

波前编码, 光学设计, 大光圈光学系统, 双波段成像, 图像解码

Design of a Compact Large-Aperture Dual-Band Imaging System Based on Wavefront Coding

Yiming Ying, Bo Yang*, Qianjin Wang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 7th, 2025; accepted: Jul. 31st, 2025; published: Aug. 12th, 2025

Abstract

In order to meet the demand for high luminous flux and multispectral sensing capability of the system under low illumination environment, and to address the problems of shallow depth of field and difficulty in wide-band chromatic aberration correction in traditional refractive multispectral large

*通讯作者。

文章引用: 应一鸣, 杨波, 王前进. 基于波前编码的紧凑型大光圈双波段系统设计[J]. 建模与仿真, 2025, 14(8): 22-33.
DOI: 10.12677/mos.2025.148544

aperture system, this paper proposes a compact large aperture dual-wavelength imaging system design based on wavefront coding. The system adopts a reflective structure as the common optical path for multispectral light, introduces free-form surfaces as well as aspherical surfaces for wavefront coding of the two bands simultaneously, and separates the spectra using a beam-splitting prism, and for the coded images, uses the DeblurGANv2 network architecture after adding the point diffusion function for image decoding. The results show that the depth of field of the system is expanded by a factor of 10 in both bands, the modulation transfer function of both bands is greater than 0.1 at 40 cycles/mm, and the image decoding is able to restore the image well.

Keywords

Wavefront Coding, Optical Design, Large-Aperture Optical System, Dual-Band Imaging, Image Decoding

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现有的夜视光学系统要求具备优秀的夜视性能, 大光圈透镜因其具备较高的光通量和优秀的夜视光学分辨率, 在夜间监控[1]、军事侦查[2]、生物医学检测(医用内窥镜)[3]、天文观测[4]以及高端机器视觉[5]等众多领域发挥着不可替代的作用, 多光谱的使用可以弥补了单一可见光波段的缺陷。

然而, 由于光学系统的基本定律, 光圈大小与景深(Depth of Field, DoF)之间存在固有的制约关系: 光圈越大, 景深越浅。这也影响了大光圈光学系统的广泛应用。

为克服这一难题, 现有景深拓展策略主要可分为三类: 机械扫描式聚焦堆栈[6]、计算成像算法复原(如反卷积、盲解卷积)[7]以及光学计算混合方法[8]。其中, 光学波前编码(Optical Wavefront Coding)[9]技术能够在单次曝光实现大范围景深扩展、兼容静止和动态场景、对探测器噪声相对鲁棒, 因此受到广泛关注。该技术的核心在于通过在光路中引入特定的编码相位板(如三次相位板 Cubic Phase Plate, CPP)[10], 预先对入射波前进行相位调制, 使得光学系统的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)在一定景深范围内对离焦模糊具有近似不变性(Shift-Invariance), 后续通过特定的计算解调算法即可从单幅编码图像中复原出清晰的全场景图像。

2020 年, Lei Yang 和 Meng Chen [11]将波前编码应用于内窥镜的设计, 将景深延长了十倍。2021 年, Sun Ti 和 Hu Jingpei [12]将波前编码应用于色差消除, 并设计了极化不敏感的无色超透镜。近年来, 深度学习和波前编码的结合已成为研究的重点。2023 年, Shijie W 和 Huachao C [13]将深度学习与波前编码相结合, 设计了低成本和简单的光学系统。2024 年, Xueyan Li 和 Haowen Yu [14]使用深度学习和波前编码的组合来重建超分辨率图像。2025 年, J M Reyes Alfaro 和 C Toxqui Quitl [15]设计了一个光学数字成像系统, 具有 Jacobi-傅里叶轮廓函数进行编码, 卷积神经网络用于数字解码。

现有的折射式波前编码光学系统, 受到相位板装调误差的影响, 系统相位调制难度大, 受到多光谱的影响, 可见光与近红外波段难以共用光路, 并且红外材料(如 Ge)高折射率($n \approx 4.0$)与正色散特性(Abbe 数 $VL \approx 100$) [16], 与可见光材料(如 H-K9L, $n \approx 1.5$, $VL \approx 65$)无法兼容, 色差校正困难。

针对以上问题, 本文提出了一种基于波前编码的折反式双波段共光圈景深拓展成像系统设计。通过反射式结构, 避免多光谱影响, 可见光与近红外波段共用反射光路, 减小光学系统的径向尺寸; 将自由

曲面与非球面结合,达到波前编码的效果,同时对可见光/近红外波段进行景深拓展;通过分光棱镜有效分离光谱,两个波段能够同时成像。结果表明,该光学系统能对可见光/近红外波段进行景深拓展,在可见光波段与近红外光波段,系统的 MTF 在 40 cycles/mm 处大于 0.1,使用修改的 DeblurGANv2 算法能够很好地还原编码图像。

2. 理论模型和设计方法

2.1. 波前编码理论模型

波前编码的工作原理,见图 1。该技术结合了光学和计算处理,通常直接在光学系统内的孔径光阑位置插入相位调制元件(例如,立方相位板、对数相位板或高阶多项式相位板)来改变波前光路差,从而在扩展的景深中引入了一致的失焦特性。由此产生的模糊图像保留了可解码的信息,随后可以通过计算处理进行恢复。

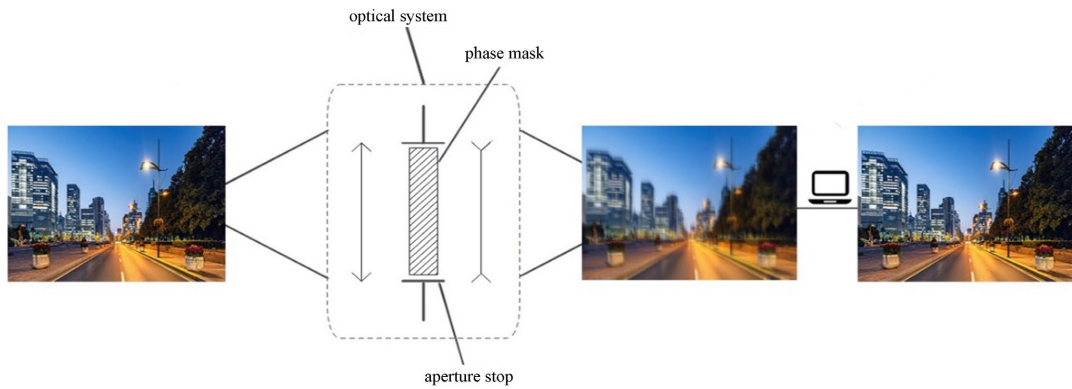


Figure 1. Diagram of wavefront coding working principle
图 1. 波前编码的工作原理图

与其他相位调制元件相比,立方相位掩码的优势主要源于其卓越的景深扩展和降低失焦的灵敏度[17]。点扩散函数被定义为光学系统对理想点源的响应,表现为无像差系统中的衍射限制点[18]。通过添加特定的相位调制函数得到离焦不敏感的 PSF 实现景深扩展,立方相位板的相位调制函数是

$$\phi(x, y) = \alpha \cdot (x^3 + y^3) \quad (1)$$

式中 α 是相位板调制参数, x, y 是在光瞳平面上归一化的坐标。

在成像光学系统中,各种类型的像差可以定性为光学瞳孔表面的相分布,假设光学系统光学瞳孔表面的广义光学瞳孔函数为 $Q(x, y)$ [19],当光学系统存在失焦并在光学瞳孔表面引入立方相板时,光学系统的光学瞳孔表面的广义光学瞳孔函数是

$$P(x, y) = Q(x, y) \cdot e^{i\psi(x, y)} \cdot e^{i\phi(x, y)}, x^2 + y^2 \leq 1 \quad (2)$$

式中 $Q(x, y)$ 是理想光学系统的广义光瞳函数, $\psi(x, y)$ 是光学系统的系统离焦参数, $\phi(x, y)$ 是立方相位板的相位调制函数, x, y 是在光瞳平面上归一化的坐标。

光学传递函数是广义光学瞳孔函数的自相关,波前编码要求广义瞳孔函数是圆对称或可变可分离的,因此近似光学传递函数可以通过稳相法和模糊函数法获得

$$H(\mu, \nu) = \sqrt{\frac{\pi}{12 \cdot |\alpha \mu|}} \cdot \exp\left(\frac{i\alpha \mu^3}{4}\right) \cdot \exp\left(\frac{-i\mu \nu^2}{3\alpha}\right) \quad (3)$$

式中 μ, ν 是空间频率坐标, α 是相位板调制参数。

点扩散函数经过二维傅里叶变换来产生光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF), 其中实部构成了调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)。因此, 这些函数完全取决于相位板参数 α 。这种立方相位调制使系统的 OTF/MTF 特性在失焦条件下保持大致不变, 从而扩展了系统的景深。

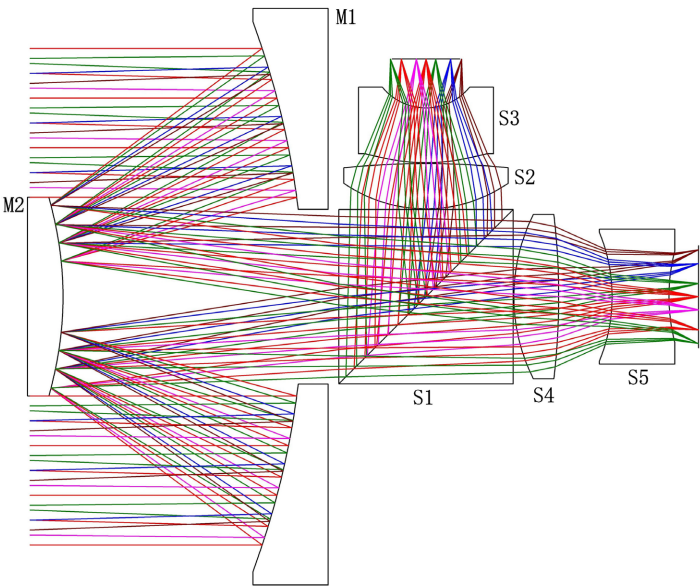
2.2. 光学系统的设计

光学系统的参数如表 1 所示。为了低光环境的成像能力, 有必要选择具有高光捕获能力的像素尺寸大传感器, 因此在本文中, 在可见光波段选用了分辨率为 640×512 、像素尺寸为 $13 \mu\text{m}$ 的传感器。在近红外波段选用了分辨率为 1280×720 、像素尺寸为 $13 \mu\text{m}$ 的传感器。

Table 1. The parameters of the optical system
表 1. 光学系统参数

Item	VIS	NIR
Focal length	130 mm	175 mm
Wavelengths	486 nm~656 nm	800 nm~1200 nm
F-Number	1.85	2.5
FOV	4.2°	4.2°
Absolute distortion	<5%	<5%
MTF	>0.1 @40cycles/mm	>0.1 @40cycles/mm
Relative Aperture	3	3

本文采用 Ritchey-Chrétien 结构作为可见光与近红外光的共同光路。反射式结构不会产生色差, 双曲面反射镜能够校正三阶球差和彗差, 但显著的像散和场曲率在大视场角度下依旧存在, 需要额外的折射元件来进行像差补偿[20]。



13.

Figure 2. Diagram of the optical system
图 2. 光学系统结构图

通过分光棱镜进行光谱分离,之后再对可见光以及近红外光分别进行像差的校正。为了解决散光和视场曲率问题,引入了半月形透镜,其弯曲表面可调整 Petzval 和,改善图像表面的平整度,优化这些像差。

近红外光相较于可见光,波长更长,受到系统衍射效应的影响,衍射极限的值越大,点扩散函数也会相应展宽,因此对于几何像差的容忍度更高。

对于大孔径光学系统,反射结构中的主镜尺寸会因孔径增大而增大,因此将非球面置于副镜中,加工孔径会变小,并节省成本,因此本文将波前编码的自由曲面以及非球面结构放于副镜中。

优化后系统的结构,见图 2。最终的光学系统由二曲面反射镜 M1、非球面反射镜 M2、分光棱镜 S1、正透镜 S2、负透镜 S3、正透镜 S4 和负透镜 S5 组成。最终的光学系统结构紧凑,光阑位于 M2 非球面反射镜,系统尺寸为 $95\text{ mm} \times 85\text{ mm} \times 85\text{ mm}$,径向尺寸小于系统焦距,反射镜 M1 的口径为 39.7 mm ,反射镜 M2 的口径为 12.92 mm ,因此根据相对孔径的计算公式[21],反射系统的相对孔径为 3.07,符合设计要求。

系统中非球面的面型参数如表 2 所示。

Table 2. The parameters of the aspherical surfaces
表 2. 非球面面型参数

Item	M1	M2	S3
curvature radius	-105.101 mm	-46.964 mm	-24.16 mm
conic (k)	-1.13	-0.67	0
4th order aspherical coefficients	0	2.7250e-06	4.0098e-05
6th order aspherical coefficients	0	-1.1241e-09	1.4604e-07
8th order aspherical coefficients	0	5.2195e-13	4.5788e-10

未波前编码,系统的成像质量,见图 3。

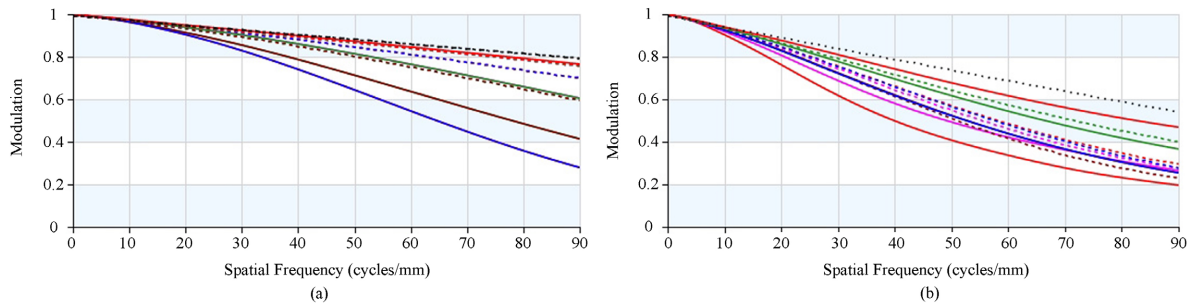


Figure 3. Diagram of the MTF of the optical system. (a) VIS; (b) NIR
图 3. 光学系统 MTF 图。(a) 可见光; (b) 近红外光

波前编码可以有效地扩展景深,从而提高整个光学系统视场(从中心到边缘)的成像一致性。本文将 XY 多项式自由曲面应用于 M2 反射副镜,公式(1)表明通过修改自由曲面的三次项系数,可以达到拓展景深的效果,随着 XY 多项式自由曲面系数的增加,光学系统的景深得到扩展,成像一致性得到改善,但成像质量会下降,因此有必要选择合适的 XY 多项式自由曲面。

本文以两个波段的调制传递函数的成像一致性、MTF 在 40 cycles/mm 处大于 0.1 为标准进行 XY 多项式自由曲面参数的优化,需要同时保证两个波段的调制传递函数满足要求。见图 2 中的副反射镜 M2

是非球面表面和 XY 多项式自由曲面组合而成的。

通过景深计算公式[22], 在 100 m 的情况下可以计算出可见光波段的景深为 13.89 m, 近红外波段的景深为 13.05 m。优化后的 XY 多项式自由曲面参数的情况下, 可见光波段在 5 倍景深、10 倍景深的调制传递函数的变化情况见图 4。

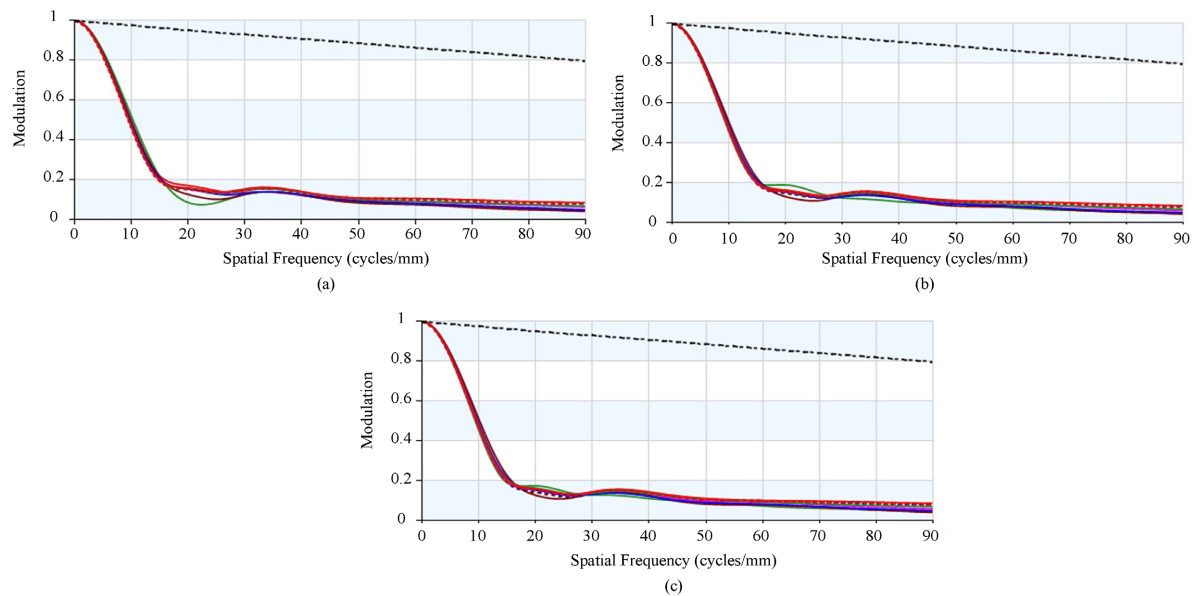


Figure 4. Diagram of the MTF plots for different depths of field in the VIS band. (a) 0; (b) 5; (c) 10
图 4. 可见光波段不同景深 MTF 变化图。(a) 0; (b) 5 倍; (c) 10 倍

优化后的 XY 多项式自由曲面参数的情况下, 近红外光波段在 5 倍景深、10 倍景深的调制传递函数的变化情况见图 5。

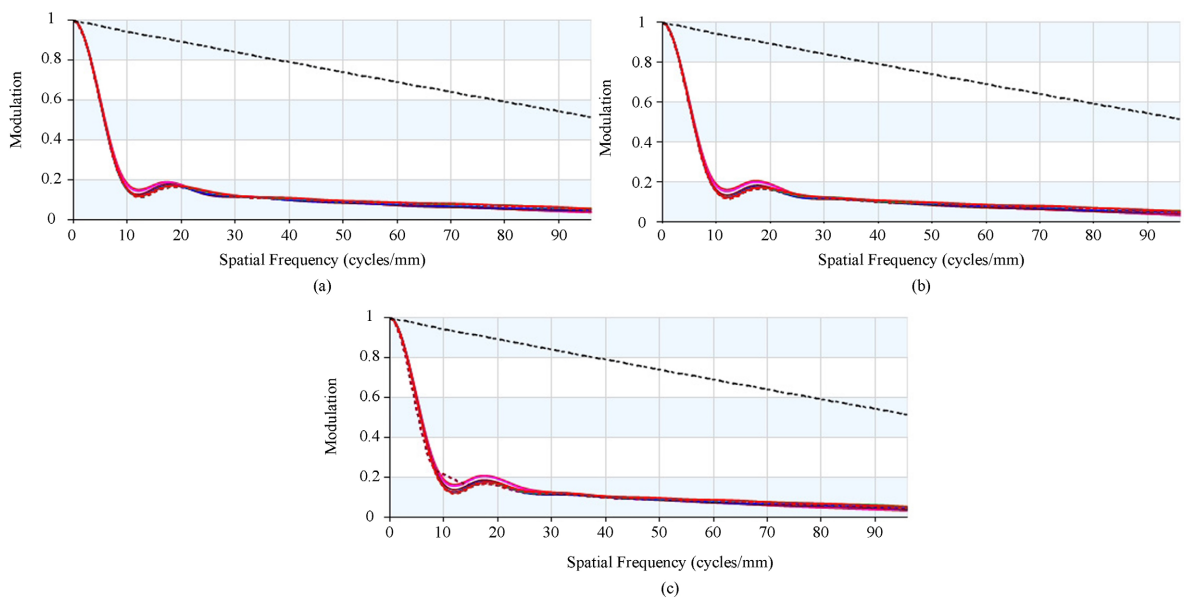


Figure 5. Diagram of the MTF plots for different depths of field in the NIR band. (a) 0; (b) 5; (c) 10
图 5. 近红外光波段不同景深 MTF 变化图。(a) 0; (b) 5 倍; (c) 10 倍

经过优化,以两个波段同时拥有良好的成像一致性以及具备一定的成像质量为标准,XY 多项式自由曲面的三次项系数为 3.3×10^{-6} ,能够将可见光与近红外光的景深拓展 10 倍,且两个波段的调制传递函数并没有产生零点从而导致信息的丢失,成像质量均满足标准要求。

系统两个波段的畸变图见图 6。

从图中可以看出可见光的畸变小于 5%,近红外光的畸变小于 1%,符合设计要求。

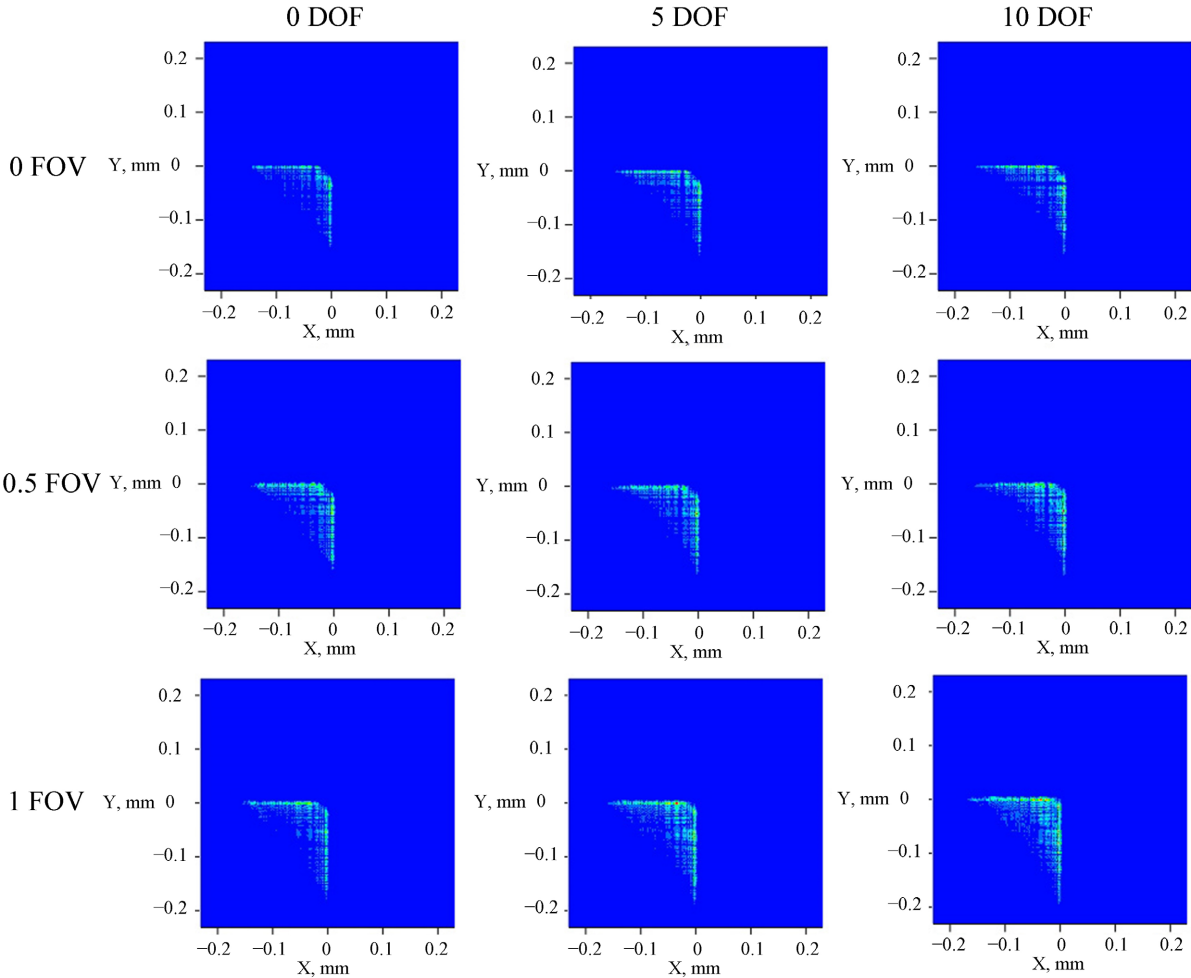
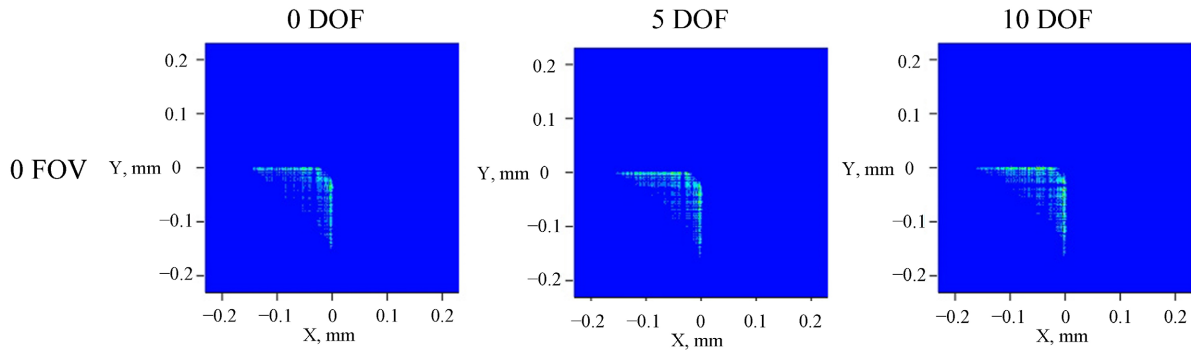


Figure 6. Diagram of the distortion of the optical system. (a) VIS; (b) NIR
图 6. 两可见光与近红外光波段畸变图。(a) 可见光; (b) 近红外光



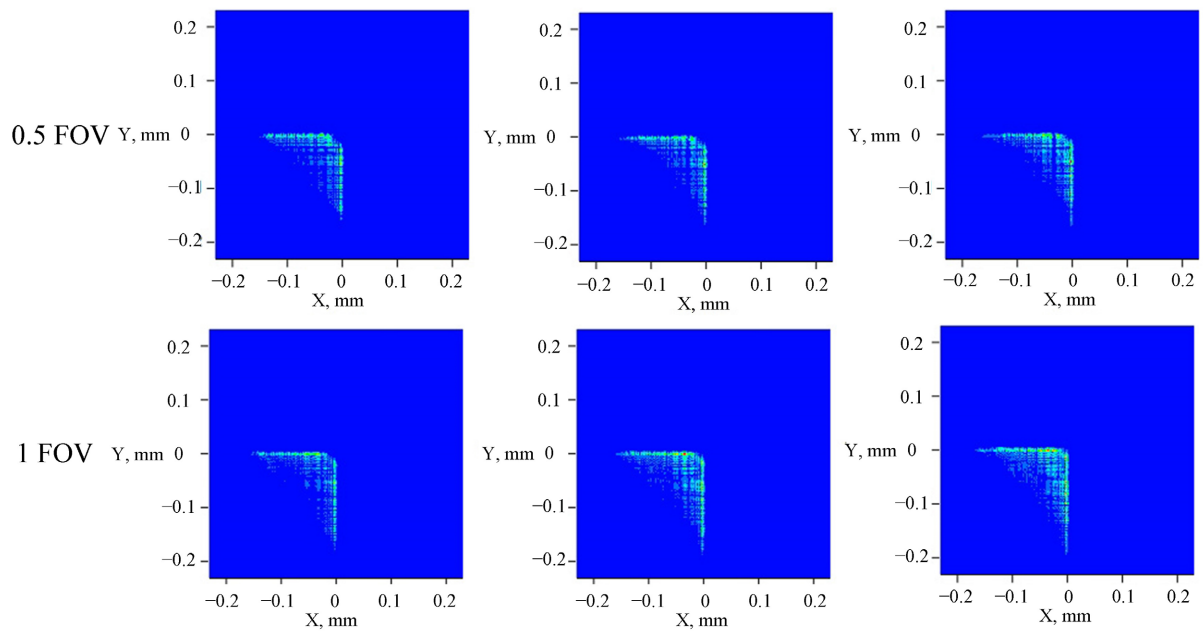


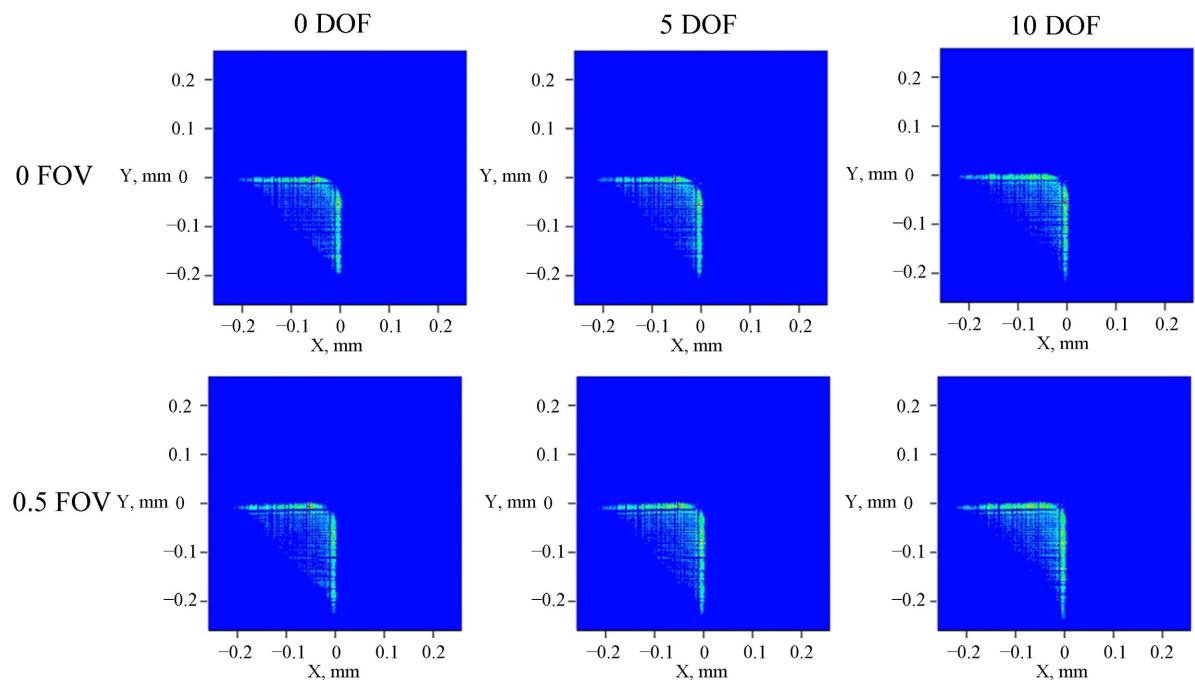
Figure 7. Diagram of the PSF of the optical system in the VIS band

图 7. 可见光波段不同景深的 PSF

系统可见光波段不同景深的 PSF 见图 7。

系统近红外光波段不同景深的 PSF 见图 8。

见图 7, 图 8, 可以看出对于相同景深的 PSF, 随着景深的扩大, 边缘视场的 PSF 与中心视场的 PSF 的一致性降低, 对于编码图像, 传统恢复算法的恢复效果会降低, 因此针对这种模糊本文使用了 AI 算法。



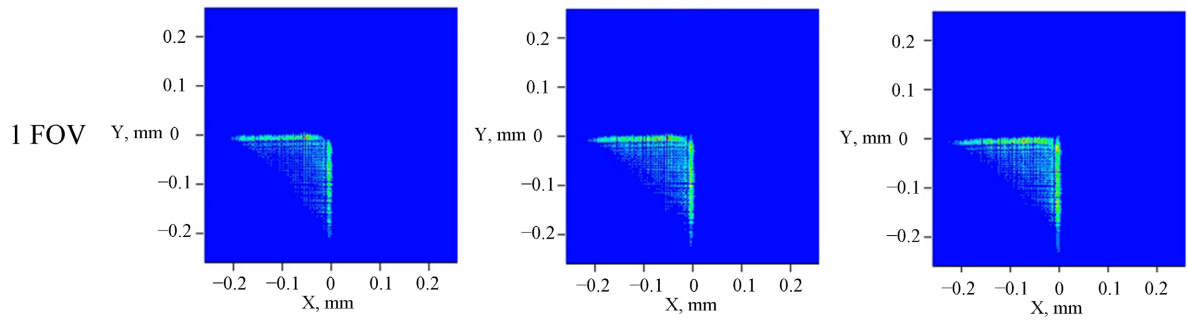


Figure 8. Diagram of the PSF of the optical system in the NIR band.

图 8. 近红外光波段不同景深的 PSF

3. 仿真图像解码算法

传统的解码算法(例如, Wiener filtering、Lucy-Richardson 算法)可以有效地恢复模糊的图像,但受到不同视场的 PSF 一致性降低的影响,解码图像会产生铃声效应,影响图像恢复的效果。

由于光学系统存在中心遮拦,系统的点扩散函数中心能量衰减,随着景深的扩展,MTF 的一致性降低,传统解码算法所产生的效果受到影响,因此本文在 DeblurGANv2 [23]的网络架构基础上结合波前编码的特征,提出了加入了 PSF 图像的 DeblurGANv2 [23]架构,网络架构见图 9。

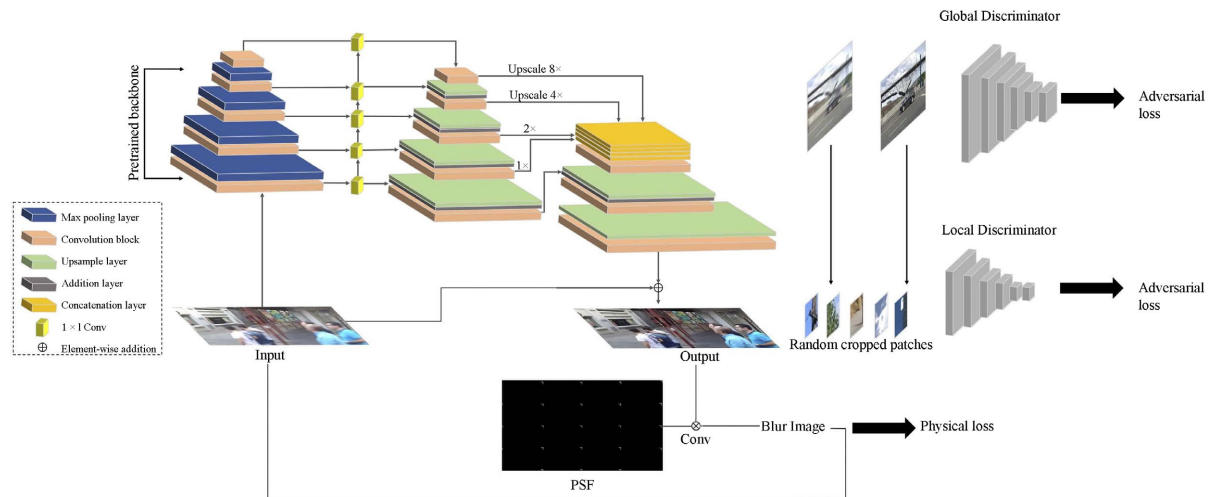


Figure 9. Diagram of the network

图 9. 网络模型图

在 DeblurGANv2 [23]基础上引入双路径处理机制,增加了点扩散函数图的输入,对于不同视场角的区域使用不同区域的 PSF,并基于光学成像模型,将原有网络结构生成器生成的恢复图像与点扩散函数图进行卷积,并与原始输入的模糊图像计算物理损失。

对于损失函数,在原有的损失函数基础上添加了物理损失,物理损失为

$$L_{phi} = MSE(INPUT, OUTPUT \otimes PSF) \quad (4)$$

式中 $INPUT$ 是 FPN 生成器输入的模糊图像, $OUTPUT$ 是 FPN 生成器输出的清晰图像, PSF 是模糊图像的点扩散函数。

与原有损失函数进行加权融合，损失函数公式为

$$L_G = 0.5 \cdot L_P + 0.006 \cdot L_X + 0.01 \cdot L_{ADV} + 0.01 \cdot L_{phi} \quad (5)$$

式中 L_P 是 MSE 损失， L_X 是感知损失， L_{ADV} 是全局和局部的损失， L_{phi} 是物理损失。

通过仿真软件进行图像的仿真模拟，仿真大量的可见光、近红外光模拟清晰 - 模糊图像对，完成数据集的建立，将该数据集放入模型中训练，并得到效果最好的模型。

在可见光波段与近红外光波段不同景深的模型解码效果分别见图 10，见图 11。

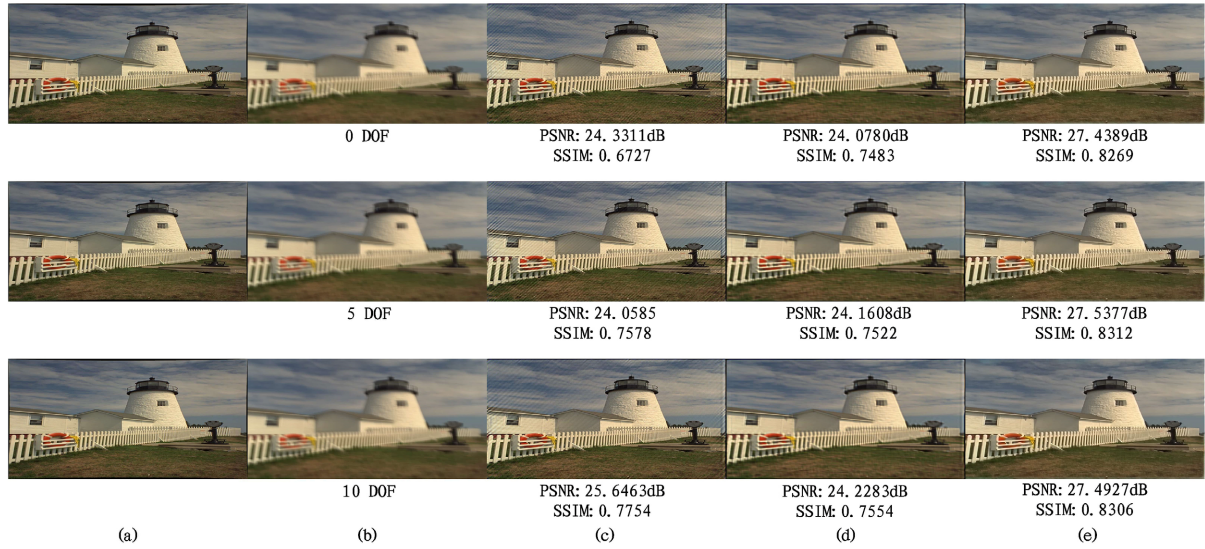


Figure 10. Diagram of the decoding effect in VIS. (a) Original; (b) Blur; (c) Wiener; (d) L-R; (e) Improved DeblurGANv2
图 10. 可见光波段解码效果图。(a) 原图；(b) 模糊图像；(c) 维纳滤波；(d) L-R 解码；(e) 改进的 DeblurGANv2

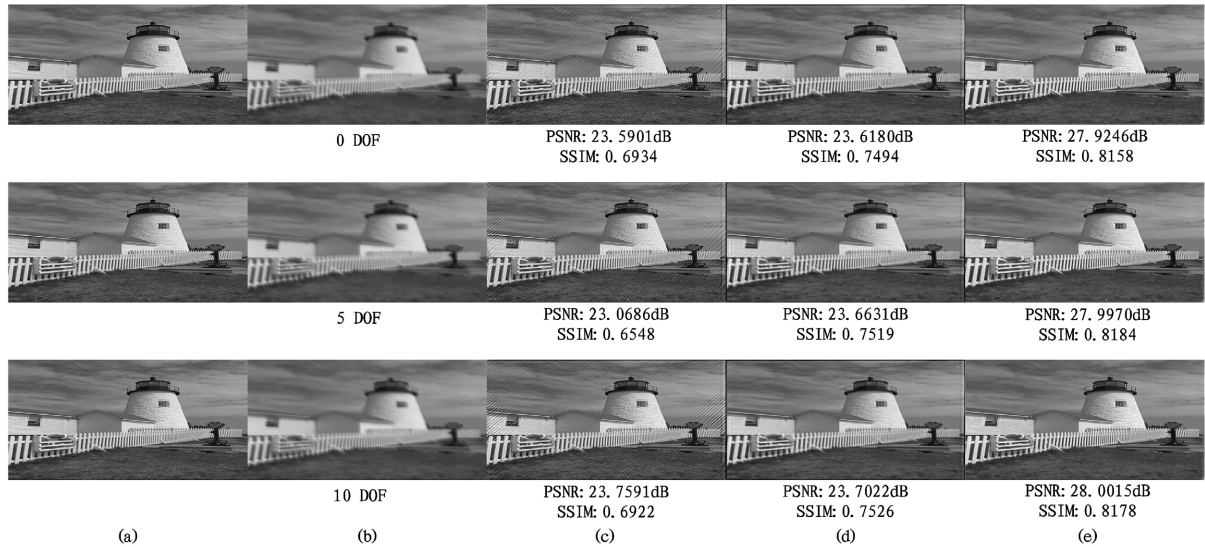


Figure 11. Diagram of the decoding effect in NIR. (a) Original; (b) Blur; (c) Wiener; (d) L-R; (e) Improved DeblurGANv2
图 11. 近红外光波段解码效果图。(a) 原图；(b) 模糊图像；(c) 维纳滤波；(d) L-R 解码；(e) 改进的 DeblurGANv2

见图 10，图 11，可以看出使用传统算法对编码图像进行解码的效果并不好，维纳滤波算法的解码图像产生了严重的振铃效应，L-R 算法的解码图像产生的振铃效应轻微，但是去模糊的效果不如维纳滤波

算法,因此这两个的算法的解码效果不好,而改进的 DeblurGANv2 算法具备比传统算法更好的去模糊效果,并且不会产生振铃效应,还原图像的 PSNR 达到 27 dB, SSIM 达到 0.8。

模拟图像是通过点扩散函数形成,其反映了光学系统像差和衍射效应的影响。通过 GAN 网络对模拟仿真的编码图像进行解码,验证了仿真图像解码的可行性,针对实拍的编码图像,可以通过实拍大量图像建立数据集,再通过 GAN 网络进行训练,获得新的模型,完成实拍编码图像的解码。

4. 总结

本文完成了基于波前编码的紧凑型大光圈双波段系统设计,(1)为了解决大孔径光学系统中的浅景深,我们通过集成的非球面/自由曲面引入了波前编码,并应用于反射式系统中,这种方法扩展 10 倍景深并减小了光学系统的径向尺寸,设计出了紧凑型的大孔径双波段景深拓展光学系统。(2)同时对两个波段的成像进行景深拓展,通过优化立方相位调制参数提高了成像一致性,拓展景深的同时满足系统参数。(3)光学软件的图像模拟生成了成对的模糊-清晰数据集,并通过在 DeblurGANv2 的结构中加入点扩散函数的卷积实现了有效的图像恢复。综上,本文使大孔径双波段光学系统的景深得到拓展,并且对于模拟图像得到了很好的解码效果,未来可以在此基础上使用实拍照片进行编码解码效果的可行性验证。

致 谢

诚挚感谢杨波导师在课题设计、实验开展及论文撰写过程中给予的悉心指导与宝贵建议。

参考文献

- [1] 江绮鸿. 黑烟车夜间智能监控系统研究[J]. 资源节约与环保, 2023(8): 30-33.
- [2] 邵晓鹏, 李轩. 光学遥感三维成像在军事应用中的机遇与挑战[J]. 国防科技, 2023, 44(6): 32-43.
- [3] 李宁. 医用内窥镜照明镜体光效测量中光源亮度的关键影响分析[J]. 医疗装备, 2024, 37(23): 42-45.
- [4] 高启, 陈天禄, 刘茂元, 等. 甚高能 γ 射线天文观测的利器——成像大气切伦科夫望远镜[J]. 天文学进展, 2021, 39(3): 350-376.
- [5] 侯远韶. 基于机器视觉和光谱成像技术的钢球表面质量分拣系统[J]. 信息记录材料, 2025, 26(2): 141-143, 152.
- [6] 罗天琦, 邓小娟, 刘畅, 等. 聚焦堆栈中空间几何结构的深度估计[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 111-122.
- [7] 贺天悦, 寇廷栋, 张启灿, 等. 计算成像技术在信息复原及增强中的研究进展(特邀) [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(2): 486-499. <https://www.opticsjournal.net/Articles/OJ5d6d1b5cea32d95c/Abstract>
- [8] 高金铭, 郭劲英, 孙越, 等. 星载反射式成像系统计算光学设计方法综述[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(6): 1-11.
- [9] 王馨竹, 杨磊, 段文浩, 等. 基于波前编码的制冷型红外光学系统焦深拓展研究[J]. 光子学报, 2025, 54(1): 131-142.
- [10] 李鹏举, 潘登, 刘顺利. 长焦深连续立方相位板的飞秒激光加工与性能测试[J]. 光学精密工程, 2022, 30(17): 2088-2093.
- [11] Yang, L., Chen, M., Wang, J., Zhu, M., Yang, T., Zhu, S., *et al.* (2020) Extended Depth-Of-Field of a Miniature Optical Endoscope Using Wavefront Coding. *Applied Sciences*, **10**, Article 3838. <https://doi.org/10.3390/app10113838>
- [12] Sun, T., Hu, J., Ma, S., Xu, F. and Wang, C. (2021) Polarization-Insensitive Achromatic Metalens Based on Computational Wavefront Coding. *Optics Express*, **29**, 31902-31914. <https://doi.org/10.1364/oe.433017>
- [13] Wei, S., Cheng, H., Xue, B., Shao, X. and Xi, T. (2023) Low-Cost and Simple Optical System Based on Wavefront Coding and Deep Learning. *Applied Optics*, **62**, 6171-6179. <https://doi.org/10.1364/ao.494397>
- [14] Li, X., Yu, H., Wu, Y., Zhang, L., Chang, D., Chu, X., *et al.* (2024) Super-Resolution Image Reconstruction of Wavefront Coding Imaging System Based on Deep Learning Network. *Electronics*, **13**, Article 2781. <https://doi.org/10.3390/electronics13142781>
- [15] Reyes-Alfaro, J.M., Toxqui-Quitl, C., Padilla-Vivanco, A., González-Amador, E. and Espejel-Rivera, M.A. (2025) Blind Deconvolution Network of Encoded Images in Wavefront Coding Systems. *Optics Express*, **33**, 15207-15221. <https://doi.org/10.1364/oe.555474>

-
- [16] 锺在红外光学行业的应用[J]. 世界有色金属, 2010(8): 66-68.
- [17] Zhu, L., Li, F., Huang, Z. and Zhao, T. (2022) An Apodized Cubic Phase Mask Used in a Wavefront Coding System to Extend the Depth of Field. *Chinese Physics B*, **31**, Article ID: 054217. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac5979>
- [18] Xu, N., Qi, D., Cheng, L., Pan, Z., Zhou, C., Lin, W., *et al.* (2025) Sparse Point Spread Function-Based Multi-Image Optical Encryption. *Communications Physics*, **8**, Article No. 184. <https://doi.org/10.1038/s42005-025-02105-1>
- [19] Zhou, D., Cheng, H., Tam, H., Wen, Y. and Ye, X. (2013) Extending the Depth of Field of Integral Imaging System by Employing Cubic Phase Plate. *Optik*, **124**, 7065-7069. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.05.145>
- [20] Zhao, N., Papa, J.C., Fuerschbach, K., Qiao, Y., Thompson, K.P. and Rolland, J.P. (2018) Experimental Investigation in Nodal Aberration Theory (NAT) with a Customized Ritchey-Chrétien System: Third-Order Coma. *Optics Express*, **26**, 8729-8743. <https://doi.org/10.1364/oe.26.008729>
- [21] 胡明勇, 刘文清, 张权, 等. 超大相对孔径抛物面反射镜的补偿检验[J]. 量子电子学报, 2006(2): 155-158.
- [22] 雷登峰, 郑群辉. 一种精确的相机景深计算方法[J]. 信息技术, 2013, 37(8): 133-135.
- [23] Kupyn, O., Martyniuk, T., Wu, J. and Wang, Z. (2019) DeblurGAN-v2: Deblurring (Orders-of-Magnitude) Faster and Better. 2019 *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, 27 October-2 November 2019, 8877-8886. <https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00897>