

文章编号 1004-924X(2026)16-2439-13

Golay-6 孔径阵列的非相干全息部分孔径成像

赵 微¹, 于雪莲^{1*}, 潘立辉¹, 王政贤¹, 牛 佳^{2,4}, 贺 磊⁵, 孙彦乾^{3,4}, 李秀芳^{3,4}

(1. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院 黑龙江省量子调控重点实验室,

黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 西安交通大学 陕西省量子信息与光电量子器件重点实验室, 陕西 西安 710049;

3. 北京交通大学 发光与光学信息教育部重点实验室, 北京 100044;

4. 大恒新纪元科技股份有限公司北京光电技术研究所, 北京 100085;

5. 哈尔滨新光光电科技股份有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:针对无干涉编码孔径相关全息(Interferenceless Coded Aperture Correlation Holography, I-COACH)部分孔径成像系统(Partial Aperture Imaging System, PAIS)中,传统环形孔径阵列调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)分布不均、中频信息丢失、成像质量受限等工程问题,构建 Golay-6 孔径阵列与无干涉编码孔径相关全息融合的部分孔径成像系统。采用理论分析、数值仿真与实验验证相结合的方法,对比八子孔径环形阵列、六子孔径环形阵列与 Golay-6 孔径阵列的频率响应特性,选取编码相位掩模(Coded Phase Mask, CPM)生成条件与非线性重建(Nonlinear Reconstruction, NLR)参数。实验结果表明:Golay-6 孔径阵列可将系统孔径面积缩减 25%,调制传递函数波动系数降至 0.137、中频最大波动幅度降至 0.024,系统信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)达 14.82 dB;对蜻蜓翅膀复杂样品成像时,结构相似性(Structural Similarity, SSIM)为 0.975, SNR 为 13.5 dB,可清晰再现细微结构。该系统在保持较高分辨率的同时提升了中频调制能力与图像均匀性,可为天文部分孔径成像和高性能计算光学成像提供实验参考和方法支撑。

关键词:无干涉编码孔径相关全息术;部分孔径成像;Golay-6 孔径;调制传递函数;非线性重建

中图分类号:O438.1 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263416.2439

CSTR:32169.14.OPE.20263416.2439

Incoherent holographic partial aperture imaging of Golay-6 aperture array

ZHAO Wei¹, YU Xuelian^{1*}, PAN Lihui¹, WANG Zhengxian¹, NIU Jia^{2,4},

HE Lei⁵, SUN Yanqian^{3,4}, LI Xiufang^{3,4}

(1. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Quantum Control, School of Measurement and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Quantum Information and Quantum Optoelectronic Devices, School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Key Laboratory of Luminescence and Optical Information of Ministry of Education,

收稿日期:2026-05-21; **修订日期:**2026-06-16.

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(No. PL2024F020);黑龙江省博士后出站科研启动金;教育部产学研合作协同育人项目(No. 231104090250214)

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

4. Daheng New Epoch Technology, Inc., Beijing 100085, China;

5. Harbin Xinguang Optic-electronics Technology Co., Ltd., Harbin 150078, China)

** Corresponding author, E-mail: yuxuelian@hrbust.edu.cn*

Abstract: In response to the engineering challenges in the interferenceless coded aperture correlation holography (I-COACH) partial aperture imaging system (PAIS), including uneven modulation transfer function (MTF) distribution of the conventional annular aperture array, mid-frequency information loss, and constrained imaging quality, a partial aperture imaging system integrating the Golay-6 aperture array with I-COACH was proposed. Employing a combined approach of theoretical analysis, numerical simulation, and experimental validation, we compared the frequency response characteristics of the 8-element annular aperture array, 6-element annular aperture array, and Golay-6 aperture array, and optimized the generation conditions of the coded phase mask (CPM) and parameters of nonlinear reconstruction (NLR). Experimental results demonstrate that the Golay-6 aperture array reduces the system aperture area by 25%, lowers the MTF fluctuation coefficient to 0.137, and minimizes the maximum mid-frequency fluctuation amplitude to 0.024, achieving a system signal-to-noise ratio (SNR) of 14.82 dB. For the complex sample of a dragonfly wing, the structural similarity (SSIM) reaches 0.975 with an SNR of 13.5 dB, enabling clear reconstruction of fine structures. This system enhances mid-frequency modulation capability and image uniformity while preserving high resolution, thereby providing experimental references and methodological support for astronomical partial aperture imaging and high-performance computational optical imaging.

Key words: Interferenceless Coded Aperture Correlation Holography (I-COACH); Partial Aperture Imaging System (PAIS); Golay-6 aperture; Modulation Transfer Function (MTF); Nonlinear Reconstruction (NLR)

1 引言

随着天文望远镜分辨能力接近衍射极限,单纯增大连续口径面临加工、装调和成本瓶颈^[1-4]。部分孔径成像系统(Partial Aperture Imaging System, PAIS)以分布式子孔径阵列替代连续大孔径,可在降低工程实现难度的同时获得较高等效分辨率,是稀疏孔径成像的重要技术路线。然而,传统的PAIS系统存在孔径冗余度高、调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)不均匀和中频信息缺失等问题^[5-7]。无干涉编码孔径相关全息技术(Interferenceless Coded Aperture Correlation Holography, I-COACH)无需双光束干涉,可通过编码相位掩膜(Coded Phase Mask, CPM)调制和非线性重建(Nonlinear Reconstruction, NLR)记录非相干目标信息,具有

结构紧凑、抗干扰能力强等特点。将I-COACH与PAIS结合,有望在减小有效孔径面积的同时提高计算成像系统的分辨能力和鲁棒性。Bulbul等^[8]于2017年首次实现了基于无干涉编码孔径相关全息的PAIS,采用了一种环形编码相位掩膜,从而实现了远小于主孔径面积的成像。I-COACH系统是无两波干扰的编码孔径全息术,I-COACH系统记录的强度模式一方面可以被认为是没有干扰的情况下产生的数字全息图,另一方面,可以被视为包含所观察场景的3D信息的强度模式^[9-11]。在传统PAIS中,传播光通过子孔径为“1”的开放区域进行成像。虽然通过部分孔径成像有效地减少了孔径面积,但传统PAIS的冗余度较高,且对不同频率的响应并不均匀,从而导致成像分辨率降低^[12-15]。因此,将I-COACH与PAIS系统结合,这样在减少成本的

同时也提高了分辨率^[16-17]。随后,Bulbul等^[18]于2020年进一步改进了PAIS系统,采用由多个环形子孔径组成的环形孔径阵列,通过组合多个子孔径实现了更大孔径的成像效果,进一步提高了成像分辨率。但环形阵列在中频段仍存在响应不均和零值区域,导致频谱信息不可逆损失,限制了重建图像质量。

近年来,围绕非相干全息和编码孔径成像系统的分辨率提升与重建质量改善,已有研究从编码调制、点扩散函数(Point Spread Function, PSF)设计和重建算法优化等方面开展了大量工作。Rai等提出非线性自适应重建方法,通过调节物体全息图和点扩散全息图的频谱幅值权重,提高相关峰锐度并抑制背景噪声^[15]。Liu等采用PSF工程方法优化点扩散函数结构,从而改善I-COACH系统的重建分辨率^[14]。王海倫和王跃科将卷积注意力机制与对抗编码方法引入无透镜编码成像,提高了编码成像系统的重建质量^[19]。上述研究为非相干编码成像性能提升提供了重要基础,但其改进重点主要集中在编码函数、PSF结构和重建算法层面。对于I-COACH部分孔径成像系统而言,孔径阵列本身的空间基线分布同样直接决定MTF覆盖特性和中频信息传递能力。因此,通过孔径阵列结构优化改善传统环形阵列中频响应不均和零值区域造成的信息损失,仍有进一步研究空间。

针对传统环形孔径阵列在I-COACH部分孔径成像系统中存在的MTF分布不均、中频响应弱和孔径冗余度较高等问题,本文将Golay-6孔径阵列引入I-COACH部分孔径成像系统,利用其紧凑、非冗余的空间基线分布改善系统频率覆盖均匀性,从而提升重建图像质量。本文首先建立Golay-6孔径阵列与基于I-COACH的PAIS融合成像理论模型,分析不同孔径阵列的MTF特性及其对系统频率传递能力的影响;随后通过数值仿真比较Golay-6阵列、八子孔径环形阵列和六子孔径环形阵列的重建性能,验证Golay-6阵列在中频信息传递和图像质量改善方面的优势;进一步搭建实验系统,对Golay-6孔径阵列的实际成像效果进行验证,并结合信噪比(Signal-To-

Noise Ratio, SNR)、结构相似性(Structural Similarity, SSIM)和MTF均匀性指标进行定量评价;最后总结该方法在降低孔径冗余、改善频率响应均匀性和提升非相干全息部分孔径成像质量方面的作用,并讨论其在稀疏孔径计算成像中的应用潜力。

2 基本原理

2.1 孔径阵列分析

在PAIS中,孔径阵列结构决定系统的空间频率覆盖能力^[20-22]。本文比较环形阵列和Golay-6阵列两类结构,二者均采用环面子孔径。环形阵列又称Cornwell结构,可通过模拟退火等方法获得,子孔径数量和位置设计较灵活。Golay-6阵列由Golay于1971年提出^[23],具有紧凑、非冗余的自相关分布,有利于在有限孔径面积内获得较均匀的MTF。图1给出了三种孔径阵列及其归一化MTF。所有阵列均以直径4.536 mm的外切圆为设计边界,环面子孔径外径和内径分别为0.630 mm和0.504 mm,像方焦距为200 mm,波长为532 nm。图1(a)~1(c)分别为八子孔径环形阵列、六子孔径环形阵列和Golay-6孔径阵列,图1(d)~1(f)为对应的归一化MTF俯视图。

传统PAIS通常采用图1(a)所示的八子孔径环形阵列。该阵列具有较大的截止频率,理论上可传递较高空间频率;但如图1(d)所示,其MTF空间分布不均,中频段存在零值区域。落入零值区域的目标频谱无法有效传递,相关信息在成像过程中不可逆丢失。若在保持环面子孔径尺寸不变的情况下将子孔径数减少至六个,如图1(b)所示,MTF零值区域进一步扩大,如图1(e)所示,系统频率传递性能下降。增大子孔径尺寸可改善频率覆盖,但会降低系统稀疏性。相比之下,Golay-6孔径阵列虽然最大截止频率约为八子孔径环形阵列的89%,但其MTF分布更均匀,中频零值区域明显减少,如图1(f)。同时,Golay-6阵列的总孔径面积仅为八子孔径环形阵列的75%,可在减少孔径面积的同时保持较好的频率传递能力。

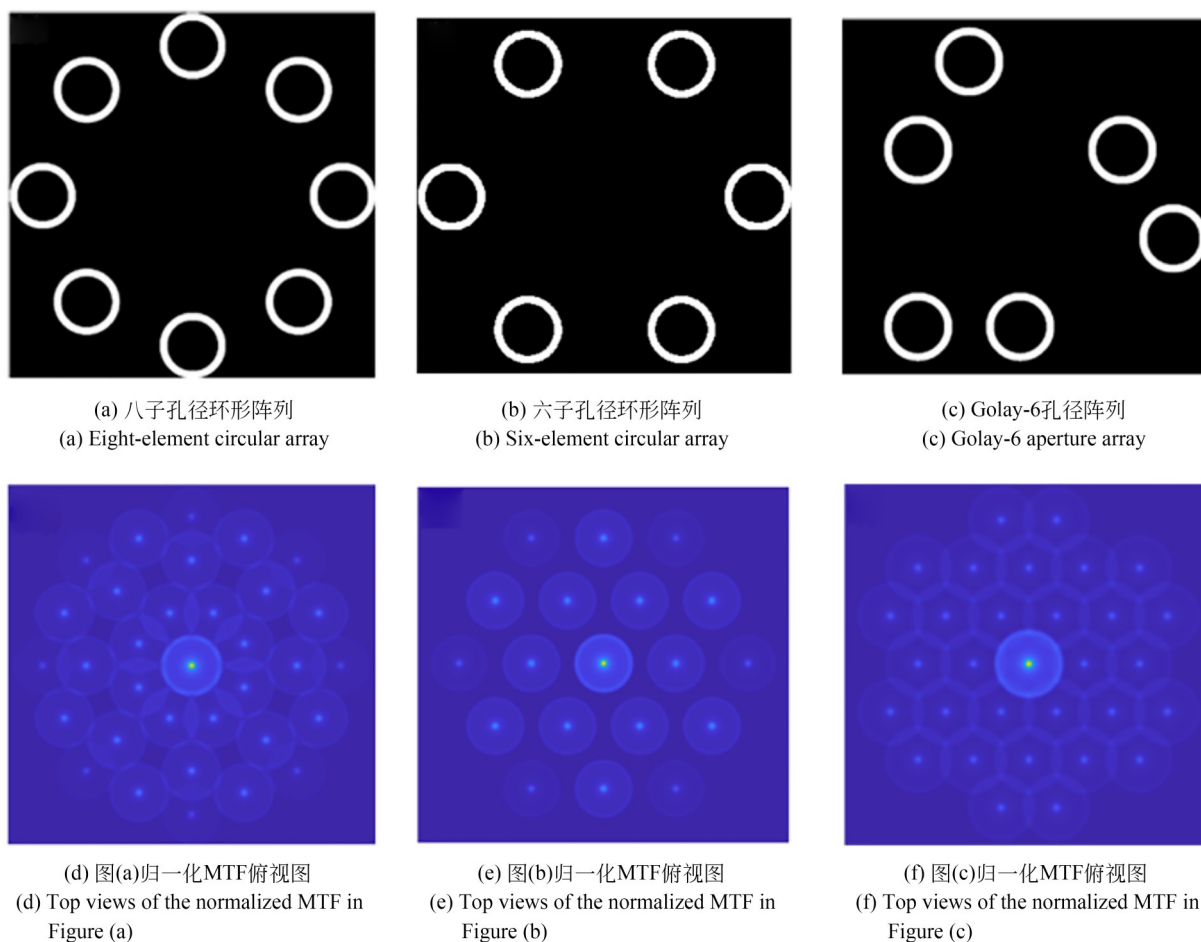


图 1 不同孔径阵列及其归一化 MTF

Fig. 1 Different aperture arrays and their normalized MTF

2.2 I-COACH 部分孔径成像分析

I-COACH 是一种编码孔径成像方法, 可利用 CPM 对入射光波进行调制, 并通过 NLR 提高重建图像质量。图 2 为基于 I-COACH 的 PAIS 系统。准单色 LED 在临界照明条件下作为非相干光源, 经透镜 L1 汇聚到针孔或二维物体上; 物体位于透镜 L2 前焦平面时, 其出射波在远场可近似为平面波。随后, 光束经衍射光学元件 (Diffractive Optical Element, DOE) 调制。DOE 上加装的工程孔径函数由三部分组成: 由子孔径 CPM 构成的孔径阵列、焦距等于 CPM 至传感器距离的二次相位掩膜 (Quadratic Phase Mask, QPM) 以及线性相位函数。CPM 用于产生随机编码点扩散函数 (Point Spread Function, PSF), QPM 用于满足 CPM 平面与传感器平面之间的傅里叶变换关系, 线性相位函数用于将未编码光束偏转至传感器有效成像区域之外。

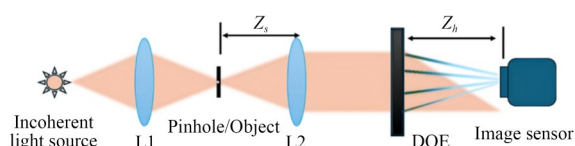


图 2 基于 I-COACH 部分孔径成像系统

Fig. 2 Partial aperture imaging system based on I-COACH

加载的 CPM 需要通过基于菲涅耳衍射的 Gerchberg-Saxton (G-S) 算法生成。为降低背景噪声并提高 PSF 的质量, G-S 算法采用稀疏点形式的频谱约束。第 k 个 CPM 的复振幅为:

$$CPM_k(\vec{r}) = \sum_{t=1}^T (\exp[i\theta_{k,t}(\vec{r})] \left(\text{Circ}\left(\frac{|\vec{r}|}{r_1}\right) - \text{Circ}\left(\frac{|\vec{r}|}{r_2}\right) \right) * \delta(\vec{r} - \vec{r}_t) \}, \quad (1)$$

其中: $\theta_{k,t}(\vec{r})$ 为第 t 个子孔径的随机相位; “*” 为

卷积符号; T 为 CPM 的总数; $Circ(\bar{r}/r_{1,2})$ 在 $|\bar{r}| \leq r_{1,2}$ 时为 1, 其他区域为 0; r_1 和 r_2 分别为第 m 个子孔径的外径和内径, 为了满足图中 CPM 和相机平面之间的傅里叶关系, CPM 需要乘上一

个焦距等于 CPM 和相机平面之间距离为 z_h 的 QPM。同时。为了简化模型, 可以假设透镜和 CPM 位于同一平面上, 因此, 图像传感器记录的点源响应如式(2)所示:

$$I_{IR,k}(\bar{r}_h; \bar{r}_s, z_s) = \left| \frac{\sqrt{I_s} C Q\left(\frac{1}{z_s}\right) L\left(\frac{\bar{r}_s}{z_s}\right) Q\left(-\frac{1}{f_1}\right)}{CPM(\bar{r}) Q\left(-\frac{1}{z_h}\right) * Q\left(\frac{1}{z_h}\right)} \right|^2 = \left| v \left[\frac{1}{\lambda z_h} \right] \left\{ \sqrt{I_s} C Q\left(\frac{1}{z_s}\right) L\left(\frac{\bar{r}_s}{z_s}\right) CPM_k(\bar{r}) \right\} \right|^2, \quad (2)$$

其中: $\bar{r}_h$ 为图像传感器平面坐标; $\bar{r}_s$ 为振幅为 $\sqrt{I_s}$ 的点; z_s 为物体平面到 CPM 的距离; z_h 为 CPM 平面到图像传感器平面的距离; C 为复常数; $L(\bar{r}_s/z_s) = \exp[i2\pi a/\lambda z(s_x x + s_y y)]$ 表示为线性相位函数, $Q(a) = \exp[i\pi a/\lambda(x^2 + y^2)]$ 表示为二次相位函数, λ 表示中心波长, x 和 y 表示空间坐标, 而 s_x 和 s_y 分别表示 $\bar{r}_s$ 沿轴 x 和 y 轴的分

量; v 为缩放因子, 且 $z_1 = z_s f_1 / (f_1 - z_s)$ 。由于获取的单幅强度响应是正实值函数, 为获得较好的重建效果, 通过两幅 CPM 获取的双极全息图为:

$$H_{PSH}(\bar{r}, z_s) = I_{IR,1}(\bar{r}_h, z_s) - I_{IR,2}(\bar{r}_h, z_s). \quad (3)$$

然后对获取的全息图采用 NLR, NLR 公式为:

$$I_{NLR}(r) = F^{-1} \left\{ \left| \overline{H_{OH}} \right|^o \cdot \exp[i \cdot \arg(\overline{H_{OH}})] \cdot \left| \overline{H_{PSH}} \right|^p \cdot \exp[-i \cdot \arg(\overline{H_{PSH}})] \right\}, \quad (4)$$

其中: F 表示傅里叶变换, F^{-1} 代表傅里叶逆变换; $\overline{H_{OH}}$ 和 $\overline{H_{PSH}}$ 分别表示为物体全息图(Object Hologram, OH)和点扩散全息图(Point Spread Hologram, PSH)的傅里叶变换; o 和 p 分别是物体全息图和 PSH 的振幅谱调节参数, 范围为 $-1 \sim 1$ 。其中, o 主要调节物体全息图频谱幅值在重建过程中的权重, p 主要调节 PSH 频谱幅值在相关重建中的补偿强度。当 o 增大时, 物体全息图中的高频细节和边缘信息权重增强, 但同时可能放大噪声; 当 p 增大时, PSH 频谱补偿作用增强, 可提高相关峰锐度, 但过大的 p 可能导致 PSH 高频噪声和旁瓣被放大。因此, o 和 p 的选

择需要在图像锐度、噪声抑制和背景稳定性之间折中。具体的重建过程, 首先利用针孔点源记录 PSH, 再将针孔替换为目标物体记录 OH。随后对 OH 和 PSH 分别进行傅里叶变换, 并按照式(4)进行频域非线性相关重建。

由于 NLR 通过改变频谱幅值权重实现非线性相关重建, 严格意义上式(4)并非完全线性系统。为分析孔径阵列对系统频率传递特性的影响, 可在固定 o 和 p 的值且忽略幅值非线性对相位相关位置影响的条件下, 将重建过程近似表示为物体全息图与 PSH 之间的相关运算。根据式(4)可得:

$$\begin{aligned} I_{re} &\cong F^{-1} \left\{ \left| \overline{H_{OH}}(\bar{r}_h) \right|^o \cdot \exp[i \cdot \arg(\overline{H_{OH}}(\bar{r}_h))] \cdot \left| \overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h) \right|^p \cdot \exp[-i \cdot \arg(\overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h))] \right\} = \\ &F^{-1} \left\{ \left| F \left\{ O_h * H_{OH}(\bar{r}_h) \right\} \right|^o \cdot \exp[i \cdot \arg \{ F \{ O_h * H_{OH}(\bar{r}_h) \} \}] \right\} \otimes \\ &F^{-1} \left\{ \left| \overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h) \right|^p \cdot \exp[-i \cdot \arg(\overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h))] \right\} = O_h * F^{-1} \left\{ \left| \overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h) \right|^p \cdot \exp[i \cdot \arg(\overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h))] \right\} \otimes \\ &F^{-1} \left\{ \left| \overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h) \right|^p \cdot \exp[-i \cdot \arg(\overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h))] \right\} = O_h * F^{-1} \left\{ \left| \overline{H_{PSH}}(\bar{r}_h) \right|^{o+p} \right\} = O_h * F^{-1} \left\{ F \left\{ |I_{IR,1} - I_{IR,2}|^{o+p} \right\} \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中: “ $\otimes$ ” 表示互相关运算, O_h 为物体 O 所对应图像传感器平面对应的重建像。式(5)主要用于

解释系统成像过程与孔径频率响应之间的关系, 并不表示 o 和 p 对重建结果没有影响。实际上, o

和 p 会改变相关重建中的频谱幅值加权, 从而影响重建图像的噪声水平、相关峰宽度和背景旁瓣强度。但由于其不能恢复孔径 MTF 零值区域中已经丢失的频率分量, 因此 NLR 参数优化无法完全替代孔径阵列结构优化。

根据式(5)可以得出系统的 MTF 为:

$$MTF = F \left\{ \left| I_{IR,1} - I_{IR,2} \right|^{o+p} \right\}. \quad (6)$$

此外, 由于 I-COACH 系统的 CPM 与传感器平面之间满足傅里叶变换关系, 在忽略缩放因子的影响下, 近似的 MTF 为:

$$MTF = \left| CPM_1' \otimes CPM_1' - CPM_2' \otimes CPM_2' \right|^{o+p}, \quad (7)$$

其中: $CPM_{1,2}'$ 为对应空间频率的傅里叶变换。空间频率与系统截止频率相关; 仅考虑系统数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 时, 最大截止频率由孔径上相距最远的两点决定。在 PAIS 中, 频率响应受主孔径尺寸、阵列结构和环面子孔径外径共同影响。子孔径内径接近外径时, 中频响应更均匀; 但内径增大会降低光通量, 增加曝光时间并放大背景噪声影响。因此, 系统设计需在子孔径尺寸、PSF 质量和光通量之间折中。

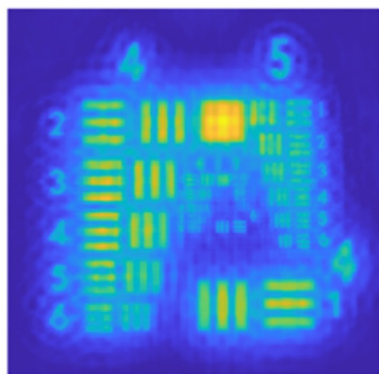
3 计算机仿真实验

孔径阵列排布对 PAIS 的 MTF 具有显著影响。Golay-6 孔径阵列频率覆盖更均匀, 冗

余度较低, 可在子孔径数量和有效面积较小的条件下保持较好的中频调制能力。由于稀疏孔径布局降低了实验光通量, 且传统 CPM 生成的 PSF 强度较低, 在仿真与实验中采用稀疏点 CPM, 以提高 PSF 和目标响应强度并抑制背景噪声。

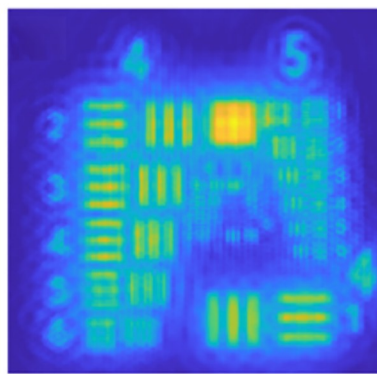
为比较不同孔径阵列对 PAIS 成像的影响, 本文仿真了八子孔径环形阵列、六子孔径环形阵列和 Golay-6 孔径阵列。图 3 给出了三种阵列在不同子孔径外径下的重建结果。

图 3 表明, 随着子孔径外径减小, 系统中频调制能力下降, PAIS 重建质量明显降低。在主孔径直径为 4.536 mm、子孔径外径为 0.630 mm 时, 八子孔径环形阵列的重建分辨率可达到主孔径对应的 47 lp/mm, 如图 3(e) 所示, 但其中频信息仍存在损失。若保持子孔径尺寸不变并进一步减少子孔径数量, 成像质量会显著下降。采用 Golay-6 孔径阵列后, 尽管最大截止频率约为主孔径的 89% (对应空间分辨率 42 lp/mm)。为进一步定量比较不同孔径阵列的仿真重构质量, 在相同仿真条件下计算了三种孔径阵列重构图像的 SNR。结果表明, Golay-6 孔径阵列、八子孔径环形阵列和六子孔径环形阵列的 SNR 分别为 23.6 dB, 23.4 dB 和 22.3 dB。Golay-6 孔径阵列的 SNR 略高于八子孔径环形阵列, 并高于六子孔径环形阵列。由此可见重建效果仍优于环形阵列 PAIS, 并可减少 25% 的孔径面积。



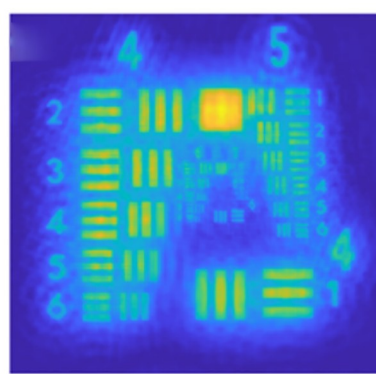
(a) Golay-6 孔径阵列 0.630 mm 外径的重建结果

(a) Reconstruction results of the Golay-6 aperture array with an outer diameter of 0.630 mm



(b) Golay-6 孔径阵列 0.540 mm 外径的重建结果

(b) Reconstruction results of the Golay-6 aperture array with an outer diameter of 0.540 mm



(c) 六子孔径环形阵列 0.630 mm 外径的重建结果

(c) Reconstruction results of the six-aperture circular array with an outer diameter of 0.630 mm

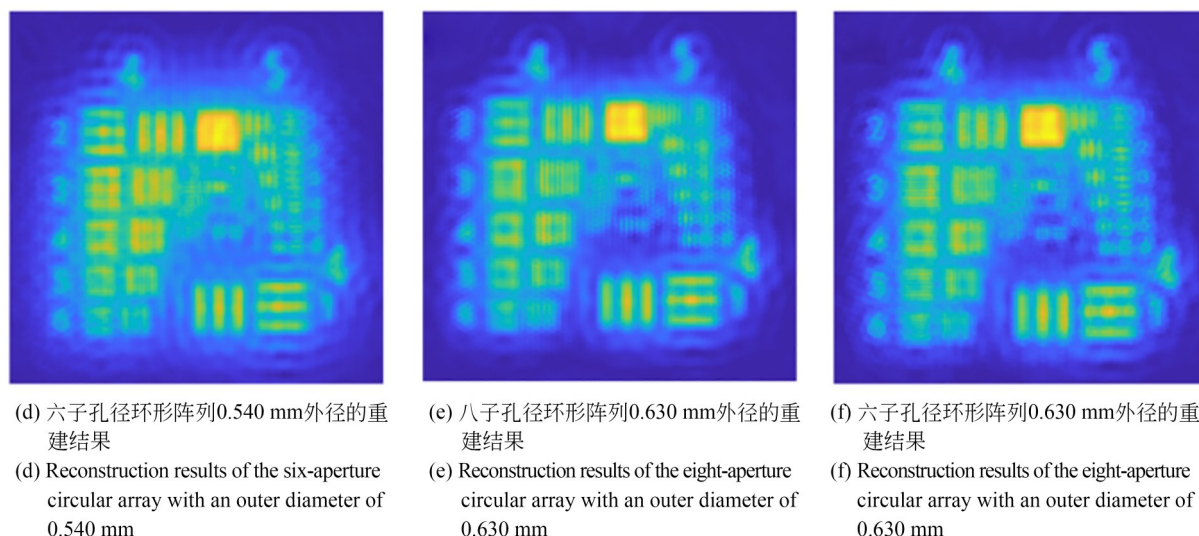


图3 不同子孔径外径的三种孔径阵列重建结果

Fig. 3 Reconstructed results of three aperture arrays with different sub-aperture outer diameters

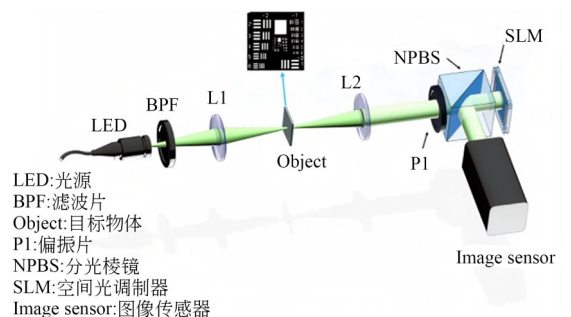
4 测量实验与结果

4.1 实验系统

基于上述仿真结果,本文搭建实验系统以验证不同孔径阵列的成像性能,并结合实际光通量、SLM尺寸和PSF质量选取实验参数。

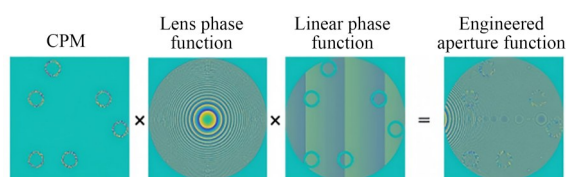
PAIS实验装置如图4(a)所示,采用单通道I-COACH系统。光源为LED(大恒光电,LED-

20,功率20 W),使用直径 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的针孔模拟点光源。针孔衍射光经焦距150 mm的透镜L2准直后,通过偏振片P1调制,使光束偏振方向与空间光调制器(SLM)(大恒光学, $720\times 1\,280\text{ pixels}$,像素间距 $6.3\text{ }\mu\text{m}$,刷新率32 kHz)的调制方向一致。生成的工程孔径函数依次加载于SLM上,经过200 mm传播距离后,由CMOS图像传感器(大恒光学, $1\,200\times 1\,920\text{ pixels}$,像素间距 $5.2\text{ }\mu\text{m}$)记录PSF。完成PSF采集后,将针孔替换为目标物体并记录物体响应。图4(b)为加载于SLM上的工程孔径函数,其中包括由子孔径CPM组成的Golay-6孔径阵列、焦距等于SLM至传感器距离的QPM以及线性相位函数。受SLM有效尺寸限制,孔径阵列均以直径4.536 mm的外切圆为设计边界。由于系统NA和光通量较低,为提高PSF和物体强度响应,G-S算法在频域采用4个稀疏点作为振幅约束。稀疏点数量减少可提高单个稀疏点的能量集中度,但也会增强随机旁瓣相关噪声。因此,本文采用2幅不同稀疏点CPM记录的响应进行复值叠加,以降低重建噪声。2幅CPM复值叠加的降噪机理如下:目标信号在不同CPM重建结果中的位置一致,可在复值叠加中相干累加;不同随机稀疏点分布引起的旁瓣和背景相关噪声相关性较弱,叠加后会部分抵消。因此,与单幅CPM相比,2幅CPM可显著降低散斑状相关噪声并提高SNR。



(a) 实验装置图

(a) Diagram of the experimental setup



(b) 工程孔径函数

(b) Engineered aperture function

图4 PAIS实验系统

Fig. 4 PAIS experimental system

CPM 幅数并非越多越好。增加 CPM 幅数虽然可进一步平均随机噪声,但会增加采集次数和计算量,并放大光源波动、SLM 刷新误差和系统漂移的累积影响。此外,由于 SLM 平面加载的 QPM 相当于菲涅尔透镜,准单色非相干 LED 光源在弱时间相干条件下会产生一定色散,且离轴位置越远色散越明显。实验中通过提高照明光源时间相干性并将稀疏点约束在光轴附近较小范围内减弱该影响。受 SLM 孔径尺寸限制,稀疏点之间可能出现轻微重叠,但未对目标重建质量产生明显影响。

实验分别测试 Golay-6 孔径阵列、八子孔径环形阵列和六子孔径环形阵列的成像效果。三种阵列均采用外径为 0.630 mm 的环面子孔径,内径与外径之差为 0.189 mm。

图 5 为常规成像与 PAIS 稀疏全息图 NLR 成像结果。常规成像结果较差,主要原因是其 MTF 响应集中在环形子孔径的低频区域,对高频信息的传递能力不足。在 PAIS 重建中,综合重建图像 SNR 和强度截面曲线,对不同 o 和 p 组合进行了比较。结果表明,当 $o=0.85$ 和 $p=0.2$ 时,重建结果在细节保持与噪声抑制之间取得较好平衡。需要指出的是,调节 o 和 p 可以改变重建阶段的频谱权重,从而改善噪声抑制、图像对比度和局部锐化效果,但不能恢复孔径阵列 MTF 零值区域中已经丢失的频谱信息。对于八子孔径环形阵列,适当调整 o 和 p 可改善局部重建结果,但其中频段 MTF 仍存在明显波动和弱响应区域,因此难以仅依靠 NLR 参数调节获得与 Golay-6 阵列相同的频率覆盖均匀性。Golay-6 阵列的优势来源于孔径结构本身更均匀的空间频率采样。

对图 5(a)至图 5(f)中红色虚线位置的强度曲线进行分析,结果如图 5(g)和图 5(h)所示(彩图见期刊电子版)。图 5(g)为不同孔径阵列 PAIS 重建结果的强度截面曲线,表明在 0.630 mm 子孔径外径下, Golay-6 孔径系统和八子孔径环形系统均能有效成像。图 5(h)为不同孔径阵列的常规成像结果,对比可见基于 I-COACH 的 PAIS 相较常规成像具有更好的重建性能。

进一步比较 Golay-6 孔径系统和八子孔径环

形系统的强度曲线可见,在子孔径外径为 0.630 mm 时,八子孔径环形系统的重建噪声更高,局部结构稳定性弱于 Golay-6 孔径系统。为进一步定量评价不同孔径阵列的重建质量,计算了重建图像的 SSIM 和 SNR,结果见表 1。SNR 用于表征重建图像中有效信号与背景噪声之间的相对水平,SSIM 用于评价重建结果与全孔径图像之间的结构相似性^[24]。结果显示,六子孔径环形阵列、八子孔径环形阵列和 Golay-6 孔径阵列的 SSIM 分别为 0.83, 0.90 和 0.97, SNR 分别为 3.79 dB, 13.14 dB 和 14.82 dB。可以看出, Golay-6 孔径阵列在结构相似性和信噪比两项指标上均优于两种环形孔径阵列,说明其能够更好地保持目标结构并抑制背景噪声。

表 1 实验结果数据对比

Tab. 1 Comparison of experimental results

Aperture array	SSIM	SNR/dB
Annular-6	0.83	3.79
Annular-8	0.90	13.14
Golay-6	0.97	14.82

虽然 Golay-6 孔径阵列的最大截止频率低于八子孔径环形阵列,但其中频响应更均匀。图 6 给出了不同孔径阵列的 MTF 空间频率曲线。如图 6(b)所示,通过对比不同阵列在 MTF 中频段(0.05~0.20)内的曲线可以看出,八子孔径和六子孔径环形阵列的 MTF 曲线振荡明显,存在较大的波峰和波谷; Golay-6 孔径阵列的 MTF 曲线更平缓,说明其对中频信息的传递更稳定。

从频域角度看,六子孔径环形阵列的 MTF 存在更多零值和弱响应区域,目标边缘与细节对应的中频分量被抑制后, NLR 难以恢复已缺失的频谱信息,因而表现为结构断裂、背景噪声增强和 SNR 下降。八子孔径环形阵列虽然具有较高截止频率,但其中频段响应仍存在明显波动,导致重建结构稳定性和噪声抑制效果弱于 Golay-6 孔径阵列。Golay-6 阵列具有更均匀的空间频率覆盖,可减少关键中频信息损失,因此在较小孔径面积下仍获得更高的 SSIM、SNR 和更稳定的重建质量。

从频率滤波角度看,孔径阵列的 MTF 决定了系统对不同空间频率信息的传递能力。目标

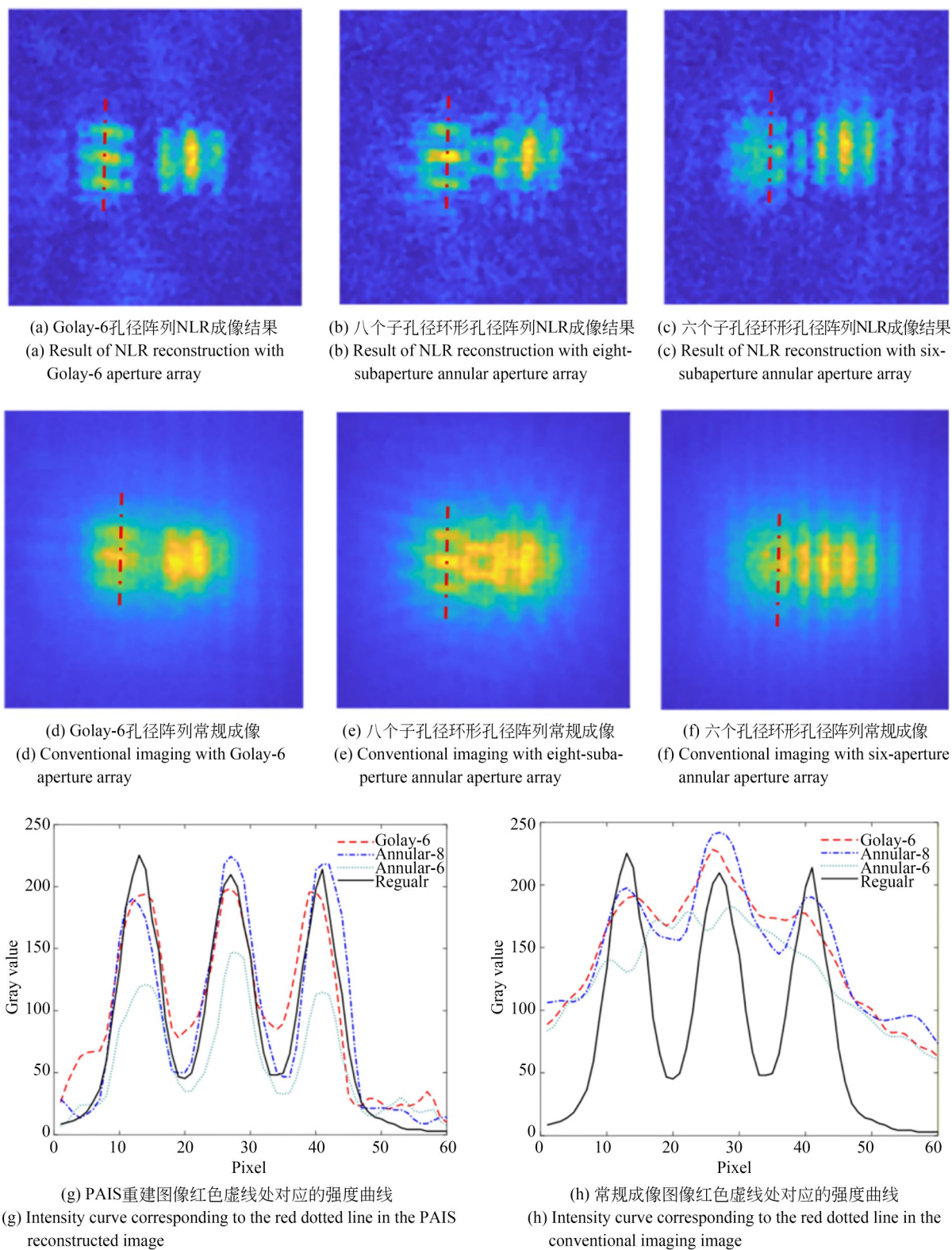
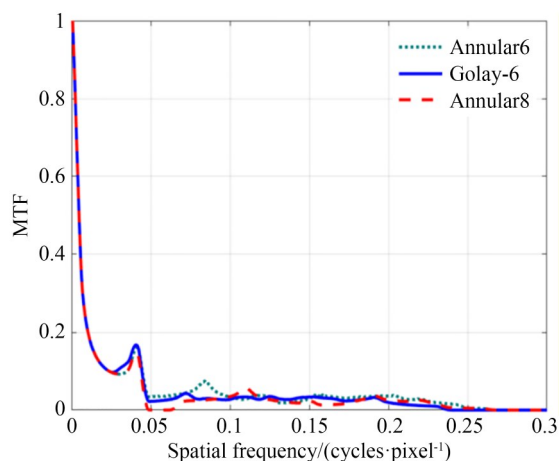


图5 PAIS稀疏全息图的NLR成像与常规成像结果

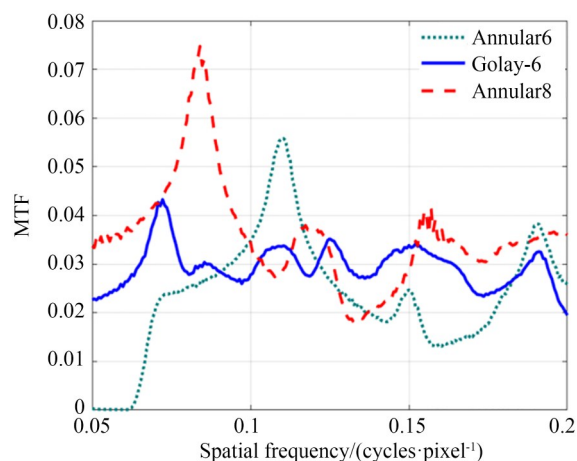
Fig. 5 Direct imaging and PAIS sparse holography NLR reconstructed results

的整体轮廓主要由低频信息决定,边缘、纹理和局部结构主要依赖中频信息,更细微的细节则与

高频信息有关。当MTF在某些中频区域出现零值或弱响应时,目标中对应的边缘和纹理信息会



(a) 不同孔径的MTF空间频率曲线
(a) Spatial frequency curves of MTF with different apertures



(b) 各孔径阵列在图(a)红色虚线所示中频范围内的空间频率曲线对比
(b) Comparison of spatial frequency curves of each aperture array within the medium frequency range indicated by the red dotted line in Figure (a)

图6 不同孔径的MTF空间频率

Fig. 6 Spatial frequency of MTF with different apertures

被抑制,后续 NLR 重建难以完全恢复这些已经损失的频谱成分。六子孔径环形阵列的 MTF 零值区域较多,导致关键中频信息传递不足,因此重建结果中容易出现结构断裂、背景噪声增强和 SNR 降低。八子孔径环形阵列虽然具有较高截止频率,但中频响应仍存在较大波动。Golay-6 孔径阵列的空间基线分布更加紧凑且非冗余,中频覆盖更加连续,能够更稳定地传递目标边缘和细节信息。因此, Golay-6 阵列在孔径面积更小的情况下仍能获得更高 SNR 和更好的重建结果。

为定量评估 MTF 均匀性,计算了波动系数和中频最大波动幅度,结果见表 2。六子孔径环形阵列、Golay-6 孔径阵列和八子孔径环形阵列的波动系数分别为 0.513, 0.137 和 0.314, 中频

最大波动幅度分别为 0.056, 0.024 和 0.057。Golay-6 孔径阵列两项指标均最小,表明其 MTF 波动更低、频率响应更均匀,因此能够在较小孔径面积下获得较好的重建效果。

4.2 复杂样品验证成像

为了验证基于 Golay-6 孔径阵列的 I-COACH 系统对复杂结构目标的成像能力,本文选取具有典型微细纹理特征的蜻蜓翅膀作为实验样本。蜻蜓翅膀具有轻薄、纹理分布复杂及细节结构丰富等特点,常被用于航空材料检测与微结构成像相关研究^[25-26]。如图 7(a)所示为该样本的实物图,其全孔径成像结果如图 7(b)所示。系统的重建结果如图 7(c)所示,可以清晰地识别出蜻蜓翅膀的轮廓结构。为了量化评估重建质量,以全孔径图像为参考,测得 SSIM 为 0.975, SNR 为 13.5 dB,说明系统能够较清晰地恢复蜻蜓翅膀的轮廓和细微纹理。需要说明的是,蜻蜓翅膀样品可用于验证系统对复杂结构目标的成像能力,但与其与天文观测中的点源、弱目标或远场目标仍存在差异。因此,后续实验可进一步引入标准分辨率板、星点目标或双星模拟目标,定量评估系统的分辨率、对比度传递能力和弱目标重建能力,从而增强对天文部分孔径成像应用场景的支撑。

随着 I-COACH 系统的发展,其与定量相位

表 2 不同孔径阵列的 MTF 曲线波动系数和中频最大波动幅度

Tab. 2 Fluctuation coefficients and maximum mid-frequency fluctuation amplitudes of different aperture arrays

Aperture array	Coefficient of Variation(CV)	Maximum fluctuation amplitude
Annular-6	0.513	0.056
Annular-8	0.314	0.057
Golay-6	0.137	0.024

成像技术的结合展现出应用潜力^[27]。该方法避免了传统双光束干涉和数值反向传播过程,可利用相位恢复算法实现 I-COACH 相位成像。后续可

进一步研究 Golay-6 孔径阵列在该体系中的作用,重点评估其对成像分辨率、SNR 和动态范围等指标的影响,为定量相位成像性能提升提供依据。

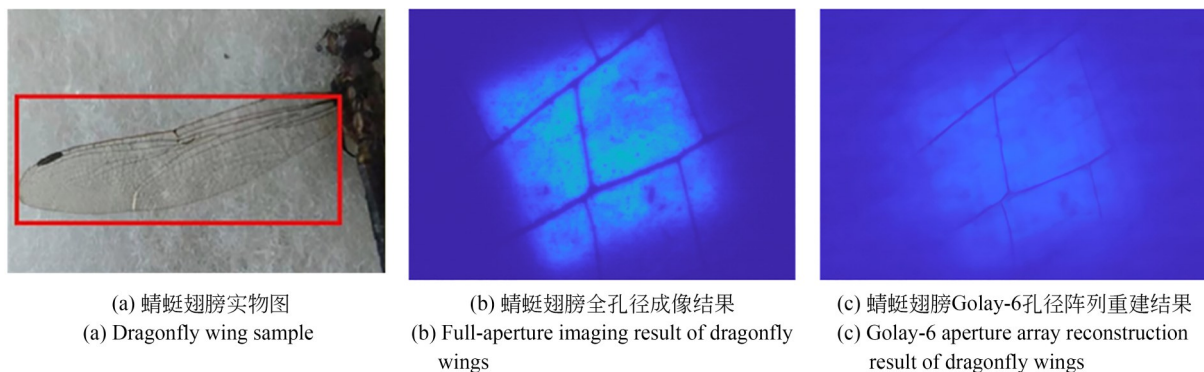


图 7 蜻蜓翅膀成像结果

Fig. 7 Imaging results of dragonfly wings

5 结 论

本文构建了基于 Golay-6 孔径阵列的非相干全息部分孔径成像系统,针对传统环形阵列 MTF 不均、中频响应弱和孔径利用率低等问题进行了优化。理论、仿真和实验结果表明:与八子孔径环形阵列相比, Golay-6 阵列孔径面积缩减 25%, MTF 波动系数降至 0.137,中频最大波动幅度降至 0.024, SNR 达到 14.82 dB;对蜻蜓翅膀样品成像时, SSIM 为 0.975, SNR 为 13.5 dB,可恢复复杂结构细节。该系统在降低孔径面积的同时提升了成像均匀性、中频传递能力和 SNR,验证了 Golay-6 孔径阵列在非相干全息部分孔径成像中的有效性。面向远距离弱光成像等应用场景,后续将

进一步研究系统在低光通量、弱目标和复杂噪声条件下的成像稳定性与适用性。

作者贡献声明:

赵微:方法提出,实验设计,实验数据整理与分析,论文构思与撰写;

于雪莲:研究指导,论文审核,学术修订,方法指导,项目管理;

潘立辉:数据整理,仿真分析;

王政贤:实验指导,数据采集;

牛佳:实验资源提供;

贺磊:实验平台搭建;

孙彦乾:监督项目执行;

李秀芳:实验资源提供。

参考文献:

- [1] HYDE R A. Eyeglass 1 very large aperture diffractive telescopes[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [2] DUBEY N, ROSEN J, GANNOT I. High-resolution imaging system with an annular aperture of coded phase masks for endoscopic applications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15122.
- [3] WANG J, WIRTH-SINGH A, SARAGADAM V, et al. A golay metalens for long-range, large aperture, thermal imaging via sparse aperture computational imaging[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 10281.
- [4] LI Z L, AN P, et al. MVMFCam: an all-in-focus optical synthetic aperture imaging system based on multi-view multi-focus computational imaging[J]. *Optics Express*, 2025, 33(10): 20496.
- [5] TIAN D P, ZHANG X F, RUAN N J, et al. End-to-end aperture layout optimization and image restoration with balancing quality and cutoff frequency in optical sparse aperture systems[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 194: 109239.

- [6] 吴泉英, 钱霖, 沈为民. 两种稀疏孔径系统的成像研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 26-33.
WU Q Y, QIAN L, SHEN W M. Imaging research of two kinds of sparse-aperture systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 26-33. (in Chinese)
- [7] VIJAYAKUMAR A, KASHTER Y, KELNER R, *et al.* Coded aperture correlation holography – a new type of incoherent digital holograms[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12430.
- [8] BULBUL A, VIJAYAKUMAR A, ROSEN J. Partial aperture imaging by systems with annular phase coded masks[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33315.
- [9] KASHTER Y, VIJAYAKUMAR A, ROSEN J. Resolving images by blurring: superresolution method with a scattering mask between the observed objects and the hologram recorder[J]. *Optica*, 2017, 4(8): 932.
- [10] 潘立辉, 于雪莲, 程绪坤, 等. 二值编码相位掩模交替迭代优化的无干涉非相干全息术[J]. 光学学报, 2024, 44(9): 0910001.
PAN L H, YU X L, CHENG X K, *et al.* Interferenceless incoherent holography optimized by alternate iteration of binary coded phase mask[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(9): 0910001. (in Chinese)
- [11] JOSHI N, TIWARI V, KAHRO T, *et al.* Interferenceless coded aperture correlation holography for five-dimensional imaging of 3D space, spectrum and polarization[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2025, 7(2): 025004.
- [12] KUMAR M, VIJAYAKUMAR A, ROSEN J. Incoherent digital holograms acquired by interferenceless coded aperture correlation holography system without refractive lenses[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11555.
- [13] LIU C, MAN T L, WAN Y H. Optimized reconstruction with noise suppression for interferenceless coded aperture correlation holography[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(6): 1769-1774.
- [14] LIU C, GUO H, CHENG X X, *et al.* Point spread function engineering enable resolution enhanced imaging for Interferenceless coded aperture correlation holography[J]. *Optics Express*, 2024, 32(23): 41818.
- [15] RAIM R, VIJAYAKUMAR A, ROSEN J. Non-linear adaptive three-dimensional imaging with interferenceless coded aperture correlation holography (I-COACH)[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18143.
- [16] VIJAYAKUMAR A, ROSEN J. Interferenceless coded aperture correlation holography – a new technique for recording incoherent digital holograms without two-wave interference[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13883.
- [17] WU Y, LI R Z, MAI Y B, *et al.* RF-ADMM-net for sparse aperture ISAR imaging under low signal-to-noise ratio[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2026, 62: 5446-5461.
- [18] BULBUL A, ROSEN J. Partial aperture imaging system based on sparse point spread holograms and nonlinear cross-correlations[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 21983.
- [19] 王海伦, 王跃科. 基于卷积注意力机制的无透镜对抗编码成像[J]. 液晶与显示, 2024, 39(9): 1214-1222.
WANG H L, WANG Y K. Lens-free adversarial encoded imaging method based on convolutional attention mechanism[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(9): 1214-1222. (in Chinese)
- [20] YANG Z X, XIA J Y, ZHANG S H, *et al.* A learning-aided unsupervised method for sparse aperture ISAR imaging and autofocusing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2026, 62: 350-367.
- [21] WANG R Q, WANG W R, HU J, *et al.* Design-driven aperture layout co-optimization for optical sparse aperture imaging systems[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(30): 9033-9040.
- [22] 郝未倩, 梁忠诚, 刘肖尧, 等. 分形结构稀疏孔径阵列的成像性能[J]. 物理学报, 2019, 68(19): 317-323.
HAO W Q, LIANG Z C, LIU X Y, *et al.* Imaging performance of fractal structure sparse aperture arrays[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(19): 317-323. (in Chinese)
- [23] GOLAY M J E. Point arrays having compact, nonredundant autocorrelations[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(2): 272.
- [24] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to

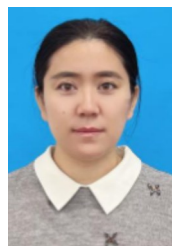
- structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [25] ZHOU Z Y, HUANG J. Synthetic analysis on radar cross-section and remote sensing for an ornithopter[J]. *Bio-Robotics*, 2025, 1(1): 32-53.
- [26] STELZER V, KRENKEL L. 2D numerical investigations derived from a 3D dragonfly wing captured with a high-resolution micro-CT [J]. *Technology and Health Care*, 2021, 30(1): 283-289.
- [27] YU X L, WANG Z X, NIU J, *et al.* Quantitative phase imaging based on the coded aperture correlation holography cross-correlation reconstruction method[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(11): 2402175.

作者简介:



赵 微(2001—),女,硕士研究生,现就读于哈尔滨理工大学,主要从事全息成像及其应用方面的研究。E-mail:15621260229@163.com

通讯作者:



于雪莲(1978—),女,副教授,硕士生导师,研究主要集中在新一代计算成像与传感技术研发,包括全息成像、散射成像、光纤内窥成像及其在生物医学领域和信息安全方面的应用。E-mail:yuxuelian@hrbust.edu.cn