

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508363

计算全息图抗噪性能双指标评估

李玉成 张 扬 时俊杰 高 嵩 张沐群

(空军工程大学航空机务士官学校 信阳 464000)

摘要:针对计算全息技术在噪声环境下再现像质量退化的问题,通过构建峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和结构性相似指数测量(structural similarity index measure, SSIM)的双指标评价体系,系统研究了噪声对四类典型计算全息图再现质量的影响规律。基于MATLAB仿真平台,对比分析了迂回相型(罗曼Ⅲ型)、修正型离轴参考光(博奇法及李氏编码)、相息图及计算全息干涉图在不同噪声系数下的性能表现。研究表明,噪声系数与再现像质量存在明显相关性,PSNR值随噪声系数增大呈下降趋势,且在低噪声区间($ef_1 \leq 0.3$)下降较为显著;SSIM指标整体表现出更强的稳定性,特别是在修正型离轴参考光编码中表现优异;编码策略的优化能有效提升抗噪性能,如李氏编码通过正交分量分解与多级灰度量化可在 $ef_1 = 1.0$ 时保持PSNR约为19 dB,罗曼Ⅲ型编码通过增大通光孔宽度可使PSNR提升94.2%;连续型全息图在细节保持方面优于二值化全息图,但二值化方法在特定应用场景中仍具实用价值。该研究为不同噪声环境下计算全息编码方案的选择提供了理论依据。

关键词: 计算全息图; PSNR; SSIM; 噪声干扰; MATLAB 仿真

中图分类号: O438.1; TN27

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 170.5035; 520.6040

Dual-metric assessment of noise robustness in computer-generated holograms

Li Yucheng Zhang Yang Shi Junjie Gao Song Zhang Muqun

(Aviation Maintenance NCO Academy of Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China)

Abstract: This paper addresses the issue of image quality degradation in reconstructed holograms under noisy conditions through computational holography. By establishing a dual-metric evaluation system based on peak signal-to-noise ratio (PSNR) and structural similarity index measure (SSIM), we systematically investigate the influence of noise on the reconstruction quality of four typical types of computer-generated holograms. Based on MATLAB simulation platform, a comparative analysis is conducted on the performance of detour-phase holograms (Lohmann type III), modified off-axis reference beam encoding (Burch's and Lee's encoding), kinoforms, and computer-generated holographic interferograms under different noise coefficients. The results indicate a clear correlation between the noise coefficient and the quality of reconstructed image, the PSNR values decrease with increasing noise levels, with a more pronounced decline observed in the low-noise range ($ef_1 \leq 0.3$). Moreover, the SSIM metric demonstrates greater overall stability, particularly excelling in modified off-axis reference beam encoding methods. Optimization of encoding strategies effectively enhances noise resistance—for instance, Lee's encoding maintains a PSNR of approximately 19 dB at $ef_1 = 1.0$ through orthogonal component decomposition and multi-level grayscale quantization, while Lohmann type III encoding achieves a 94.2% improvement in PSNR by increasing the aperture width. Although continuous-tone holograms outperform binary holograms in detail retention, binary methods remain practically valuable in specific application scenarios. This study provides a theoretical basis for selecting computer-generated hologram (CGH) encoding schemes under various noise environments.

Keywords: computer-generated hologram; PSNR; SSIM; noise interference; MATLAB simulation

0 引言

计算全息术通过数值方法模拟光波干涉与衍射过程,取代传统光学全息复杂的光路搭建^[1-2],在避免环境干扰与系统校准误差的同时,显著提高了全息图生成的效率与灵活性^[3-4],近年来已在全息显示^[5-6]、光学信息处理^[7-8]等领域展现出广泛潜力。根据编码方式的不同,典型计算全息图主要包括迂回相型全息图^[9]、修正型离轴参考光全息图^[10]、相息图^[11]及计算全息干涉图^[12-13]等几类。

为提升计算全息图的抗噪性能,国内外研究者从光学系统设计、传统数字图像处理 and 深度学习^[14-15]等多个技术路径展开了系统研究。

在光学系统优化方面,研究主要通过改进光路结构与成像硬件来抑制噪声源。贺佳雪等^[16]将傅里叶变换光谱技术与数字全息技术相结合,利用不同波长重构图像的噪声差异性,提出了基于波段优选的加权求和平均算法,该算法与三维块匹配算法结合后,显著降低了彩色全息重构图像的噪声水平。与此同时,Kerov 等^[17]开发了一种基于 3D 自适应滤波的新型散斑降噪方法,通过处理具有不相关散斑图案的全息图序列,在保持图像细节的同时实现了有效的噪声抑制。这类方法的优势在于从物理层面控制噪声,效果较为稳定,但其系统复杂度较高且需要精密的机械结构调整,在实际应用中面临成本与控制精度的挑战。

在传统数字图像处理领域,研究重点聚焦于散斑噪声抑制和视场扩大等关键问题。Min 等^[18]提出了一种适用于任意三维物体的单边带编码全息图散斑抑制技术,该方法通过优化全息合成中的随机载波,在特定深度平面实现均匀的振幅分布,从而显著降低了载波产生的散斑。传统算法具有原理直观、计算复杂度可控的优点,且经过长期实践验证,但其处理效果在复杂噪声环境下易达到瓶颈,高精度算法往往需要以牺牲实时性为代价。

在深度学习这一新兴方向,研究者探索了数据驱动的解决方案。Liao 等^[19]提出了基于深度学习的散射介质成像方法,将散射成像中的病态逆问题转化为全息图去噪问题,实验表明该方法对不同散射介质和物体类型均具有良好的泛化能力。深度学习方法凭借其强大的非线性映射和特征学习能力,能够实现端到端的噪声抑制与质量增强,尤其在复杂场景下表现出显著优势,但其性能依赖于大量高质量训练数据,且模型设计与优化过程较为复杂。

综上所述,现有抗噪方法各具特色:光学系统优化从源头控制噪声但实施复杂,传统算法成熟可靠但性能提升有限,深度学习方法效果显著但数据依赖性强^[20]。

目前的研究多侧重于硬件改进或后处理算法优化,

而对不同计算全息编码机制本身固有抗噪性能的系统性评估与对比研究仍显不足,这在一定程度上制约了编码方案的优化选择与针对性改进。

为此,本文以 4 类典型计算全息图为研究对象,基于峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和结构相似性指数测量(structural similarity index measure, SSIM)构建双指标评价体系^[21-22],通过 MATLAB 仿真系统分析不同噪声强度下各类全息图的再现质量变化规律,以期为不同噪声环境下编码方案的优选提供理论依据与方法支持。

1 理论分析

1.1 迂回相型计算全息图

当一束平面波以入射角 α_0 照射至栅距为 d 的光栅时,对于衍射角为 α_M 的第 M 级衍射光,其相邻光线间的光程差可表示为:

$$\Delta_M = (\sin\alpha_M + \sin\alpha_0)d = M\lambda \quad (1)$$

若光栅局部区域引入栅距偏差 p ,则该处的有效栅距变为 $d + p$,此区域衍射光波的光程差随之被调制为:

$$\Delta_M' = (\sin\alpha_M + \sin\alpha_0)(d + p) \quad (2)$$

由此导致的光程延迟及相位延迟可分别表示为:

$$\Delta_M' - \Delta_M = (\sin\alpha_M + \sin\alpha_0)p \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_M = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta_M = 2\pi Mp/d \quad (4)$$

式中: $\Delta\varphi_M$ 称为迂回相位。设物面光场复振幅分布为 $\tilde{U}(x, y) = a(x, y)\exp[j\phi(x, y)]$,其傅里叶变换频谱记为 $\tilde{F}(u, v) = A(u, v)\exp[j\Phi(u, v)]$ 。为进行全息图计算,需对光场进行空域抽样量化。设 x, y 方向的抽样间隔分别为 $\delta x, \delta y$,总抽样数为 $I \times K$,则抽样点 (i, k) 处的复光场值为 $\tilde{U}(i\delta x, k\delta y)$ 。相应地,频域中的抽样间隔为 $\delta u, \delta v$,总抽样数同样为 $M \times N$,整个过程需满足抽样定理,取空域与频域抽样数相等,即 $I = M, K = N$ 。频谱在点 (m, n) 处的值 $\tilde{F}_{mn} = \tilde{F}(m\delta u, n\delta v)$ 为复数,可表示为 $\tilde{F}_{mn} = C_{mn} + jD_{mn}$,其中 C_{mn} 和 D_{mn} 分别为实部与虚部,由此可得频谱的振幅 A_{mn} 与相位 Φ_{mn} 。

$$A_{mn} = \sqrt{C_{mn}^2 + D_{mn}^2} \quad (5)$$

$$\Phi_{mn} = \arctan(D_{mn}/C_{mn}) \quad (6)$$

在二元傅里叶变换全息图中,罗曼 III 型编码方法的抽样单元结构如图 1 所示。每个抽样单元内设置一个矩形通光孔径,其宽度 W 为固定值,而高度 l_{mn} 随该采样点 (m, n) 处频谱振幅 A_{mn} 的大小变化。孔径中心相对于单元中心的偏移量 p_{mn} ,则由该点频谱相位 Φ_{mn} 决定。因此,矩形孔的高度 l_{mn} 和位置 p_{mn} 分别实现了对复振幅频谱的振幅 A_{mn} 和相位 Φ_{mn} 的编码。

根据二元傅里叶全息图的衍射理论,可建立矩形孔

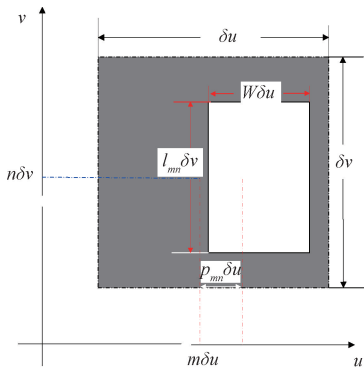


图1 罗曼Ⅲ型的一个抽样单元

Fig. 1 A sampling unit of Lohmann Type III

径的结构参数(高度 l_{mn} 与位置偏移量 p_{mn})与复波前频谱的振幅 A_{mn} 和相位 Φ_{mn} 之间的定量关系,其表达式为:

$$l_{mn} = k' A_{mn} \quad (7)$$

$$p_{mn} = M' \Phi_{mn} / (2\pi) \quad (8)$$

式中: k' 为常数; M' 为整数。该关系表明,矩形孔径的高度 l_{mn} 和位置偏移量 p_{mn} 分别与频谱振幅 A_{mn} 和相位 Φ_{mn} 成正比。

当某采样点 (m, n) 处的相位值 $\Phi_{mn} > \pi/2$ 时,其对应的矩形孔径将延伸至相邻的 $(m+1, n)$ 单元,导致区域重叠。为避免该问题,可将溢出的部分平移至当前单元的另一侧(图2)。根据光栅衍射理论,此操作引入的相位变化为 2π ,而相位具备 2π 周期性,因此该调整对最终的再现效果无影响。

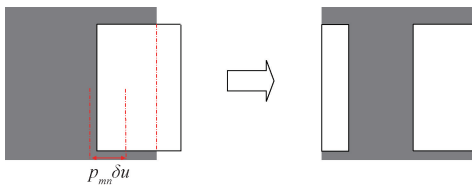


图2 罗曼Ⅲ型的模式溢出校正法

Fig. 2 Mode overflow correction method for Lohmann Type III

1.2 修正型离轴参考光计算全息图

设物光场的复振幅分布为 $\tilde{U}(x, y) = A(x, y) \exp[j\varphi(x, y)]$, 将其与离轴参考光 $\tilde{R}(x, y) = R \exp[j\varphi(2\pi\alpha x)]$ 进行干涉, 所得离轴全息图的透过率函数可表示为:

$$h(x, y) = |\tilde{U}(x, y) + \tilde{R}(x, y)|^2 =$$

$$R^2 + |\tilde{A}(x, y)|^2 + 2RA(x, y) \cos[2\pi\alpha x - \varphi(x, y)] \quad (9)$$

式中: $A(x, y)$ 与 $\varphi(x, y)$ 分别为物光场在 (x, y) 处的振幅与相位分布; R 与 α 则分别代表参考光的振幅及空间载频。

为消除透射函数中的负值, 博奇(Burch)提出引入一直流偏置以替代式(9)中的 $R^2 + |\tilde{A}(x, y)|^2$ 项, 据此重构离轴全息图的透过率函数为:

$$h(x, y) = K + \tilde{U}(x, y) \times \tilde{R}^*(x, y) + \tilde{R}(x, y) \times \tilde{U}^*(x, y) = K + 2RA(x, y) \cos[2\pi\alpha x - \varphi(x, y)] \quad (10)$$

式中: K 为常数, 用于确保全息图透射函数 $h(x, y)$ 在所有空间位置均为非负实数值。对物光振幅进行归一化处理, 即令 $|A(x, y)|_{\max} = 1$, 同时取参考光振幅 $R = 1$, 则式(10)可简化为:

$$h(x, y) = 0.5 \{ 1 + A(x, y) \cos[2\pi\alpha x - \varphi(x, y)] \} \quad (11)$$

在利用式(11)编码制作全息图时, 博奇法采用显微密度计将透过率函数直接记录于胶片介质上, 从而生成具有 256 灰度级的计算全息图。

另一种常见的修正型离轴全息图为李威汉提出的延迟抽样全息图。该方法将全息图上每一待记录的复函数样点 \tilde{F} 分解为 4 个非负实数值进行表示:

$$\tilde{F} = F_1 + jF_2 - F_3 - jF_4 \quad (12)$$

式中:

$$F_1 = \begin{cases} |F| \cos\phi, & \cos\phi \geq 0 \\ 0, & \cos\phi < 0 \end{cases}$$

$$F_2 = \begin{cases} |F| \sin\phi, & \cos\phi \geq 0 \\ 0, & \cos\phi < 0 \end{cases}$$

$$F_3 = \begin{cases} -|F| \cos\phi, & \cos\phi \geq 0 \\ 0, & \cos\phi < 0 \end{cases}$$

$$F_4 = \begin{cases} -|F| \sin\phi, & \cos\phi \geq 0 \\ 0, & \cos\phi < 0 \end{cases}$$

其中, F_1, F_2, F_3, F_4 均为实的非负函数。该方法在复平面上对应于采用四个基向量对复矢量进行分解, 这 4 个基向量分别为 $r^+ = (1, 0), r^- = (-1, 0), j^+ = (0, 1), j^- = (0, -1)$ 。因此, 任意一复矢量可表示为如下线性组合:

$$\tilde{F} = F_1 r^+ + F_2 j^+ + F_3 r^- + F_4 j^- \quad (13)$$

该组基向量在复平面上具有固定的空间关系, 相邻基向量间的夹角均为 $\pi/2$ 。基于延迟抽样技术, 将原始光场所在的全息平面划分为 $N \times N$ 个抽样点, 并将每个抽样点进一步细分为 4 个等间隔的子单元。通过使每个子单元的振幅透过率正比于复函数 F 的对应分量 $F_i[m dx + (i-1) dx/4, n dy], i = 1, 2, 3, 4$, 即可借助 4 个非负实数值实现复光场的完备表示。依该方法所制得的全息图具备连续灰阶特性。

1.3 相息图

相息图要求其平面上的光波场复振幅分布具有恒定

振幅,并可表示为:

$$\tilde{U}(x, y) = A \exp[j\varphi(x, y)] \quad (14)$$

式中: A 为常数。计算全息图平面的复振幅分布,并将其分解为实部 U_R 和虚部 U_I :

$$\tilde{U}(x, y) = U_R(x, y) + jU_I(x, y) \quad (15)$$

则其相位角 $\varphi(x, y)$ 可由下式求得:

$$\varphi(x, y) = \arctan[U_I(x, y)/U_R(x, y)] \quad (16)$$

随后,将计算得到的相位值 $\varphi(x, y)$ 对 $\text{bmod}2\pi[\varphi(x, y)]$ 取模,并将量化后的相位映射为 M 个离散灰度等级,据此绘制全息图。

1.4 计算全息干涉图

为记录物光场 $\tilde{U}(x, y) = A(x, y) \exp[j\varphi(x, y)]$, 可

将其与参考光 $\tilde{R}(x, y) = R \exp(j2\pi\alpha x)$ 进行干涉。根据式(9),全息图透过率 $h(x, y)$ 的最大值出现在满足条件:

$$\varphi(x, y) - 2\pi\alpha x = 2n\pi \quad (17)$$

而 $h(x, y)$ 的最小值出现在:

$$\varphi(x, y) - 2\pi\alpha x = 2(n + 1/2)\pi \quad (18)$$

其中 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。结合全息图的振幅透射系数的公式,可将计算机干涉全息图函数表示为:

$$H(x, y) = \begin{cases} 1, \cos[\varphi(x, y) - 2\pi\alpha x] \geq \cos\pi q(x, y) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $q(x, y) = \arcsin[A(x, y)]/\pi$, 振幅 $A(x, y)$ 取归一化值。

由该全息图函数可直接推导出亮纹位置,即 $H(x, y)$ 取值从 0 跃变至 1 时所对应的坐标满足:

$$\cos[\varphi(x, y) - 2\pi\alpha x] = \cos[\pi q(x, y)] \quad (20)$$

即 $\varphi(x, y) - 2\pi\alpha x = 2n\pi \pm \pi q(x, y)$ 。

其中 n 表示亮纹的序号, α 为载波的空间频率。式中“-”号对应 $H(x, y)$ 由 0 跃变为 1 的前沿方程,“+”号对应由 1 跃变为 0 的后沿方程。通过求解不同 n 值所对应的各级亮纹坐标,即可绘制出由一系列宽度变化的亮纹所构成的干涉型二元计算机全息图。

2 图像质量评价

PSNR 能够有效刻画噪声引起的信号失真,SSIM 则侧重于感知结构保持,两者结合可全面评估全息再现像在噪声干扰下的质量退化规律。

PSNR 基于均方误差 (mean squared error, MSE), 通过量化原始图像与再现像之间的像素级差异,反映全局层面的失真程度,其计算公式为:

$$PSNR = 10 \cdot \lg\left(\frac{MAX^2}{MSE}\right) \quad (21)$$

式中: MAX 表示图像最大像素值 (如 8 位图像为 255)。PSNR 值越高,表明再现像的保真度越好。

SSIM 则从人眼视觉特性出发,从亮度、对比度和结构三个维度评估图像相似性:

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (22)$$

式中: μ_x, μ_y 为图像局部窗口的均值 (亮度表征); σ_x^2, σ_y^2 为局部窗口的方差 (对比度表征); σ_{xy} 为协方差 (结构相似性); 引入稳定常数 C_1, C_2 是避免分母为 0, 其取值与动态范围相关。SSIM 的 $[0, 1]$ 归一化区间有效刻画全息再现像的纹理保留度与视觉自然性。

3 计算全息图验证

3.1 罗曼 III 型迂回相型计算全息图

罗曼 III 型迂回相型计算全息图过程如下。

1) 读取一张物图像。物是一个汉字“光”, 大小为 512×512 pixels, 为了能够在 PC 上用 MATLAB 快速计算, 将大小调整到了 64×64 pixels。

2) 注入高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN), 其强度由系数 ef_1 控制。 ef_1 是随机相位噪声的强度控制器, 其值越大, 引入的相位扰动越强, 频谱能量越分散, 噪声强度越高。阈值噪声系数为 $ef_2 = 1.5$, 它是一个控制频谱振幅裁剪阈值的系数, 用于在处理频谱的振幅时, 设定一个上限, 将过高的振幅值限制在此阈值内。为了降低频谱的动态范围, 设置噪声系数 ef_1 可变, 通光孔宽度 w 也是可变的。

3) 对物光场进行傅里叶变换, 得到其频谱。对频谱的振幅进行阈值限幅 (由参数 ef_2 控制) 和量化, 对相位进行归一化和量化。

4) 将生成的抽样单元放到计算全息图中, 迂回位相编码结果。为了方便模拟计算, 计算全息图每个单元划分 $s \times s$ pixels, 通光孔径的宽度 w 设置为 $s/2$, 所以得到的罗曼 III 型迂回相型计算全息图大小为 $(64 \times s) \times (64 \times s)$ pixels。

当通光孔的宽度 $w = 6$, 阈值系数 $ef_2 = 1.5$, 噪声系数 ef_1 从 0.0~1.0。图 3 和 4 所示分别是不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下的罗曼 III 型迂回相位计算全息图和再现像。

观察图 3 可知, 可以看到 ef_1 改变全息图的微观结构。 $ef_1 = 0.0$ 时, 全息图纹理非常简单, 主要由大的亮暗块组成。这是因为没有随机相位, 物的频谱能量高度集中在低频 (中央区域), 量化后只有中心少数几个单元有较高的值, 边缘单元多为 0; ef_1 增大 ($ef_1 = 0.2 \sim 0.6$) 时, 全息图的纹理变得越来越复杂、精细和均匀。随机相位将物的信息开始扩散, 使得更多编码单元承载了信息, 这

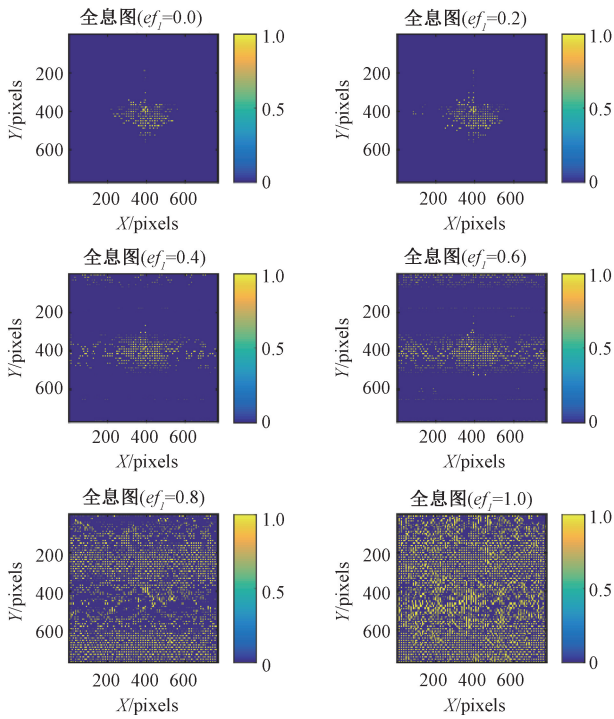


图 3 不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下的
罗曼 III 型迂回相位计算全息图

Fig. 3 Lohmann Type III detour-phase CGHs under varying
Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)

是因为引入适度的随机相位后,物光场的对称性被打破,频谱的振幅和相位分布变得更加均匀和随机;随着 ef_1 继续增大,全息图的随机颗粒感进一步加强。 $ef_1 = 1.0$ 时,全息图看起来几乎像是一片均匀的、高频的散斑噪声,这主要是因为过强的随机相位噪声完全淹没了原始图像的结构信息。

观察图 4 可知, $ef_1 = 0.0$ 时,此时随机相位噪声为 0,物光场是纯实数的(图像本身),其傅里叶频谱具有很高的对称性,这将导致再现时会产生一个强烈的共轭像和零级衍射斑,它们会与原始像发生严重干扰; $ef_1 = 0.2 \sim 0.4$ 时,引入少量随机相位噪声,这破坏了物光场的对称性,有效地抑制了共轭像,同时噪声将原图像的信息扩散到了整个频谱面上,使得全息图编码的信息更均匀,零级斑和共轭像的强度显著降低,原始图像的轮廓和细节变得清晰可见 ($ef_1 = 0.4$); $ef_1 = 0.6 \sim 1.0$ 时,随机相位噪声过大。虽然共轭像被完全抑制,但过度的相位调制严重扭曲了物光波前的信息。再现像质量开始下降,图像变得模糊,细节丢失,并逐渐呈现出类似散斑噪声的颗粒状纹理。随着 ef_1 增大至 1.0,再现像几乎退化为一团散斑,只能隐约看到图像的最基本轮廓,信噪比变得极低。

观察图 5 可知,从 $ef_1 = 0.1$ 时的 18.2 dB 下降到 $ef_1 = 1.0$ 时的 11.59 dB。下降曲线并非完全线性,在噪声系

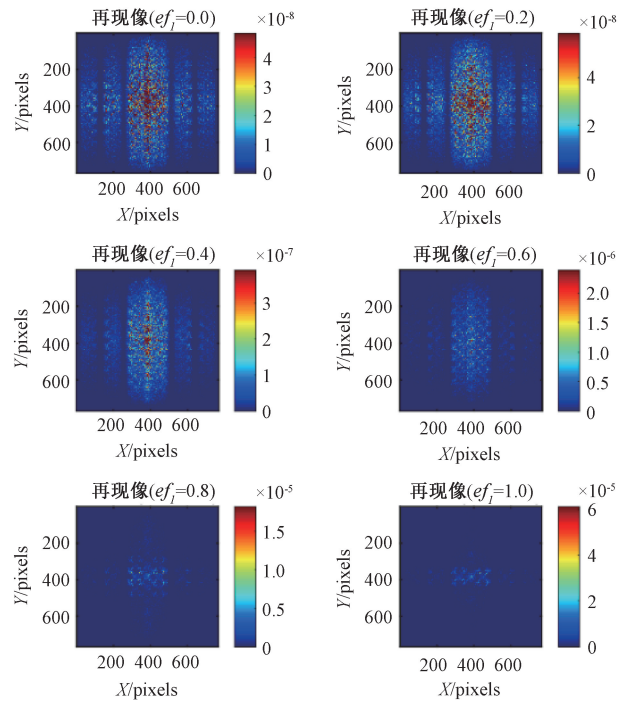
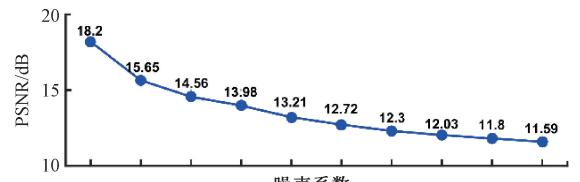
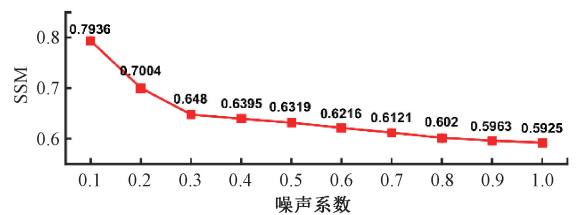


图 4 不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下的
罗曼 III 型迂回相位再现像

Fig. 4 Lohmann Type III detour-phase reconstructed images
under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)



(a) PSNR 随噪声系数的变化
(a) Variation of PSNR with noise coefficient



(b) SSIM 随噪声系数的变化
(b) Variation of SSIM with noise coefficient

图 5 不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下罗曼
III 型再现像的 PSNR 与 SSIM 值

Fig. 5 PSNR and SSIM values of Lohmann Type III
reconstructed images under varying Gaussian
noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)

数较小 ($0.1 \sim 0.3$) 时, PSNR 下降速度较快; 当噪声系数较大 (> 0.4) 时, PSNR 的下降趋势逐渐变缓, 趋于一个较低的值。这表明初始引入噪声对信噪比的破坏效应非常

显著,而当噪声已经很强时,再增加噪声对 PSNR 的边际影响会减小。

SSIM 从 0.793 6 下降到 0.592 5。与 PSNR 类似,也是持续下降。SSIM 的值始终高于 0.5,表明即使在最大噪声下,图像的整体结构信息仍然在一定程度上得以保留,但质量已经严重下降。从数值上看, $ef_1 = 0.3$ 之后,SSIM 的值就降到了 0.65 以下,说明图像质量在此之后已经处于一个较差的水平。

罗曼 III 型再现像对随机相位噪声高度敏感,即使是较小噪声系数(0.1~0.2)也会导致明显的质量下降。

当噪声系数 $ef_1 = 0.8$, 阈值系数 $ef_2 = 1.5$, 透光孔的宽度 w 在 4~12 变化。

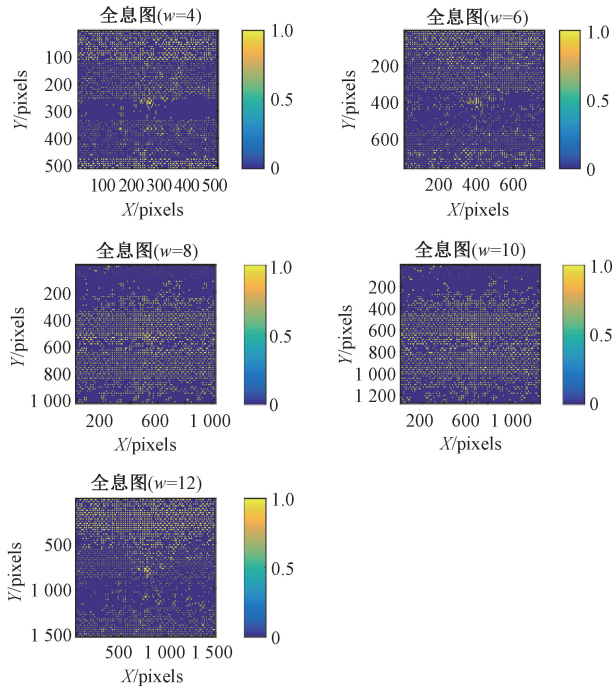


图 6 不同孔径宽度 ($w = 4 \sim 12$) 下的罗曼 III 型迂回相位计算全息图

Fig. 6 Lohmann Type III detour-phase CGHs under varying aperture widths w ($w = 4 \sim 12$)

观察图 6 可知,随着 w 增大,每个编码单元占用的像素数急剧增加。这使得全息图的总尺寸变得非常大。

w 较小(如 $w = 4, 6$)时,全息图纹理看起来简单、粗糙,包含更多较大的块状结构; w 较大(如 $w = 8, 10$)时,全息图纹理更复杂、更精细,更接近连续调制的光栅; $w = 12$ 时,细节开始模糊,图像出现平滑效应,分辨率下降。

观察图 7 可知, $w = 4$ (最小孔径)时,再现像呈现明显的柱状结构。显示较高且清晰,图像细节较为突出,轮廓分明; $w = 6$ 时,柱状结构开始变得不那么明显。图像细节有所减少,开始出现平滑效果,对比度略有下降; $w = 8$ 时,柱状结构进一步减弱,几乎不可见,对比度进一步下

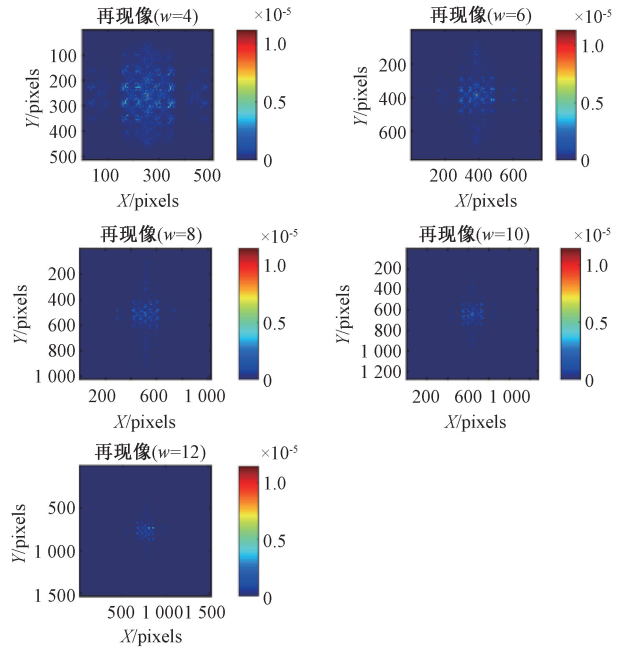
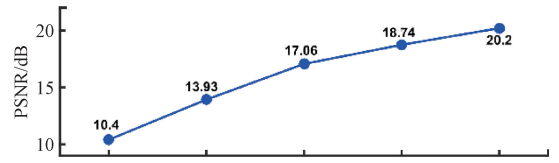


图 7 不同孔径宽度 ($w = 4 \sim 12$) 下的罗曼 III 型迂回相位再现像

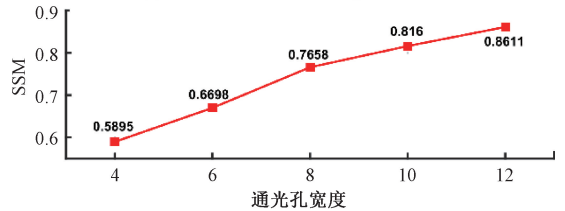
Fig. 7 Lohmann Type III detour-phase reconstructed images under varying aperture widths w ($w = 4 \sim 12$)

降,图像变得更加模糊; $w = 10$ 时,柱状结构完全消失,图像细节严重损失,出现明显的模糊效应,对比度低,整体图像质量较差; $w = 12$ (最大孔径)时,图像变得极其模糊,几乎无法辨认原始内容,细节完全丢失,对比度极低,图像质量最差。



(a) PSNR随透光孔宽度的变化

(a) Variation of PSNR with aperture width



(b) SSIM随透光孔宽度的变化

(b) Variation of SSIM with aperture width

图 8 不同孔径宽度 ($w = 4 \sim 12$) 下罗曼 III 型全息图的 PSNR 与 SSIM 值

Fig. 8 PSNR and SSIM values for Lohmann Type III hologram under varying aperture widths ($w = 4 \sim 12$)

观察图 8 可知,PSNR 和 SSIM 两个指标都随着透光

孔宽度的增加而单调递增。这表明增大通光孔宽度 w 可以显著提高再现像的质量。

PSNR 从 $w=4$ 时的 10.4 dB 大幅提升到 $w=12$ 时的 20.2 dB, 提升幅度近 10 dB。 w 从 4~8, PSNR 的提升幅度(约 6.66 dB)要大于 w 从 8 到 12 的提升幅度(约 3.14 dB)。这表明存在收益递减效应, 初期增加 w 的效益非常高, 后期虽然仍在提升, 但边际效益有所下降。

SSIM 从 $w=4$ 时的 0.589 5 提升到 $w=12$ 时的 0.861 1。与 PSNR 类似, SSIM 的增长也呈现出收益递减的趋势。 w 从 4 到 8, SSIM 增加了 0.176 3; 而 w 从 8 到 12, SSIM 增加了 0.095 3。

通光孔宽度 w 是显著影响罗曼 III 型全息图再现质量的关键参数。更大的 w 意味着每个编码单元的尺寸更大, 这提供了更多的像素来描绘每个单元内的小光栅, 使得对光波的调制更加精确和灵活。

3.2 修正型离轴参考光计算全息图

为得到博奇型离轴参考光计算全息图, 并仿真傅里叶变换全息图的记录与再现过程, 其核心在于利用余弦光栅调制同时编码物光波的振幅与相位信息。

步骤 1) 物光输入, 读入模拟物光场的图像。

步骤 2) 傅里叶变换, 对物光场进行单次快速傅里叶变换 (single-fast Fourier transform, S-FFT), 获取其频谱分布。

步骤 3) 离轴干涉, 将频谱与一束倾斜入射的参考光进行干涉。

步骤 4) 博奇编码, 对干涉图采用博奇法进行编码, 生成计算全息图。

步骤 5) 再现重建, 对该全息图实施逆傅里叶变换, 重构再现光场, 得到再现像。

1) 博奇法修正型离轴参考光计算全息图

观察图 9 可知, $ef_1=0.0$ 时, 由于没有随机相位, 物的频谱振幅高度不均匀 (能量集中在低频), 导致全息图中大部分区域是低对比度的灰度, 只有高频区域 (中间) 有清晰的物体信息。 ef_1 增大 (0.2~1.0) 时, 全息图的纹理发生显著变化。随机相位使物的信息扩散, 频谱振幅变得均匀。这将导致全息图整体的条纹对比度提高, 纹理变得更加精细、复杂和均匀, 看起来更像噪声全息图。将信号能量从频谱中心分散到整个频域, 减少了零级衍射斑的强度。

观察图 10 可知, $ef_1=0.0$ (无随机相位) 时, 再现像质量较差, 存在严重的共轭像和零级斑干扰, 原始图像显示模糊, 周围环绕对称噪声; $ef_1=0.2$ (低噪声水平) 时, 再现像质量初步得到改善, 干扰项开始被抑制; $ef_1=0.4$ 时, 图像质量进一步提升, 细节开始显现, 共轭像干扰基本被消除, 零级斑进一步减弱, 图像清晰度和对比度明显改善; $ef_1=0.6$ (最佳范围) 时, 达到最佳再现质量, 图像清晰

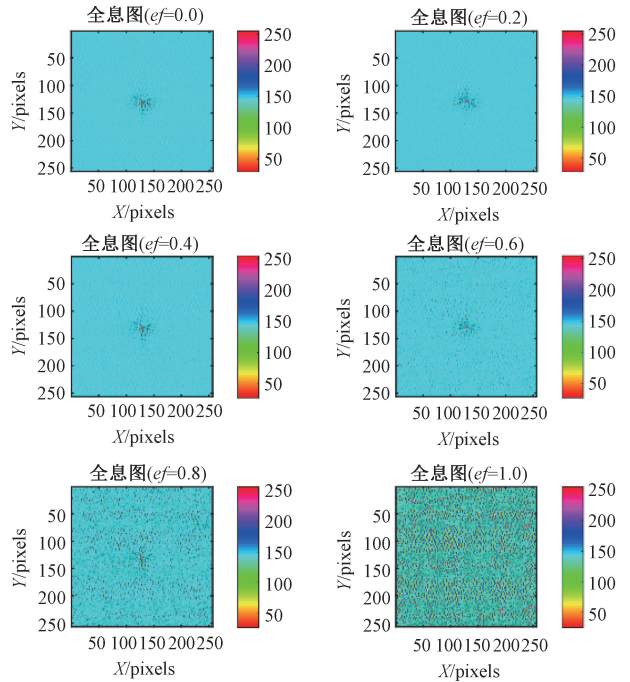


图 9 不同高斯噪声系数 ($ef_1=0.0\sim 1.0$) 下的博奇法计算全息图

Fig. 9 Burch method CGHs under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1=0.0\sim 1.0$)

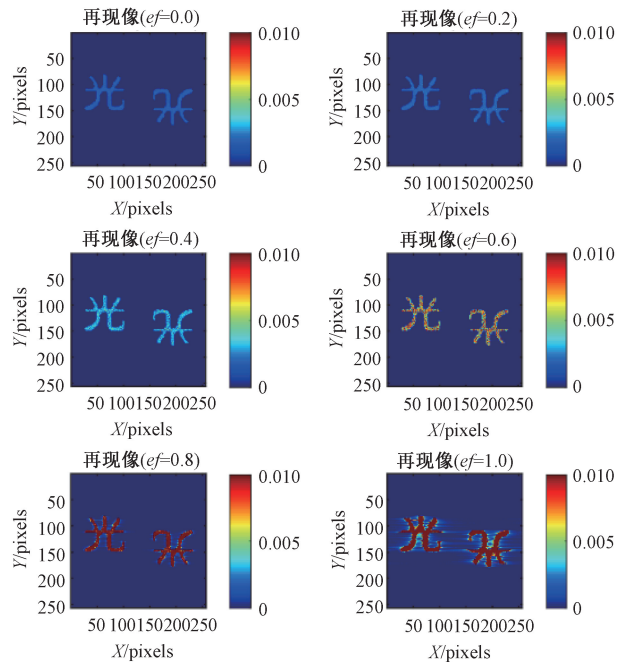
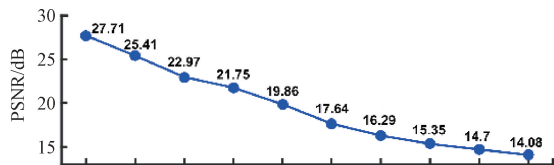


图 10 不同高斯噪声系数 ($ef_1=0.0\sim 1.0$) 下的博奇法再现像

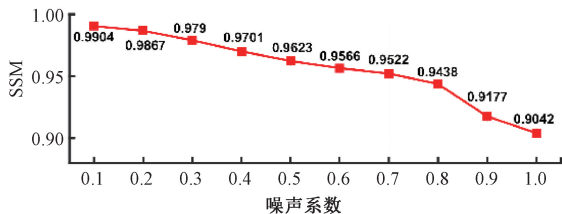
Fig. 10 Burch method reconstructed images under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1=0.0\sim 1.0$)

度高, 细节保持良好, 噪声控制在合理范围, 原始图像特征清晰可辨, 质量显著提升; $ef_1=0.8$ 时, 图像质量仍然较好, 但与 $ef_1=0.6$ 相比略有下降, 开始出现轻微散斑噪

声,细节略有损失,整体仍保持较好的可辨识度; $ef_1 = 1.0$ (高噪声水平)时,图像质量明显下降,散斑噪声增加,细节变得模糊,对比度降低,过度随机化导致信号能量分散。



(a) PSNR随噪声系数的变化
(a) Variation of PSNR with noise coefficient



(b) SSIM随噪声系数的变化
(b) Variation of SSIM with noise coefficient

图 11 不同高斯噪声系数($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)下博奇法再现像的 PSNR 与 SSIM 值

Fig. 11 PSNR and SSIM values of Burch-method-reconstructed images under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)

观察图 11 可知,PSNR 的下降呈现明显的非线性特征。通过观察数据,当噪声系数从 0.1 增加到 0.5 时,PSNR 从 27.71 dB 下降到 19.86 dB (下降约 7.85 dB),而从 0.5 增加到 1.0 时,仅下降约 5.78 dB。这表明在低噪声区域,PSNR 对噪声更加敏感,衰减速率更快。

SSIM 值在噪声系数小于 0.6 时保持较高水平 (>0.95),此后开始显著下降。特别值得注意的是,在噪声系数 0.8~0.9 之间出现了一个明显的下降拐点(从 0.9438 降至 0.9177),这表明系统存在某个临界噪声阈值,超过此阈值后图像结构信息开始快速退化。

PSNR 在整个噪声范围内呈现相对均匀的下降趋势,而 SSIM 在低噪声区域保持稳定,在高噪声区域下降更为明显。这表明 SSIM 对高噪声环境下的结构失真更为敏感,而 PSNR 对低噪声情况下的细微变化反应更明显。PSNR 值从 27.71 dB 下降到 14.08 dB,对应图像质量从良好降至勉强可接受水平;SSIM 从 0.9904 降至 0.9042,仍保持在 0.9 以上,表明即使在高噪声情况下,图像的主要结构信息仍得以保留,这体现了博奇编码算法的鲁棒性。

2) 李氏编码连续灰阶计算全息图

(1) 输入与初始化,读取原始图像,并归一化到 $[0, 1]$ 区间。

(2) 参数扫描,循环不同的 ef_1 值(从 0 到 1)。

(3) 全息图生成。相位调制:用随机相位对原始图像进行调制;傅里叶变换:计算光波传播到全息图平面的复振幅分布;李氏编码:按照上述规则,将每个复数值编码到一个 2×2 pixels 中,生成最终的计算全息图。

(4) 图像再现,对计算得到的计算全息图进行逆傅里叶变换。在光学系统中,这相当于用一束相干光照射全息图,其衍射光场在像平面会重建出原始图像。

(5) 计算光强,计算再现光场的强度分布,就是再现像。

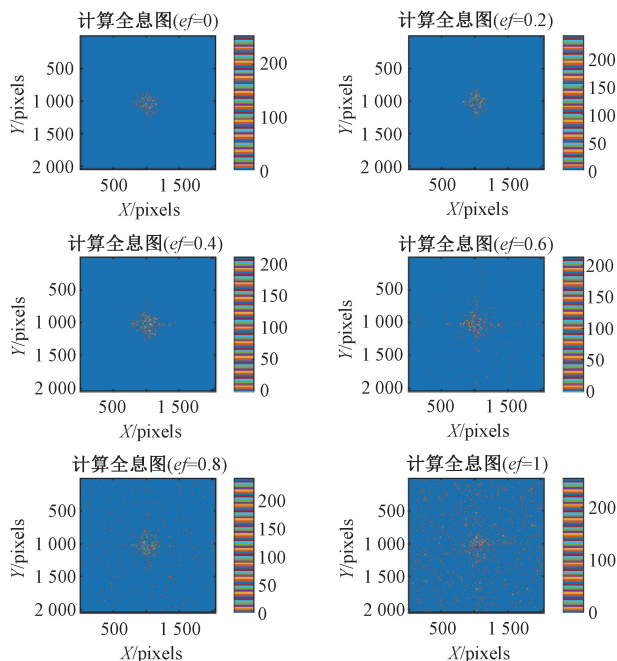


图 12 不同高斯噪声系数($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)下的李氏编码连续灰阶计算全息图

Fig. 12 Lee-encoded continuous grayscale CGHs under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)

观察图 12 可知, $ef_1 = 0.0$ (无随机相位)时,中间有块状结构,表明频谱能量高度集中在中心区域; $ef_1 = 0.2 \sim 0.4$ (低到中等噪声)时,块状结构开始向四周分散,全息图开始呈现复杂的结构特征; $ef_1 = 0.6 \sim 0.8$ (中等噪声水平)时,分散程度进一步增加,结构更加均匀,达到了较好的能量分布平衡,全息图的信息承载能力最大化; $ef_1 = 1.0$ (高噪声水平)时,分散已经很均匀,能量完全分散到整个全息图平面,虽然均匀性好,但因过度分散导致信号能量损失,全息图呈现高度随机化的特征。

观察图 13 可知, $ef_1 = 0.0$ (无随机相位)时,再现像显示满屏的“光”字,整体亮度较高且分布均匀,图像比较清晰,但存在共轭像干扰,全息图保留了较多的原始图像能量; $ef_1 = 0.2 \sim 0.4$ (低到中等噪声)时,“光”字开始变得

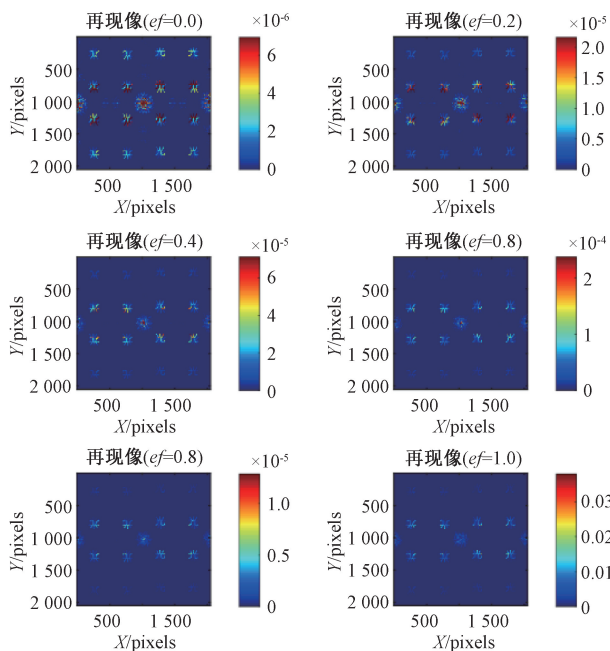


图 13 不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下的李氏编码连续灰阶再现像

Fig. 13 Lee-encoded continuous grayscale reconstructed images under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)

集中,亮度逐渐降低,图像从满屏分布向中心区域收缩,噪声开始发挥抑制干扰项的作用; $ef_1 = 0.6 \sim 1.0$ (中到高噪声)时,“光”字亮度明显变暗,数量减少,图像主要集中在中间横向显示,过度噪声导致信号能量分散,再现像质量下降。

随着噪声增加,频谱能量逐渐向中心区域集中,这种频谱变化直接导致了再现像的空间分布变化。

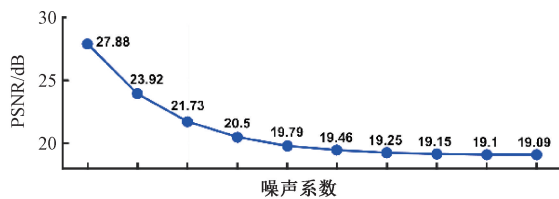
观察图 14 可知,PSNR 和 SSIM 都显示噪声系数增加会导致图像质量下降,但下降速率不同。噪声系数在 $0.1 \sim 0.4$ 区间内,PSNR 和 SSIM 下降最为明显,PSNR 从 27.88 dB 降至 20.5 dB (下降 7.38 dB),SSIM 从 0.974 9 降至 0.929 2 (下降 0.045 7);噪声系数超过 0.5 后,两种指标变化趋于平缓,PSNR 在 19.09 ~ 19.79 dB 之间窄幅波动,SSIM 在 0.921 6 ~ 0.925 3 之间微小变化。

SSIM 始终保持在 0.92 以上,表明即使在高噪声环境下,李氏编码仍能有效保持图像的结构信息。PSNR 在 0.5 后趋于稳定,说明编码方案在噪声达到一定水平后能够有效分布能量,减少进一步恶化。

3) 李氏编码二元计算全息图

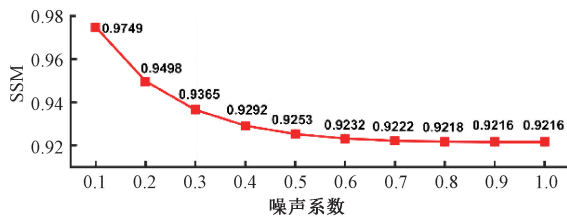
(1) 读取原始图像,将其像素值从 $[0, 255]$ 归一化到 $[0, 1]$ 区间,得到物光波场的振幅分布。

(2) 物光波调制 (引入随机相位),将物光波与随机相位因子相乘,得到一个复振幅的物光波场。这相当于



(a) PSNR 随噪声系数的变化

(a) Variation of PSNR with noise coefficient



(b) SSIM 随噪声系数的变化

(b) Variation of SSIM with noise coefficient

图 14 不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下李氏编码连续灰阶再现像的 PSNR 与 SSIM 值

Fig. 14 PSNR and SSIM values of Lee-encoded continuous grayscale reconstructed images under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)

用一个相位型散斑场来照亮物体。

(3) 计算傅里叶变换 (模拟光波传播),对调制后的复振幅物光波进行二维快速傅里叶变换。将零频分量移动到频谱中心,得到全息面的复振幅分布。

(4) 李氏编码 (将复信息转换为二元全息图),它将全息面上每一个复数值编码成一个 4×4 的二元像素块 (每个像素非 0 即 1)。

(5) 计算再现像 (模拟光学再现),对生成的二元计算全息图进行逆傅里叶变换,得到再现光场的复振幅。计算再现光场的强度分布,这就是再现像。

观察图 15 可知, $ef_1 = 0.0$ (无随机相位) 时,显示“带状的亮纹”,即明显的周期性条纹结构,亮纹分布相对均匀,间距较大,全息图呈现规则的模式,反映了无噪声时的对称频谱特性; $ef_1 = 0.2$ 时,亮纹开始出现变化,周期性结构被部分打破,条纹间距开始减小,分布开始向中心区域集中,随机相位开始影响全息图结构; $ef_1 = 0.4$ 时,亮纹间距明显变小,向中间集中趋势加剧,周期性特征进一步减弱,随机性增强,全息图结构发生显著变化; $ef_1 = 0.6 \sim 1.0$ 时,亮纹更加密集,主要集中在中心区域,条纹间距持续减小,分布范围收缩,全息图呈现高度集中的特征。

亮纹间距与频谱的空间频率分布相关,频谱能量向中心集中导致全息图的空间频率增加,这表现为亮纹间距的减小和密度的增加。

观察图 16 可知, $ef_1 = 0.0$ (无随机相位) 时,满屏的“光”字但不清晰,表明存在严重的共轭像和零级衍射干

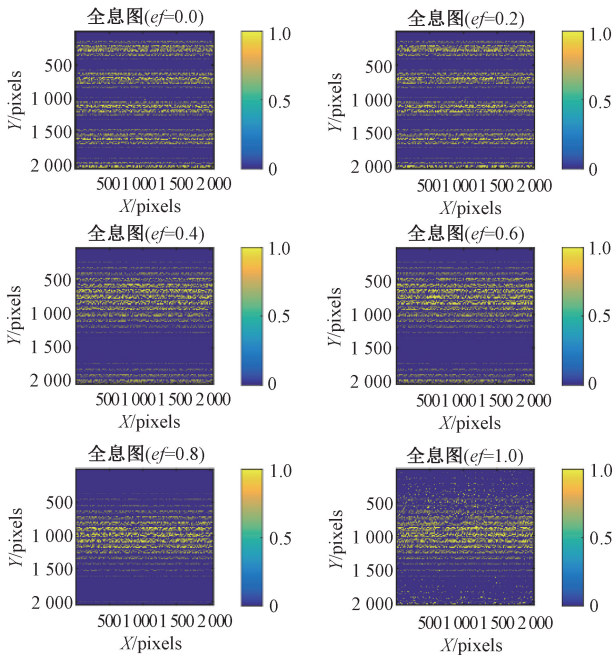


图 15 不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下的李氏编码二元计算全息图(局部)

Fig. 15 Lee-encoded binary CGHs under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) (Part)

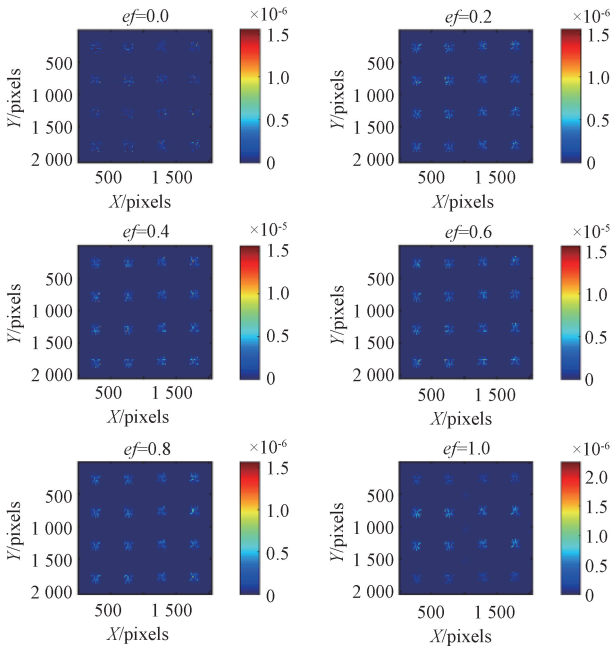
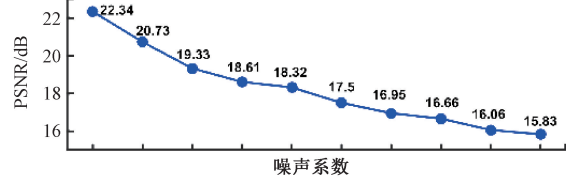


图 16 不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下的李氏编码二元再现像

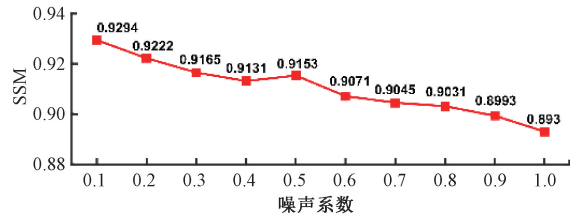
Fig. 16 Lee-encoded binary reconstructed images under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)

字变亮且清晰,达到最佳噪声水平,有效分离原始像和共轭像; $ef_1 = 0.8 \sim 1.0$ 时,亮度变暗,过度噪声导致信号能量分散,能量向中心集中,随机相位过度使频谱能量收缩,再现像范围缩小。



(a) PSNR随噪声系数的变化

(a) Variation of PSNR with noise coefficient



(b) SSIM随噪声系数的变化

(b) Variation of SSIM with noise coefficient

图 17 不同高斯噪声系数 ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$) 下李氏编码二元再现像的 PSNR 与 SSIM 值

Fig. 17 PSNR and SSIM values of Lee-encoded binary reconstructed images under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0 \sim 1.0$)

观察图 17 可知,PSNR 数据呈现明显的单调递减趋势。从噪声系数 0.1 到 1.0,PSNR 从 22.34 dB 下降至 15.83 dB,总体下降幅度达 6.51 dB。下降速率:初始阶段(0.1~0.3)下降较快(3.01 dB),后期(0.7~1.0)下降趋缓(1.12 dB)。噪声系数 0.4~0.5 区间,PSNR 下降放缓,表明此区间可能存在相对稳定的质量平台。当噪声系数超过 0.6 后,PSNR 基本稳定在 16~17 dB 范围内,说明系统对高噪声水平具有一定的鲁棒性。

SSIM 变化相对平缓但同样呈现下降趋势:从 0.929 4 下降到 0.893,总体下降幅度为 0.036 4。在噪声系数 0.4~0.5 处出现轻微反弹(0.913 1→0.915 3);即使在高噪声系数(1.0)下,SSIM 仍保持在 0.893 的高水平。SSIM 值始终高于 0.89,表明即使在高噪声环境下,图像的结构信息保持良好。0.4~0.5 区间的轻微反弹可能表明此噪声水平对某些图像特征有轻微增强作用。

3.3 相息图

1) 图像预处理阶段

将输入图像统一调整为 256×256 pixels,确保后续处理的尺寸一致性。

2) 随机相位调制与傅里叶变换

随机相位引入:生成 $[-\pi \times ef_1, \pi \times ef_1]$ 范围内的随机相位, ef_1 控制相位调制强度;物光波调制:将原始图像与

扰; $ef_1 = 0.2 \sim 0.4$ 时,图像质量开始改善,随机相位开始破坏对称性,抑制共轭像干扰; $ef_1 = 0.6$ (最佳效果)时,光

随机相位因子相乘,形成复数形式的物光波;傅里叶变换:计算调制后物光波的傅里叶频谱,得到全息平面的复振幅分布。

3) 相位信息提取与量化

相位提取:从复振幅中提取相位信息,忽略振幅信息;相位包裹:对相位进行 2π 取模操作,将相位值限制在 $[0, 2\pi]$ 范围内;灰度量化:将连续相位值量化为 $0\sim 255$ 的整数,生成可用于显示的灰度全息图。

4) 全息图再现过程

相位恢复:将量化后的灰度值转换回相位值;逆变换重建:对纯相位全息图进行逆傅里叶变换,重建原始光场;强度计算:通过计算光强分布,得到可视化的再现像。

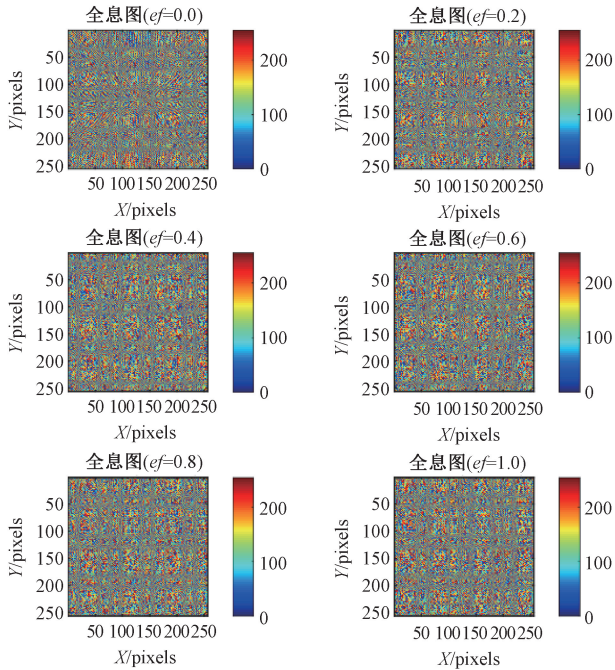


图 18 不同高斯噪声系数($ef_1 = 0.0\sim 1.0$)下的相息图(局部)
Fig. 18 Kinoform CGHs under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0\sim 1.0$) (Part)

观察图 18 可知, $ef_1 = 0.0$ 时,全息图呈现明显的规则结构,这是没有随机相位调制的结果,傅里叶相位分布直接反映了原始图像的特征; $ef_1 = 0.2$ 时,开始出现随机性,但仍有部分规则结构可见; $ef_1 = 0.4\sim 0.6$ 时,全息图逐渐变得噪声化,随机性增强,这是随机相位调制起主导作用的表现; $ef_1 = 0.8\sim 1.0$ 时,全息图完全呈现噪声外观,随机相位完全主导了相位分布。

观察图 19 可知, $ef_1 = 0.0$ (无随机相位)时,中间显示一个空心的“光”字,表明存在明显的零级衍射斑和共轭像干扰,空心结构反映了相位信息的缺失或不完整编码,能量分布不均匀,中心区域能量较低; $ef_1 = 0.2\sim 0.4$ 时,“光”字中被填充,随机相位开始有效工作,改善了相位

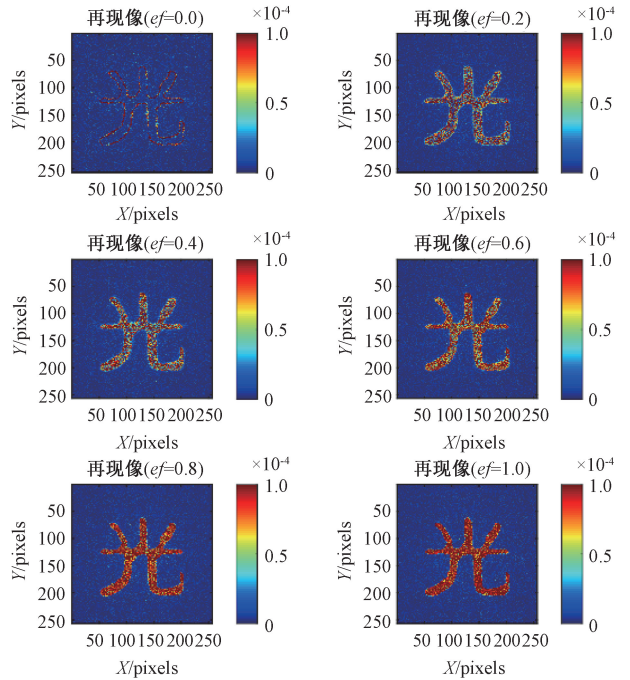
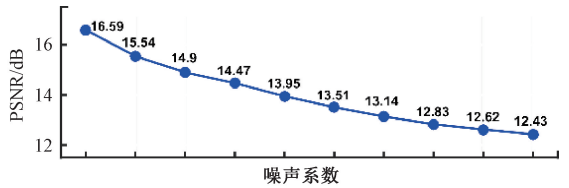
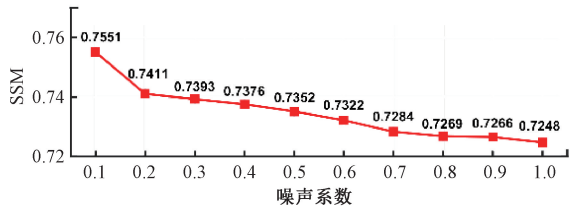


图 19 不同高斯噪声系数($ef_1 = 0.0\sim 1.0$)下的相息图再现像
Fig. 19 Kinoform reconstructed images under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0\sim 1.0$)

编码,干扰项被部分抑制,信号能量更加集中,图像质量明显改善,细节开始显现; $ef_1 = 0.6$ (最佳效果区间),“光”字颜色变亮越来越深,达到最佳噪声水平,再现像质量最优,信号能量充分表达,对比度提高,共轭像干扰被有效抑制,像质清晰; $ef_1 = 0.8\sim 1.0$ 时,出现过优化现象,图像质量开始下降,过度噪声导致新的伪影。



(a) PSNR随噪声系数的变化
(a) Variation of PSNR with noise coefficient



(b) SSIM随噪声系数的变化
(b) Variation of SSIM with noise coefficient

图 20 不同高斯噪声系数($ef_1 = 0.0\sim 1.0$)下相息图再现像的 PSNR 与 SSIM 值
Fig. 20 PSNR and SSIM values of Kinoform reconstructed images under varying Gaussian noise coefficients ($ef_1 = 0.0\sim 1.0$)

观察图 20 可知, PSNR 从 16.59 dB ($ef_1 = 0.1$) 下降到 12.43 dB ($ef_1 = 1.0$), 总体下降 4.16 dB。近似线性下降, 下降速率相对均匀。所有 12.43~16.59 dB 之间, 明显低于一般图像处理系统的可接受阈值(通常 >20 dB)。噪声系数从 0.1 增加到 0.3 时, PSNR 下降 1.69 dB, 降幅最大。噪声系数超过 0.7 后, PSNR 下降趋缓, 稳定在 12~13 dB 范围内。SSIM 数据展现出不同的特征, 从 0.755 1 下降到 0.724 8, 仅下降 0.030 3。即使在最高噪声水平下, SSIM 仍保持在 0.724 8; 近似线性但斜率很小, 表明结构信息保持相对完好。SSIM 值始终低于 0.76, 表明整体结构相似性不高。

3.4 计算干涉全息图

用仿真菲涅尔全息图的记录和再现来完成计算干涉全息图的实验。此时选用波长 $\lambda = 632.8$ nm 的 He-Ne 激光, 物距为 0.308 6 m; 再现距离为 0.308 6 m (与物距相同); 物面尺寸为 5 mm × 5 mm。参考光角度 ($\alpha = \pi/2.025$); 算法选择三次傅里叶变换 (triple-fast Fourier transform, T-FFT), 需两次正傅里叶变换和一次逆傅里叶变换用于光场传播计算。然后完成衍射(物)光场计算、绘制参考光与物光场干涉得到干涉图(连续型 CGH)、干涉图二值化得到计算干涉全息图(二值化 CGH), 以及用再现光照明二值化 CGH 得到再现光场。

全息图类型包括连续型全息图, 用于记录完整的干涉强度分布; 二值化全息图, 通过阈值处理得到的二元全息图。

实验步骤如下。

1) 光场传播计算(T-FFT 算法)。计算角谱传播的相位因子; 对物光场和相位因子分别进行傅里叶变换; 在频域相乘实现卷积运算; 逆傅里叶变换得到全息面的光场分布。

2) 干涉全息图生成。物光波与参考光波干涉, 记录干涉条纹的强度分布。

3) 二值化处理。通过特殊处理后将全息图二值化, 便于某些类型的空间光调制器使用。

4) 再现过程 S-FFT, 用球面波相位因子乘以全息图, 然后进行傅里叶变换实现衍射计算。

图 21(a) 为原始图像。作为质量评估的基准; 图 21(b) 为连续型全息图。显示清晰的干涉条纹图案。高频条纹携带物体相位信息, 低频区域对应物体的低频成分; 条纹对比度变化反映物体振幅分布; 图 21(c) 为二值化全息图。虽然量化损失严重, 但仍保留了干涉条纹的基本结构。图 21(d) 为连续型计算全息图再现像。再现像质量较高, 能清晰识别原始图像内容, 存在少量散斑噪声和背景噪声, 由于离轴参考光设计, 零级像与原始像分离良好。图 21(e) 为二值化计算全息图再现像。明显低于连续型, 但基本特征仍可辨认, 较强的散斑噪声和量化噪

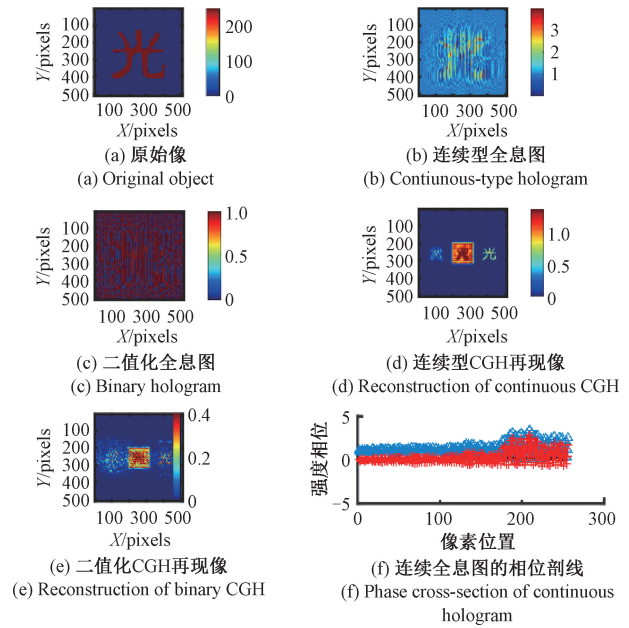


图 21 菲涅尔域计算干涉全息图的合成与再现
Fig. 21 The synthesis and reconstruction of computer-generated interferometric hologram in Fresnel domain

声。图 21(f) 为连续型全息图的相位剖面。干涉图曲线(三角)反映干涉条纹的强度变化; 相位曲线(中间接近于 0 的曲线)反映物体的相位分布; 处理后曲线(十字)反映二值化处理前的中间结果。

仿真结果表明, T-FFT 算法成功模拟了光场传播过程, S-FFT 算法有效实现了全息图再现, 再现像与原始图像的相似性验证了算法的正确性。连续型全息图的优势: 高质量再现, 细节保持良好, 噪声水平相对较低; 二值化全息图的特点: 存储需求低, 尽管质量下降, 但仍保持基本识别能力。干涉型全息图能够高质量地记录和重建物体信息, 而二值化处理虽然引入噪声和信息损失, 但仍保持了基本的重建能力。

4 结论

本文通过系统对比迂回相型(罗曼 III 型)、修正型离轴参考光(博奇法及李氏编码)、相息图及计算干涉全息图 4 类典型计算全息编码算法, 结合 PSNR 与 SSIM 双指标量化评价体系, 探究了噪声系数对再现像质量的影响规律, 得出如下结论。

1) 噪声系数与再现像质量存在明显的关联性。PSNR 值普遍随噪声系数增大呈下降趋势, 且在低噪声区间 ($ef_1 \leq 0.3$) 下降较为显著, 如罗曼 III 型全息图的 PSNR 在 ef_1 为 0.1~0.3 区间内下降幅度较为明显。在高噪声区间 ($ef \geq 0.5$), PSNR 下降速率趋缓, 一定程度上反映了不同编码方法对高强度噪声的响应趋于稳定。

SSIM 指标整体表现出更强的稳定性,特别是在修正型离轴参考光编码中,即使在高噪声条件下($ef_1 = 1.0$)仍能维持相对较高的值(如博奇法 SSIM>0.90),说明此类方法在保留图像结构信息方面具有一定优势。

2) 编码策略的优化对提升抗噪性能具有积极作用。例如,李氏编码通过正交分量分解与多级灰度量化分散噪声能量,在 $ef_1 = 1.0$ 时 PSNR 仍可保持在 19 dB 左右;罗曼 III 型编码中增大通光孔宽度,可显著改善再现质量,表明通过物理或算法参数的调整能够有效抑制噪声引起的失真。

3) 从全息图类型来看,连续型全息图(如博奇法、干涉全息连续型)在再现像清晰度和细节保持方面普遍优于二值化全息图,但其抗噪能力和系统鲁棒性在不同编码方法间存在差异。二值化方法虽引入较大量化误差,但在特定应用场景中仍具备实用价值。

本文结果表明,在实际应用中应综合考虑噪声环境、系统约束与应用需求选择编码方案。在低噪声环境下,多数编码方法可维持较好的再现质量;而在高噪声条件下,宜采用诸如李氏编码等具有较强鲁棒性的方法,或通过参数优化提升系统表现。

参考文献

- [1] HU Y J, ZHOU D F, YUAN S, et al. Compressive sensing holography based on optical heterodyne detection [J]. *Optics and Laser Technology*, 2016, 86: 152-156.
- [2] WEN X, HU ZX, WANG H, et al. Quasicrystal meta surface for optical holography and diffraction [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 246.
- [3] YAO Y W, ZHANG Y P, FU Q Y, et al. Adaptive layer-based computer-generated holograms [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(6): 1481-1484.
- [4] KOZACKI T, MARTINEZ-CARRANZA J, GEREJ I, et al. Effective information processing method to produce a computer-generated hologram based on a spatial light modulator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111610.
- [5] WEI C X, ZHOU R Y, MA H W, et al. Holographic display using layered computer-generated volume hologram [J]. *Optics Express*, 2023, 31 (15): 25153-25164.
- [6] DING X, CHANG CL, DAI B, et al. Real-time holographic 3D display using Split-Lohmann Fresnel computer-generated hologram [J]. *Optics Express*, 2024, 32(23): 40175-40189.
- [7] GAN Z H, PENG X Q, HONG H J. An evaluation model for analyzing the overlay error of computer-generated holograms [J]. *Current Optics and Photonics*, 2020, 4(4): 277-285.
- [8] LIU S J, WANG D, LI S J, et al. Effective information processing method to produce a computer-generated hologram based on a spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9250-9254.
- [9] GENG Y P, HUNG W J, YANG J Y, et al. Generation of Mathieu beams based on the detour phase encoding method [J]. *Optics Communication*, 2021, 486: 126754.
- [10] LIU Z Y, XIE Y Y, ZHU W X, et al. Flexible method for generating arbitrary vector beams based on modified off-axis interference-type hologram encoding [J]. *Photonics*, 2022, 9: 949.
- [11] NOBUKAWA T, NOMURA T. Multilayer recording holographic data storage using a varifocal lens generated with a kinoform [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5419-5422.
- [12] KONG D Z, SHEN X J, SHEN Y Q, et al. Multi-image encryption based on interference of computer generated hologram [J]. *Optik*, 2014, 125(10): 2365-2368.
- [13] PI D P, LIU J, WANG Y T. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three dimensional display [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(9): 1962-1978.
- [14] 刘小峰,徐全桂,金燕,等. 噪声干扰环境下的深度强化学习故障诊断方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(12): 145-154.
- LIU X F, XU Q G, JIN Y, et al. Fault diagnosis method based on deep reinforcement learning in noisy interference environments [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(12): 145-154.
- [15] LYU M N, ZHOU X C, DU Z T, et al. Image denoising using dual convolutional neural network with skip connection [J]. *Instrumentation*, 2024, 11(3): 74-85.
- [16] 贺佳雪,娄树理,林超. 基于噪声差异性的光谱全息重构图像的降噪方法 [J]. *光学学报*, 2024, 44(9): 39-52.
- HE J X, LOU SH L, LIN CH. Denoising method for spectral holographic reconstructed images based on noise discrepancy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(9): 39-52.
- [17] KEROV A A, KOZLOV A V, CHEREMKHIN P A, et al. Speckle noise reduction in digital holography by 3D

adaptive filtering[J]. *Sensors*, 2025, 25(17): 5402.

- [18] MIN K, MIN D, HONG J, et al. Speckle reduction for single sideband-encoded computer-generated holograms by using an optimized carrier wave[J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 13508-13526.
- [19] LIAO M H, FENG Y L, LU D J, et al. Scattering imaging as a noise removal in digital holography by using deep learning[J]. *New Journal of Physics*, 2022, 24(8): 083014.
- [20] 孙刘家, 韩庆邦, 靳琪琳, 等. 基于深度学习的兰姆波 SCF-TFM 超分辨率成像[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(6): 101-110.
SUN L J, HAN Q B, JIN Q L, et al. Super-resolution imaging of Lamb wave SCF-TFM based on deep learning[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(6): 101-110.
- [21] MARTINI M G. Measuring objective image and video quality: On the relationship between SSIM and PSNR for DCT-based compressed images[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1-13.
- [22] SIMOES W, DE SÁ M. PSNR and SSIM: Evaluation of the imperceptibility quality of images transmitted over wireless networks[J]. *Procedia Computer Science*, 2024, 251: 463-470.

作者简介



李玉成, 2012 年于郑州大学获得学士学位, 2015 年于郑州大学获得硕士学位, 现为空军工程大学航空机务士官学校讲师, 主要研究方向为数字全息、数字图像处理、偏振成像等。

E-mail: zzuleeyucheng@163.com

Li Yucheng received his B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2012 and M. Sc. degree from Zhengzhou University in 2015, respectively. Now he is a Lecturer at the Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University. His main research interests include digital holography, digital image processing, and polarization imaging.



张扬(通信作者), 2002 年于空军第一航空学院获得学士学位, 2012 年于河南理工大学获得硕士学位, 现为空军工程大学航空机务士官学校副教授, 主要研究方向为数字全息、数字图像处理等。

E-mail: zy9804020@163.com

Zhang Yang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the First Aeronautical Academy of the Air Force in 2002 and M. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2012. He is now an Associate Professor at the Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University. His main research interests include digital holography and digital image processing.