

加权切趾传递函数约束的傅里叶叠层显微成像

张芬, 周业倩*, 尤栖冲, 程鸿

安徽大学农业生态大数据分析与应用技术国家地方联合工程研究中心, 安徽 合肥 230601

摘要 傅里叶叠层显微成像技术(FPM)是一种新型显微成像技术,该方法巧妙地结合了相位恢复算法和合成孔径的理念,解决了大视场与高分辨率难以兼备的问题。在传统计算中,往往将 FPM 成像过程近似为相干成像,即将 LED 视为点光源,进而相干传递函数作为最优解的频谱支持域约束。但是,严格来说,LED 是扩展的非相干光源,因此这种不恰当的近似会降低重构图像质量。为此,通过探究 FPM 系统的相干性,提出了一种新的传递函数——基于贝塞尔函数加权的切趾相干(B-AC)传递函数作为支持域约束的方法,实验结果证明,B-AC 约束更适配于 FPM 成像系统,可以明显减少相干传递函数约束时产生的振铃效应,使得重构图像质量和鲁棒性优于相干传递函数和切趾相干传递函数约束。

关键词 成像系统; 相位恢复; 傅里叶叠层显微成像; 相干传递函数; 相干成像; 部分相干成像

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0411001

Fourier Ptychographic Microscopy Based on a Weighted Apodized Transfer Function Constraint

Zhang Fen, Zhou Yeqian*, You Xichong, Cheng Hong

National Engineering Research Center for Agro-Ecological Big Data Analysis & Application,
Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract Fourier ptychographic microscopy (FPM), a new microscopic imaging technology, skillfully combines the concepts of phase recovery algorithm and synthetic aperture, solving the problem of difficult combination of a large field of view with high resolution. In traditional calculations, the FPM process is often approximated as coherent imaging. Specifically, LED is regarded as a point light source and the coherent transfer function as the constraint of spectrum support domain for the optimal solution. However, strictly, LED is an extended incoherent light source, so this improper approximation will degrade the reconstructed image quality. For this reason, a new transfer function, apodized coherent transfer function weighted by the Bessel function (B-AC), is proposed as a support domain constraint in this paper. Experimental results show that the B-AC constraint is more suitable for the FPM imaging system and obviously reduces the ringing effect caused by the constraint of the coherent transfer function. Furthermore, the reconstructed image quality and robustness are better than those under the constraints of coherent transfer function and apodized coherent transfer function.

Key words imaging systems; phase recovery; Fourier ptychographic microscopy; coherent transfer function; coherent imaging; partially coherent imaging

OCIS codes 110.0180; 100.3008; 100.3190

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-09-11; 录用日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61972002)、安徽省自然科学基金面上项目(2008085MF209)、安徽省教育厅重大项目(KJ2019ZD04)、安徽大学博士科研启动经费(J01001959)

* E-mail: 3151545506@qq.com

1 引言

傅里叶叠层显微成像技术(FPM)是指利用成本低廉的 LED 阵列,采集多角度照明下低分辨率图像迭代恢复出高分辨率图像的一项新型计算显微成像技术,优点在于不需要精密的干涉装置和精确的机械扫描驱动,还保留原有大视场的优点,以简单便捷的方式实现样本强度图像和相位图像的快速重构。FPM 技术广泛应用于生物医学、光学显微、应用光学、生命科学等领域中^[1-4],有着广泛的应用前景。

国内外学者在实验系统和恢复算法等方面提出很多改进方法。Dong 等^[5]将空域叠层成像技术中的稀疏采样原理应用到傅里叶叠层成像中,利用掩模去除过度曝光的像素点,提升图像重构精度的同时减少图像采集的曝光时间,提高了图像采集效率。Guo 等^[6]将传统的矩形 LED 阵列换成环形 LED 阵列,通过降低暗场图像所对应频谱的采样密度来提升边缘图像的亮度,将采集的低分辨率图像数量减少了一半。吴远^[7]在压缩感知和相位恢复理论的基础上,利用先验知识对傅里叶叠层成像算法进行改进,有效地提高了算法的抗噪声性能和图像重构精度。Ou 等^[8]提出的 EPRY-FPM(Embedded pupil function recovery for Fourier ptychographic microscopy)算法通过在重构过程中嵌入光瞳函数的校正过程,有效消除了物镜像差对成像质量带来的影响。

上述 FPM 方法在实验时通常都是将照明光源 LED 近似为理想的相干点光源,进而 FPM 系统被视为以物镜的相干传递函数(CTF)作为约束的相干成像系统。然而,严格来说,LED 是以部分相干的方式工作的,并不能简单地将其视为相干光源。对此,Chen 等^[9]通过分析 FPM 系统的相干性,提出用切趾相干传递函数(AC)作为约束条件,来改善采用 CTF 约束出现的振铃效应问题,提高图像的重构质量。但是,该方法在改善振铃效应的同时降低了采集图像的分辨率,使得重构图像质量下降。因此,本文根据对 FPM 系统的相干性分析,提出将基于贝塞尔函数加权的切趾相干传递函数(B-AC)作为最优解的频谱支持域约束用于 FPM,其克服了 AC 约束的缺点,既减小了振铃效应又保证了图像的分辨率,实验结果证明,所提方法比 CTF 和 AC 鲁棒性更好,重构图像质量更高,将其嵌入 EPRY-FPM 像差校正算法中^[8],也可以得到同样的结论。

2 FPM 原理

FPM 显微成像系统如图 1 所示,图中最下方是 LED 光源阵列,阵列上不同位置的 LED 产生不同角度的光波对样本进行照射,经过物镜受限的相干传递函数(一个圆形的光瞳孔径函数)对最优解的频谱支持域约束后,产生一系列对应于样本相应位置的不同空间频谱带,然后在傅里叶空间中将这些频谱带拼接叠合在一起,从而恢复该样本的大视场高分辨率图像。

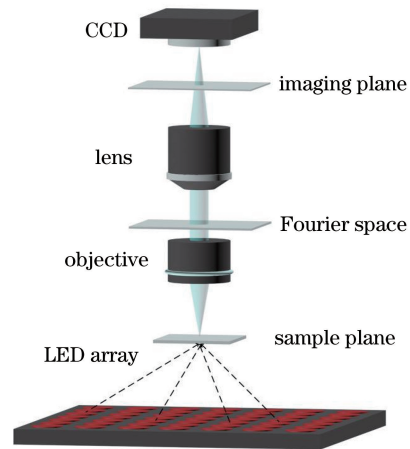


图 1 FPM 成像系统的结构图

Fig. 1 Schematic diagram of FPM imaging system

FPM 重构过程如图 2 所示, k_x 和 k_y 为傅里叶域的横纵坐标, m 和 n 为单个 LED 的坐标。图中描述了以 CCD 所采集到的不同照明角度的低分辨率强度图作为约束,在空域和频域中交替迭代来恢复物体高分辨率的复振幅信息。设 LED 阵列中有 n 个 LED, $O(r)$ 表示样本函数, r 表示二维空间坐标。样本由近似为理想点光源的 LED 逐个照明,第 i 个 LED 照明物体的出射光波可以表示为 $O(\mathbf{u}-\mathbf{u}_i)$, $i=1,2,\dots,n$, \mathbf{u}_i 是每个 LED 灯的照明矢量,通过物镜受限的光瞳函数 $P(\mathbf{u})$ 限制,即相干传递函数 CTF,光瞳函数相当于一个圆形的低通滤波器,其截止频率 $\mathbf{u}=NA/\lambda$,当 $|\mathbf{u}|\leq NA/\lambda$ 时, $|P(\mathbf{u})|=1$;反之,当 $|\mathbf{u}|> NA/\lambda$ 时, $|P(\mathbf{u})|=0$ 。最后通过傅里叶逆变换生成相应的低分辨率图像,由 CCD 采集记录。每个采集的低分辨率图像表示为

$$I_i(r) = |\mathcal{F}^{-1}\{P(\mathbf{u})O(\mathbf{u}-\mathbf{u}_i)\}|^2, i=1,2,\dots,n. \quad (1)$$

为了求解 $O(\mathbf{u})$,可以将 FPM 公式转化为以下优化问题来求解^[10]

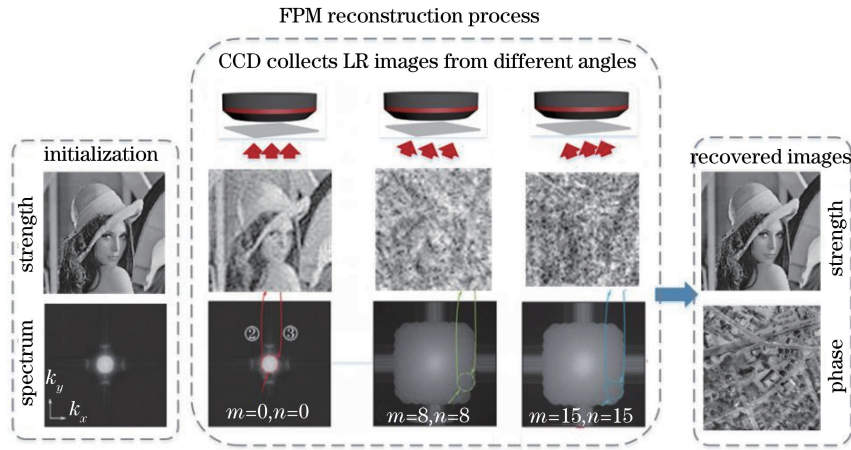


图 2 FPM 的重构过程

Fig. 2 Reconstruction process of FPM

$$\min_{O(u)} \epsilon = \min_{O(u)} \sum \sum | \sqrt{I_i(r)} - \mathcal{F}^{-1} \{ P(u) O(u - u_i) \} |^2 \quad (2)$$

3 基于贝塞尔函数加权的切趾相干传递函数

3.1 LED 阵列照明下的 FPM 系统相干性分析

首先分析 FPM 系统时间相干性。上述 FPM 系统以 CTF 作为约束,将照明光源近似成理想的完全相干点光源,即其光场中的任何一点的振幅不随时间变化,相位随时间线性变化。如果要保证这种近似的成立,光源必须满足准单色光的标准,即 $v/\Delta v \gg M$ (其中 v 是中心波长, Δv 是光谱带宽, M 是传感器沿着一个轴像素数)^[11]。但是,普通红色 LED 光谱范围为 630~650 nm,不是理想的单色光,并不能满足以上标准^[12-16]。由于不同角度的入射光相当于在傅里叶空间不同位置交叠的子孔径,其位置是由入射光波长及其 LED 空间位置共同决定,因此不满足标准的 LED 产生的光波长差异会导致位置的偏移,使得傅里叶空间中孔径的位置与预设的位置不对应,频谱信息未能填入对应的孔径内,直接影响了图像的重构质量,所以 LED 不能视为理想的完全相干点光源,它是一种扩展的非相干光源。

再次分析 FPM 系统空间相干性。若光源是 LED 这种扩展的非相干光源时,不同条件下成像系统表现为相干系统或非相干系统^[17]。

$$\theta_s \leq \theta_p, \quad (3)$$

$$\theta_s \geq \theta_o + \theta_p, \quad (4)$$

式中: θ_s 是照射样品的非相干光源的有效角直径; θ_p 是成像系统(即 NA)入射光瞳的角直径; θ_o 是物体角谱的角直径;所有角度都是从物体平面测量

的^[17]。当满足(3)式时,该系统称为相干系统;当满足(4)式时,该系统称为非相干系统。FPM 成像系统的条件在这两个极端情况之间,故其表现为部分相干系统。

综上所述,不论从时间相干性还是空间相干性分析,将 FPM 成像系统视为完全相干系统,用 CTF 作为约束条件对图像滤波都是不恰当的。

3.2 B-AC 约束

为了研究 FPM 系统中 CTF 约束对成像的影响,实验中分别用 Lena 和 Westconcordorthophoto 图像(256 pixel × 256 pixel)作为原始振幅和相位,其中低分辨率图像(LR)的像素数被设置为 64 pixel × 64 pixel。当 LED 被认为是点光源,基于(1)式获得的低分辨率图像如图 3 所示,可以看出,该图像边缘附近呈现明显振荡纹路,这是由于 CTF 边缘呈阶跃变化,导致其点扩展函数主瓣周围产生许多旁瓣,使得变换中出现高频干扰和能量泄露,产生次级衍射波,图像发生“振铃振荡”现象,称为振铃效应。



图 3 采集的低分辨率图像

Fig. 3 Acquired low-resolution image

研究发现,切趾术可以通过将传递函数边缘改为缓变形式,孔径边缘信号平滑地降为零,从而切去点扩展函数的旁瓣,将这些衍射波发源地伸展到传

递函数边缘周围更广阔的地方,抑制发源地高度局域化的边界波产生的振铃效应^[17-18]。文献[9]由此提出 AC 约束的方法,通过在 CTF 引入三角窗切趾函数来平滑 CTF 边缘[图 4(b1)],以减小振铃效应。AC 约束可以表示为

$$A(\mathbf{u}) = \left(1 - \frac{a|\mathbf{u}|}{NA/\lambda}\right) \cdot P(\mathbf{u}), \quad |\mathbf{u}| < NA/\lambda, \quad (5)$$

式中: a 是从 0 到 1 的衰减参数,其值的选取影响重构图像的质量; NA 是物镜的数值孔径; NA/λ 是物镜的截止频率; \mathbf{u} 是 LED 的照明矢量; $P(\mathbf{u})$ 是相干

传递函数。

将 AC 约束替换 CTF 约束,将(5)式代入(1)式得出采集的图像公式为

$$I_i(r) = |\mathcal{F}^{-1}\{A(\mathbf{u})O(\mathbf{u} - \mathbf{u}_i)\}|^2, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

将 AC 约束时采集的强度图像[图 4(b2)]与 CTF 约束时采集的图像[图 4(a2)]进行比较,振铃效应得到明显改善,但图像分辨率大大降低,图像变得模糊,丢失了细节信息。这是由于三角窗切趾函数在减弱旁瓣的同时也增加了主瓣的宽度,主瓣宽度越大,图像分辨率越低。

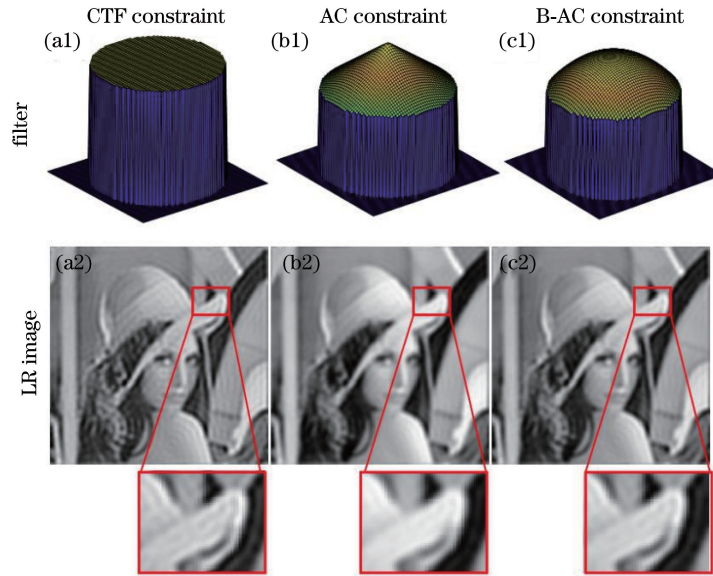


图 4 三种约束及所采集的低分辨率图像。(a1) CTF 的三维图;(b1) AC 的三维图;(c1) B-AC 的三维图;

(a2) CTF 约束下的低分辨率图;(b2) AC 约束下的低分辨率图;(c2) B-AC 约束下的低分辨率图

Fig. 4 Three constraints and acquired low-resolution images. (a1) Three-dimensional image of CTF; (b1) three-dimensional image of AC; (c1) three-dimensional image of B-AC; (a2) low-resolution image under CTF constraint; (b2) low-resolution image under AC constraint; (c2) low-resolution image under B-AC constraint

为了切趾时在主瓣宽度与旁瓣衰减之间取得更好的权衡,让能量更集中于主瓣,也就是既能更好地抑制振铃效应,又能保证图像分辨率。受凯塞窗这种可根据需要调节主瓣宽度和旁瓣电平的启发^[19-20],本文提出一种基于贝塞尔函数加权的切趾相干传递函数作为约束,

$$B(\mathbf{u}) = \frac{I_0 \left[2 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{a|\mathbf{u}|}{NA/\lambda}\right)^2} \right]}{I_0(2)} \cdot \left(1 - \frac{a|\mathbf{u}|}{NA/\lambda}\right) \cdot P(\mathbf{u}), \quad |\mathbf{u}| < NA/\lambda, \quad (7)$$

式中: $I_0(\cdot)$ 表示第一类修正的零阶贝塞尔函数。

将 B-AC 约束替换 CTF 约束,将(7)式代入(1)

式得出采集的图像公式为

$$I_i(r) = |\mathcal{F}^{-1}\{B(\mathbf{u})O(\mathbf{u} - \mathbf{u}_i)\}|^2, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

从 B-AC 约束后采集的图像[图 4(c2)]可以看出,其振铃效应抑制效果与 AC 约束时采集的图像[图 4(b2)]差不多,但是其图像轮廓更加清晰,细节更为丰富。

4 实验与分析

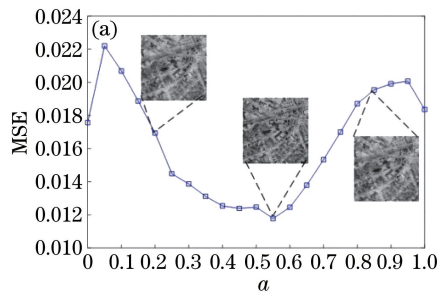
将本文提出的 B-AC 约束与传统的 CTF 约束以及文献[9]提出的 AC 约束进行实验结果比较。实验参数如下:中心波长为 631 nm 的 15×15 的 LED 阵列,物镜的放大率为 $4 \times / 0.1NA$,样本目标位于阵列上方 60 mm 处。两个相邻 LED 灯间

隔为 3 mm。通过上文对光源的相干性分析发现, 单个 LED 可以看作扩展的非相干光源^[21], 在满足 (3) 式的条件下, 实验将一个 1 mm 大小的 LED 分成 100 个点光源, 相邻点光源之间的间距为 0.1 mm, 每个点光源之间互不相干, 然后基于 (9) 式模拟尺寸为 1 mm 的 LED, 将单个 LED 看作入射角略有不同的 100 个点光源同时照射样品, 因此, 采集的低分辨率强度图像 I_i 是通过将所有 100 个强度图像相加而获得的。采用 256 pixel × 256 pixel 的 Lena 和 Westconcordorthophoto 图像分别作为原始强度和相位图。

$$I_i = \frac{1}{100} \sum_{p=1}^{100} |\mathcal{F}^{-1}\{P(\mathbf{u})O(\mathbf{u} - \mathbf{u}_i)\}|^2. \quad (9)$$

实验中用均方误差 (MSE) 和结构相似度 (SSIM) 来评估图像的重构质量。MSE 定义为

$$R_{\text{MSE}} = \frac{1}{MN} \sum_M \sum_N [c(r) - o(r)]^2, \quad (10)$$



式中: M 和 N 为高分辨率图像的像素数; $c(r)$ 是重构的高分辨率图像; $o(r)$ 是输入的高分辨率图像。其值越接近 0, 表示图像的恢复质量越好。

SSIM 定义为

$$R_{\text{SSIM}} = \frac{(2\mu_c\mu_o + C_1)(2\sigma_{co} + C_2)}{(\mu_c^2 + \mu_o^2 + C_1)(\sigma_c^2 + \sigma_o^2 + C_2)}, \quad (11)$$

式中: μ_c 是 $c(r)$ 的均值; μ_o 是 $o(r)$ 的均值; σ_c 是 $c(r)$ 的方差; σ_o 是 $o(r)$ 的方差; σ_{co} 是 $c(r)$ 和 $o(r)$ 的协方差; C_1 和 C_2 为常数, 是为了避免分母为 0。SSIM 取值范围是 $[0, 1]$, 其值越大, 表示两幅图像的结构信息越相似。

4.1 无噪声图像重建

图 5 为衰减参数 a 与重构图像的 MSE 和 SSIM 曲线图, 可以看出, 当 $a = 0.55$ 时, 重构图像质量最好, 故实验中 $a = 0.55$ 。

图 6 为无噪声情况下, 当 LED 尺寸为 1 mm 时, 使用 CTF 和 AC 以及 B-AC 作为约束条件时的

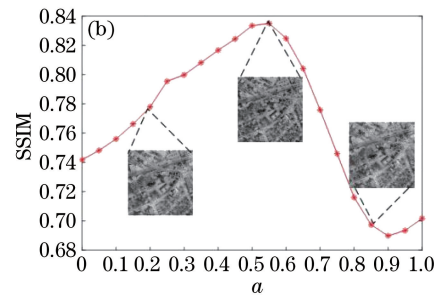


图 5 衰减参数 a 与重构图像的 MSE 和 SSIM 曲线图。(a) MSE; (b) SSIM

Fig. 5 Attenuation parameters a and MSE and SSIM curves of reconstructed images. (a) MSE; (b) SSIM

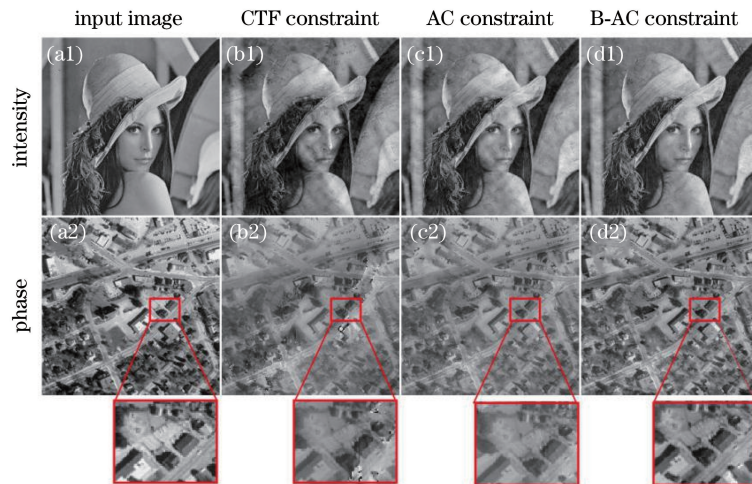


图 6 无噪声时三种约束下重构强度和相位。(a1)(a2) 原始强度和相位; (b1)(b2) CTF 约束下重构强度和相位; (c1)(c2) AC 约束下重构强度和相位; (d1)(d2) B-AC 约束下重构强度和相位

Fig. 6 Reconstructed intensity and phase under three constraints without noise. (a1)(a2) Original intensity and phase; (b1)(b2) reconstructed intensity and phase under CTF constraint; (c1)(c2) reconstructed intensity and phase under AC constraint; (d1)(d2) reconstructed intensity and phase under B-AC constraint

重构图像。由图 6 可以看出,CTF 约束下重构图像 [图 6(b1)和图 6(b2)]最为模糊,细节信息损失严重;AC 约束下的重构图像[图 6(c1)和图 6(c2)]质量比之好一点;本文提出的 B-AC 重构图像[图 6

(d1)和图 6(d2)]信息轮廓最为清晰。

各约束条件下重构图像的 MSE 和 SSIM 如表 1 所示,B-AC 约束下 MSE 更小,SSIM 最高,重构图像质量明显优于 CTF 和 AC 约束下的重构结果。

表 1 三种不同约束下的重构结果

Table 1 Reconstruction results of three different constraints

Evaluation criterion	CTF constraint	AC constraint	B-AC constraint
MSE	0.0185	0.0148	0.0118
SSIM	0.7156	0.7648	0.8334

4.2 有噪声图像重构

FPM 图像重构的过程中,CCD 采集的图像可能会受到各种噪声的影响,比如高斯噪声、泊松噪声、散斑噪声等,这些噪声会降低图像重构质量。所以为了进一步比较 B-AC 约束的鲁棒性,实验中分别加入方差

为 0.01 的高斯噪声和泊松噪声,重构图像如图 7 所示。

不同约束下重构图像的 MSE 和 SSIM 如表 2 所示,由图 7 和表 2 可知,在高斯噪声和泊松噪声的影响下,B-AC 约束的重构结果明显优于 CTF 约束和 AC 约束。

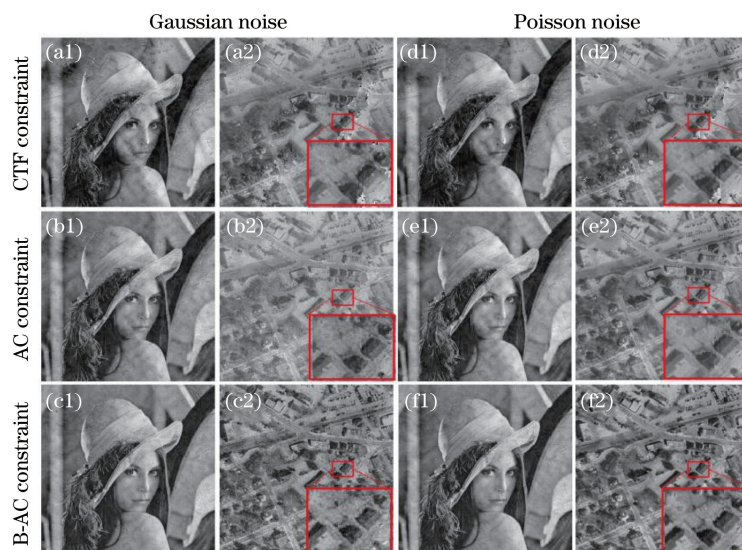


图 7 不同噪声时三种约束下重构的强度和相位。(a1)(a2)高斯噪声下 CTF 约束时重构强度和相位;(b1)(b2)高斯噪声下 AC 约束时重构强度和相位;(c1)(c2)高斯噪声下 B-AC 约束时重构强度和相位;(d1)(d2)泊松噪声下 CTF 约束时重构强度和相位;(e1)(e2)泊松噪声下 AC 约束时重构强度和相位;(f1)(f2)泊松噪声下 B-AC 约束时重构强度和相位

Fig. 7 Reconstructed intensity and phase under three constraints with different noises. (a1)(a2) Reconstructed intensity and phase under CTF constraint with Gaussian noise; (b1)(b2) reconstructed intensity and phase under AC constraint with Gaussian noise; (c1)(c2) reconstructed intensity and phase under B-AC constraint with Gaussian noise; (d1)(d2) reconstructed intensity and phase under CTF constraint with Poisson noise; (e1)(e2) intensity phase reconstruction under AC constraint with Poisson noise; (f1)(f2) reconstructed intensity and phase under B-AC constraint with Poisson noise

表 2 不同噪声下三种约束的重构结果对比

Table 2 Comparison of reconstruction results of three constraints with different noises

Noise	CTF constraint		AC constraint		B-AC constraint	
	MSE	SSIM	MSE	SSIM	MSE	SSIM
Gaussian	0.0194	0.7038	0.0159	0.7619	0.0141	0.8041
Poisson	0.0186	0.7164	0.0153	0.7577	0.0137	0.8163

图 8 为散斑噪声方差从 0.01 到 0.1 时,不同约束下重构的 MSE 曲线和 SSIM 曲线,实验结果表明,B-AC 约束下的 MSE 值始终小于 CTF 约束和

AC 约束,B-AC 约束下的 SSIM 值始终大于 CTF 约束和 AC 约束,结构相似度更高。

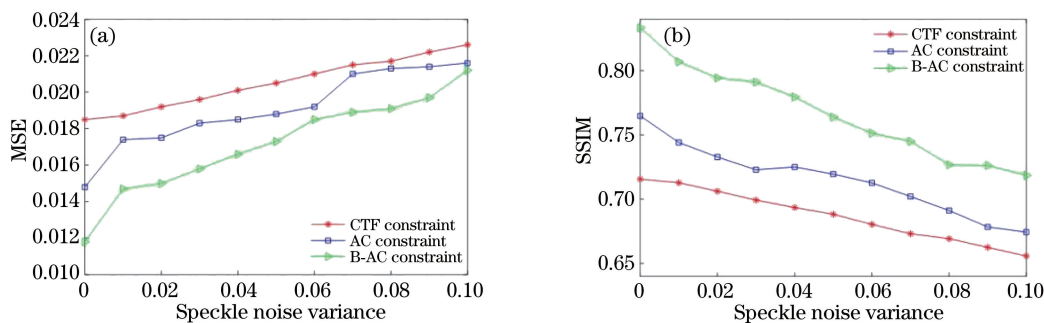


图 8 三种约束下噪声大小与评价指标的曲线图。(a) MSE;(b) SSIM

Fig. 8 Curves of noise level and evaluation criterion under three constraints. (a) MSE; (b) SSIM

4.3 B-AC 约束在 EPRY-FPM 算法中的应用

EPRY-FPM 算法是一种校正像差的 FPM 改进算法,通过在重构过程中嵌入光瞳函数的校正过程,有效消除了物镜像差的影响,从而提高了重构图

像的成像质量^[8];将本文提出的 B-AC 约束应用在 EPRY-FPM 算法中,如图 9 和表 3 所示,实验结果表明,在 EPRY-FPM 算法中,B-AC 约束同样优于 CTF 约束和 AC 约束。

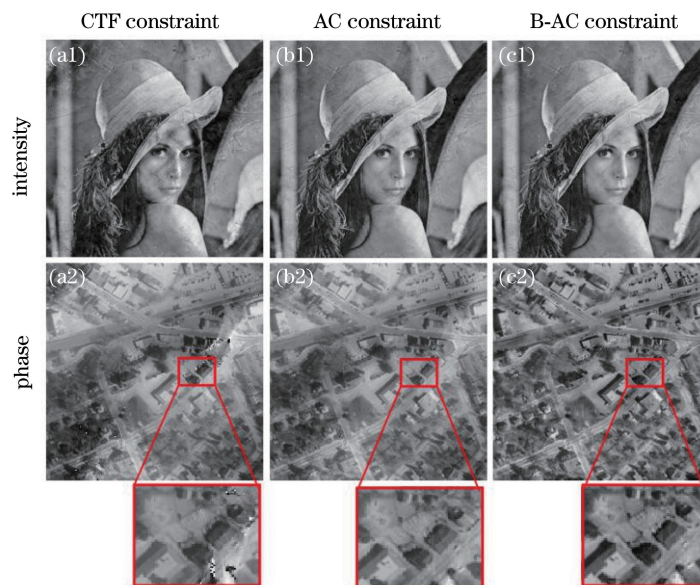


图 9 三种约束在 EPRY-FPM 算法中重构强度与相位。(a1)(a2) CTF 约束下重构强度和相位;
(b1)(b2) AC 约束下重构强度和相位;(c1)(c2) B-AC 约束下重构强度和相位

Fig. 9 Reconstructed intensity and phase under three constraints in EPRY-FPM algorithm. (a1) (a2) Reconstructed intensity and phase under CTF constraint; (b1) (b2) reconstructed intensity and phase under AC constraint; (c1)(c2) reconstructed intensity and phase under B-AC constraint

表 3 三种约束在 EPRY-FPM 算法中重构结果对比

Table 3 Comparison of reconstruction results of three constraints in EPRY-FPM algorithm

Evaluation criterion	CTF constraint	AC constraint	B-AC constraint
MSE	0.0189	0.0147	0.0140
SSIM	0.7080	0.7706	0.8098

4.4 真实实验

为了进一步验证本文提出的 B-AC 约束的有效性,搭建了一套傅里叶叠层成像系统,成像系统参数如下:15×15 的 LED 阵列,LED 间距为 4 mm,照明波长为 631 nm 的红光,LED 阵列到样本平面的

高度为 80 mm,物镜的放大率为 4×/0.1NA,1951USAF(set by US Air Force in 1951)分辨率板作为实验样本,采集的低分辨率图和 FPM 成像系统分别如图 10 和图 11 所示。

图 12 为 USAF 分辨率板作为实验样本重构的

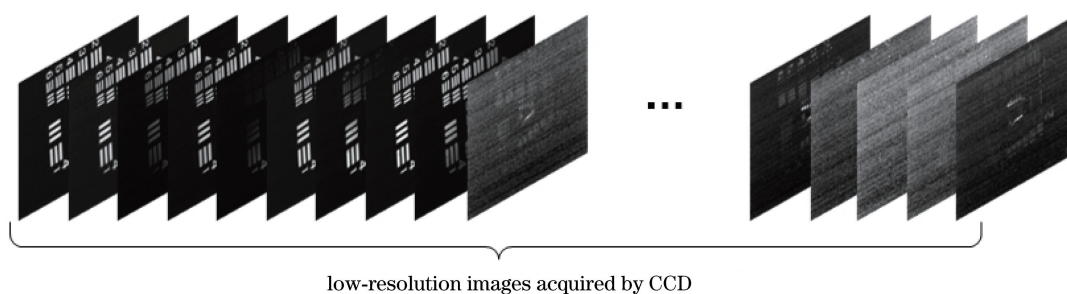


图 10 CCD 采集的低分辨率图像

Fig. 10 Low-resolution images acquired by CCD

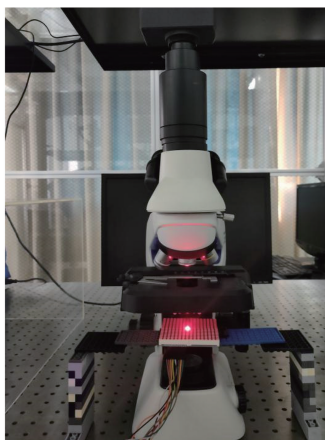


图 11 FPM 成像系统

Fig. 11 FPM imaging system

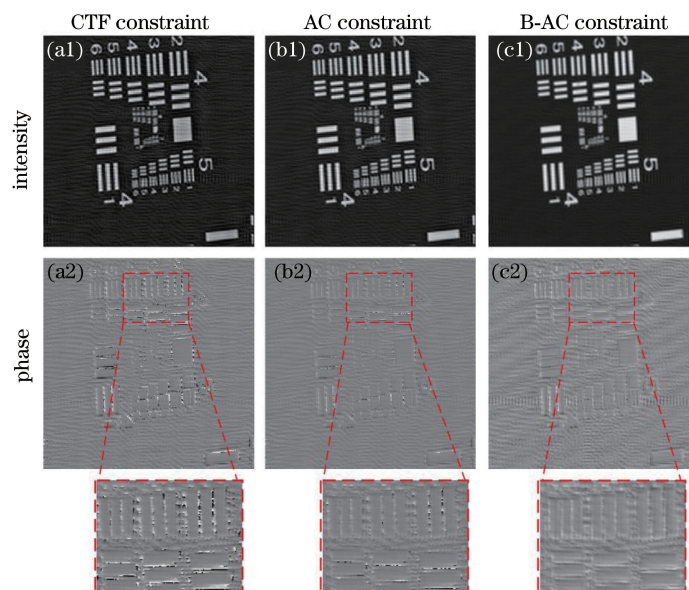


图 12 三种约束下重构强度和相位。(a1)(a2) CTF 约束下重构强度和相位；
(b1)(b2) AC 约束下重构强度和相位；(c1)(c2) B-AC 约束下重构强度和相位

Fig. 12 Reconstructed intensity and phase under three constraints. (a1)(a2) Reconstructed intensity and phase under CTF constraint; (b1)(b2) reconstructed intensity and phase under AC constraint; (c1)(c2) reconstructed intensity and phase under B-AC constraint

强度图与相位图,可以看出,CTF 约束和 AC 约束
重构的图像线对边缘有明显的白色裂缝,边缘很不

清晰,B-AC 约束重构的图像其线对边缘则没有这
一现象,边缘比较清晰。

5 结 论

本文分析了 FPM 系统的相干性,提出将一种新的约束方法——B-AC 约束用于 FPM 成像系统。实验结果表明,B-AC 约束改善了采集图像的振铃效应,重构图像的质量和鲁棒性比 CTF 约束和 AC 约束时更好。这种新方法放宽了对照明光源的相干性要求,使得大尺寸 LED 作为 FPM 成像系统的照明成为可能。此外新方法没有增加计算量,还能嵌入到 FPM 的其他改进算法中,因此我们相信,所提方法将大大促进 FPM 的实际应用。

参 考 文 献

- [1] Zheng G A, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 739-745.
- [2] Zuo C, Sun J S, Li J J, et al. Wide-field high-resolution 3D microscopy with Fourier ptychographic diffraction tomography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128:106003.
- [3] Pan X C, Liu C, Tao H, et al. Phase imaging based on ptychography and progress on related key techniques [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111010.
潘兴臣, 刘诚, 陶华, 等. Ptychography 相位成像及其关键技术进展 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111010.
- [4] Sun J S, Zhang Y Z, Chen Q, et al. Fourier ptychographic microscopy: Theory, advances, and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1011005.
孙佳嵩, 张玉珍, 陈钱, 等. 傅里叶叠层显微成像技术: 理论、发展和应用 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1011005.
- [5] Dong S, Bian Z, Shiradkar R, et al. Sparsely sampled Fourier ptychography [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5455-5464.
- [6] Guo K, Dong S, Nanda P, et al. Optimization of sampling pattern and the design of Fourier ptychographic illuminator [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6171-6180.
- [7] Wu Y. The research of Fourier ptychography algorithm based on image sparse representation [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017: 2-7.
吴远. 基于图像稀疏表示的傅里叶叠层成像算法研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017: 2-7.
- [8] Ou X, Zheng G, Yang C. Embedded pupil function recovery for Fourier ptychographic microscopy [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 4960-4972.
- [9] Chen X, Zhu Y Q, Sun M L, et al. Apodized coherent transfer function constraint for partially coherent Fourier ptychographic microscopy [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14099-14111.
- [10] Yeh L H, Dong J, Zhong J S, et al. Experimental robustness of Fourier ptychography phase retrieval algorithms [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33214-33240.
- [11] Lohmann A W. Matched filtering with self-luminous objects [J]. *Applied Optics*, 1968, 7(3): 561-563.
- [12] Dong S, Shiradkar R, Nanda P, et al. Spectral multiplexing and coherent-state decomposition in Fourier ptychographic imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 5(6): 1757-1767.
- [13] Chung J, Ou X, Kulkarni R P, et al. Counting white blood cells from a blood smear using Fourier ptychographic microscopy [J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0133489.
- [14] Horstmeyer R, Ou X Z, Zheng G A, et al. Digital pathology with Fourier ptychography [J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics: the Official Journal of the Computerized Medical Imaging Society*, 2015, 42: 38-43.
- [15] Ma J S, Cheng B C, Cao W B, et al. Holographic display system of digital micro-mirror devices based on LED light source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0709001.
马建设, 程炳超, 曹文波, 等. 基于 LED 光源的数字微镜器件全息显示系统 [J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0709001.
- [16] Horstmeyer R, Chen R Y, Ou X Z, et al. Solving ptychography with a convex relaxation [J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(5): 053044.
- [17] Goodman J. Introduction to Fourier optics [M]. 3rd ed. Qin K C, Liu P S, Chen J B, et al, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 96-110.
古德曼. 傅里叶光学导论 [M]. 3 版. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011: 96-110.
- [18] Naylor D A, Tahic M K. Apodizing functions for Fourier transform spectroscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(11): 3644-3648.
- [19] Li C, Li C, Jiang F, et al. Harmonic detection algorithm based on Kaiser window [J]. *Electronic Science and Technology*, 2018, 31(5): 5-7, 11.
李晨, 李川, 姜飞, 等. 基于凯塞窗的谐波检测算法 [J]. *电子科技*, 2018, 31(5): 5-7, 11.
- [20] Deng J L, Tong J J, Gao M G, et al. Improved triangular window apodization function based on zero-order Bessel function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020,

40(3): 0307001.

邓竞蓝, 童晶晶, 高闽光, 等. 基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数 [J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0307001.

[21] Huang D, Feng Q B, Tang T, et al. Design method for surface energy mapping optimization based on

extended light source[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1222003.

黄丹, 冯奇斌, 唐天, 等. 基于扩展光源的曲面能量映射优化设计方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1222003.