

引导滤波增强的 ADM 相干衍射成像*

张天昊^{1) #} 郭广妍^{3) #} 李榛¹⁾ 邓锴煜²⁾ 吴浩宇³⁾ 贾天雷¹⁾ 熊培翔²⁾ 史祎诗

^{2) 3) †}

1) (河北工程大学数理科学与工程学院, 邯郸 056038)

2) (中国科学院大学光电学院, 北京 100049)

3) (中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘要

本文提出一种引导滤波增强的交替方向法(ADM)相干衍射成像方法。该方法将引导滤波作为结构保持型先验嵌入交替方向法迭代框架, 在测量约束与物体域支撑约束之间引入结构保持机制, 以提高相位恢复过程中的噪声抑制和伪影控制能力。针对具有明显吸收边界或较强振幅结构的样品, 进一步利用振幅结构信息辅助相位更新, 并采用分段递减的滤波强度调度策略, 使算法在迭代前期侧重噪声抑制、后期侧重细节恢复, 从而实现去噪能力与结构保真度之间的有效平衡。近场和远场相干衍射成像实验结果表明, 所提方法能够有效抑制噪声传播与伪影累积, 改善局部结构可辨识度、提高线对对比度和结构保真度, 并在不同成像条件下均表现出良好的稳定性和适用性。

关键词: 相干衍射成像, 引导滤波, 交替方向法, 相位恢复

PACS: 42. 30. Rx, 42. 30. Kq, 42. 30. Wb, 42. 25. Fx

基金: 国家自然科学基金(62131011); 国家重点研发计划(2021YFB3602604); 中国科学院科教融合基金; 中国科学院大学; 中央高校基本科研业务费。

同等贡献作者.

† 通讯作者. E-mail: shiyishi@ucas.ac.cn

第一作者. E-mail: heu_zhangtianhao@163.com

1 引言

近年来,随着相干光源技术和计算成像方法的发展,相干衍射成像(Coherent Diffraction Imaging, CDI)因无需成像透镜即可实现样品复振幅重建而受到广泛关注^[1-3]。该方法通过记录样品在相干光照射下形成的衍射强度分布,并结合数值迭代算法恢复样品的复振幅信息。由于其空间分辨率主要由衍射图中包含的最大散射角决定,理论上可突破传统光学成像受数值孔径限制的分辨率上限,因此在纳米结构表征、高分辨显微成像和超分辨观测等领域具有重要应用价值^[3-5]。然而,探测器只能记录衍射场强度而无法直接获取相位信息,使得 CDI 重建本质上成为非凸相位恢复问题。受测量噪声、模型误差及初始估计等因素影响,重建过程中易出现收敛停滞、伪影累积和局部最优等现象,因此相位恢复仍是制约 CDI 成像质量的关键问题^[6-10]。

围绕相位恢复问题,研究者提出了多种约束建模与迭代求解方法。Sayre 最早指出样品结构先验可为相位恢复提供额外约束;Gerchberg 和 Saxton 提出了在物体面与衍射面之间交替施加约束的 G-S 算法,为后续相位恢复方法奠定了基础^[6-8]。在此基础上,支撑域约束被进一步引入,用于限定物体仅存在于有限空间区域内,从而缩小可行解空间并提高恢复稳定性^[8-10]。随后,误差约减(ER)、混合输入输出(HIO)以及交替方向法(ADM)等方法相继发展^[11-13]。其中,ADM 通过变量分裂与交替更新,将测量一致性约束与物体域约束解耦处理,通常较传统投影类方法具有更稳定的优化行为和更好的收敛特性^[13-16]。但在噪声干扰较强和先验信息不足条件下,传统 ADM 仍易出现背景噪声残留、伪影传播及细节恢复不足等问题。为进一步提高重建质量,已有研究在 ADM 迭代框架中

引入额外先验约束，形成增强型 ADM 相位恢复方法^[17]。增强型 ADM，是指在传统 ADM 测量约束和支撑约束交替更新的基础上，进一步融合正则化、去噪先验或多物理约束等信息，使迭代过程不仅满足衍射强度和支撑域条件，同时受到图像结构、噪声抑制或物理一致性的约束，从而改善算法的收敛稳定性和重建质量。其中，总变分（Total Variation, TV）正则是一类常用的图像先验方法，可利用图像梯度稀疏性抑制噪声放大和伪影累积，在相位恢复中具有较好的抗噪作用。但其基于分段平滑假设，易在结构过渡区域产生阶梯效应，且固定正则强度难以兼顾迭代前期的噪声抑制与后期的细节恢复。

本文提出一种引导滤波增强的 ADM 相干衍射成像方法。该方法将引导滤波作为结构保持型先验嵌入 ADM 迭代框架，在测量约束与物体域支撑约束之间引入结构保持机制^[18-25]；针对具有明显吸收边界或较强振幅结构的样品，进一步利用振幅结构信息辅助相位更新，并采用分段递减的滤波强度调度策略，使算法在迭代前期侧重噪声抑制、后期侧重细节恢复。近场和远场相干衍射成像结果表明，所提方法能够有效抑制噪声传播与伪影累积，改善局部结构可辨识度、提高线对对比度和结构保真度，并在不同成像条件下表现出良好的稳定性和适用性。

2 理论模型与方法

近场和远场衍射模型如图 1 所示，本文针对相干衍射成像中的相位恢复问题，在统一传播框架下分别建立近场衍射模型和远场衍射模型，并在此基础上给出测量幅度约束与物体域支撑约束。本文将引导滤波作为结构保持型先验嵌入 ADM 迭代过程，构建引导滤波增强的 ADM 相位恢复方法。对于具有明显吸

收边界或较强振幅结构的样品，进一步利用振幅结构信息辅助相位更新，并结合分段递减的滤波强度调度策略，实现迭代前期噪声抑制与后期细节保持之间的动态平衡。

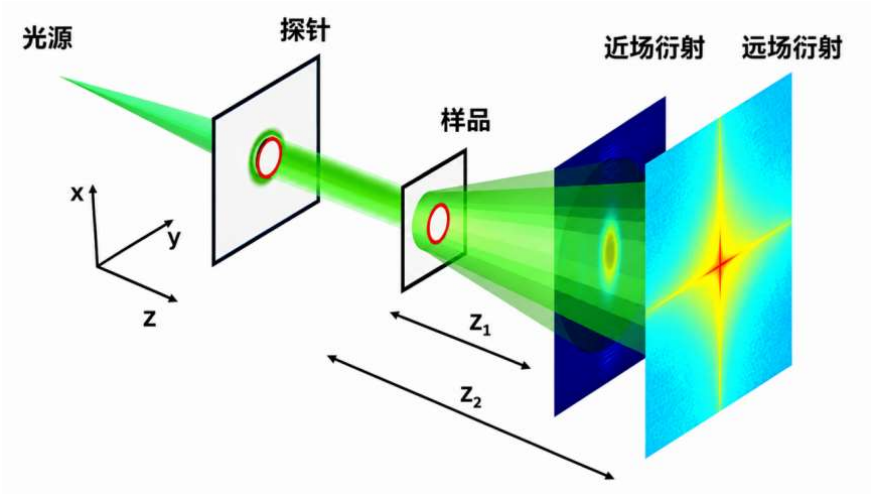


图 1 近场衍射模型和远场衍射模型

Fig. 1. Near-field diffraction model and far-field diffraction model

2.1 CDI 成像模型与约束集合

根据探测面相对于样品的位置及光路结构的不同，相干衍射成像可分为近场衍射成像和远场衍射成像两种情形。

对于近场成像，衍射传播通常可由菲涅耳衍射或角谱传播描述；对于远场成像，当传播距离足够大或在光路中引入傅里叶透镜后，探测面上的衍射场可近似表示为样品出射波的傅里叶变换。

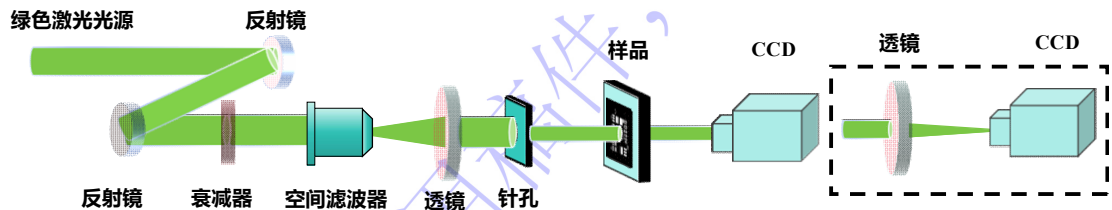


图 2 单波长近场、远场相干衍射成像实验光路图(虚线框里带傅里叶透镜的为远场衍射)

Fig. 2. Experimental optical setup for single-wavelength near-field and far-field coherent diffraction imaging. The dashed box with a Fourier lens indicates the far-field diffraction configuration.

(1)复透射函数为 $x(r)$ ，其中 r 表示物体平面的二维空间坐标。复透射函数可表示为：

$$x(r) = A(r) \exp(j\phi(r)) \quad (1)$$

(2)其中， $A(r) = |x(r)|$ 和 $\phi(r) = \angle x(r)$ 分别表示样品的振幅调制与相位调制。设物体面到探测面的传播算子为 $D(\cdot)$ ，则探测平面的复振幅为：

$$U(q) = D(x(r)) \quad (2)$$

其中 q 为探测器平面的二维坐标。根据实验条件不同， $D(\cdot)$ 可对应菲涅耳传播或二维傅里叶变换。

(3)探测器只能记录衍射场强度，因此测量模型为：

$$I(q) = |U(q)|^2 = |D(x(r))|^2 \quad (3)$$

由此，CDI 相位恢复问题可归结为，在已知衍射强度 $I(q)$ 的条件下，恢复满足测量一致性与物体先验约束的复透射函数 $x(r)$ 。

(4)为描述方便，定义测量幅度约束集合：

$$\mathcal{M} = \{x(r) | |D(x(r))|^2 = I(q)\} \quad (4)$$

以及支撑约束集合：

$$\mathcal{S} = \{x(r) | x(r) = 0, r \notin \alpha\} \quad (5)$$

(5)其中 α 为物体支撑区域。对应地，测量幅度投影算子与支撑投影算子分别为：

$$P_{\mathcal{M}}(x) = D^{-1} \left\{ \sqrt{I(q)} \exp(j\angle D(x)) \right\} \quad (6)$$

$$P_{\mathcal{S}}(x) = \begin{cases} x(r), & r \in \alpha \\ 0, & r \notin \alpha \end{cases} \quad (7)$$

2.2 传统 ADM 算法

传统 ADM 算法通过在 $\mathcal{M}$ 与 $\mathcal{S}$ 之间交替投影逼近可行解，引入辅助变量 y ，将测量一致性约束与物体域约束分离处理，并利用乘子变量协调二者的一致性。

(1)其基本迭代形式为：

$$x^{k+1} = P_{\mathcal{S}}(y^k - \omega^k) \quad (8)$$

$$y^{k+1} = P_{\mathcal{M}}(x^{k+1} + \omega^k) \quad (9)$$

$$\omega^{k+1} = \omega^k + \beta(x^{k+1} - y^{k+1}) \quad (10)$$

(2)其中， ω^k 为缩放乘子， $\beta > 0$ 为惩罚参数。式(8)保证 x 满足支撑域约束，式(9)保证 y 满足测量一致性，式(10)用于协调两者之间的差异。

相较于简单交替投影，ADM 能够在测量域与物体域之间建立更平稳的优化过程，从而提升收敛稳定性。然而，当测量噪声较强或支撑估计存在偏差时，仅依赖幅度投影与支撑投影的硬约束仍难以获得高质量重建结果，常表现为背景噪声残留、相位伪影累积以及细节恢复不足。

2.3 引导滤波

为进一步提高传统 ADM 在噪声干扰条件下的重建稳定性，本文在物体域更新过程中引入引导滤波先验。与基于梯度稀疏约束的 TV 正则不同，引导滤波是一种基于局部线性模型的边缘保持滤波方法，能够在抑制噪声的同时较好地保持图像边界和局部结构，并可在引导图像与输入图像不同的情况下实现结构信息的传递。这一特性使其适合作为相位恢复中的结构保持型先验，用于抑制迭代过程中的噪声传播与伪影累积。

(1)引导滤波（GF）其核心并非简单平滑，而是假设输出图像在局部窗口内是引导图像的线性变换。设引导图像为 G ，输入图像为 p ，输出图像为 q 。在以像素 k 为中心的局部窗口 ω_k 内，有：

$$q_i = a_k G_i + b_k, \quad \forall i \in \omega_k \quad (11)$$

(2)其中 a_k 和 b_k 为窗口内常数，得到最小化局部代价函数：

$$\min_{a_k, b_k} \sum_{i \in \omega_k} [(a_k G_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2] \quad (12)$$

可进一步得闭式解：

$$a_k = \frac{\text{cov}_{\omega_k}(G, p)}{\sigma_{\omega_k}^2(G) + \varepsilon} \quad (13)$$

$$b_k = \bar{p}_{\omega_k} - a_k \bar{G}_{\omega_k} \quad (14)$$

(3)其中， $\sigma_{\omega_k}^2(G)$ 为窗口方差， $\text{cov}_{\omega_k}(G, p)$ 为窗口协方差， ε 为正则参数。

由于每个像素会落入多个窗口，最终输出通过对所有包含该像素的窗口系数进行平均得到：

$$q_i = \bar{a}_i G_i + \bar{b}_i \quad (15)$$

2.4 引导滤波增强的 ADM 方法

引导滤波增强的 ADM 算法流程图如图 3 所示，引导滤波本质上是一种受引导图结构约束的局部回归滤波。当输入图与引导图相同时，它表现为边缘保持平滑；当二者不同时，则能够将引导图中的结构信息传递到待滤波图像中。

(1)考虑到 CDI 待恢复变量为复数场，而样品结构更自然地由振幅与相位共同表征，本文采用幅相解耦方式构造引导滤波先验。设支撑投影后的物体估计为：

$$x^{k+1} = A^{k+1} \exp(j\phi^{k+1}) \quad (16)$$

(2)当前迭代的振幅分量与相位分量为:

$$A^{k+1} = |x^{k+1}| \quad (17)$$

$$\phi^{k+1} = \angle x^{k+1} \quad (18)$$

(3)对振幅分量实施自引导滤波,即以振幅自身作为引导图像,对幅值噪声进行边缘保持平滑:

$$\hat{A}^{k+1} = GF(A^{k+1}, A^{k+1}; r_k, \varepsilon_{A,k}) \quad (19)$$

(4)对于具有明显吸收边界或较强振幅对比的样品,振幅图往往比相位图更稳定地反映样品的真实边缘位置。基于这一考虑,本文进一步利用更新后的振幅分量作为引导图像,对相位分量进行结构约束:

$$\hat{\phi}^{k+1} = GF(\phi^{k+1}, \hat{A}^{k+1}; r_k, \varepsilon_{\phi,k}) \quad (20)$$

(5)为了简化引导过程,直接把 $T_k(\cdot)$ 定义为第 k 次迭代引导滤波增强算子。该算子置于支撑投影与测量投影之间,使物体域估计在进入测量一致性更新之前先完成一次结构保持型先验增强。

(6)最后,将滤波后的振幅与相位重新组合,得到先验增强后的复场估计:

$$\tilde{x}^{k+1} = \hat{A}^{k+1} \exp(j\hat{\phi}^{k+1}) \quad (21)$$

该方法不同于单纯将引导滤波作为后处理去噪算子,而是将其嵌入迭代更新过程,使滤波参与解的演化。其物理依据在于对于某些具有明显吸收边界或较强振幅对比的样品,振幅图像可能比相位图像更稳定地表征边缘位置。

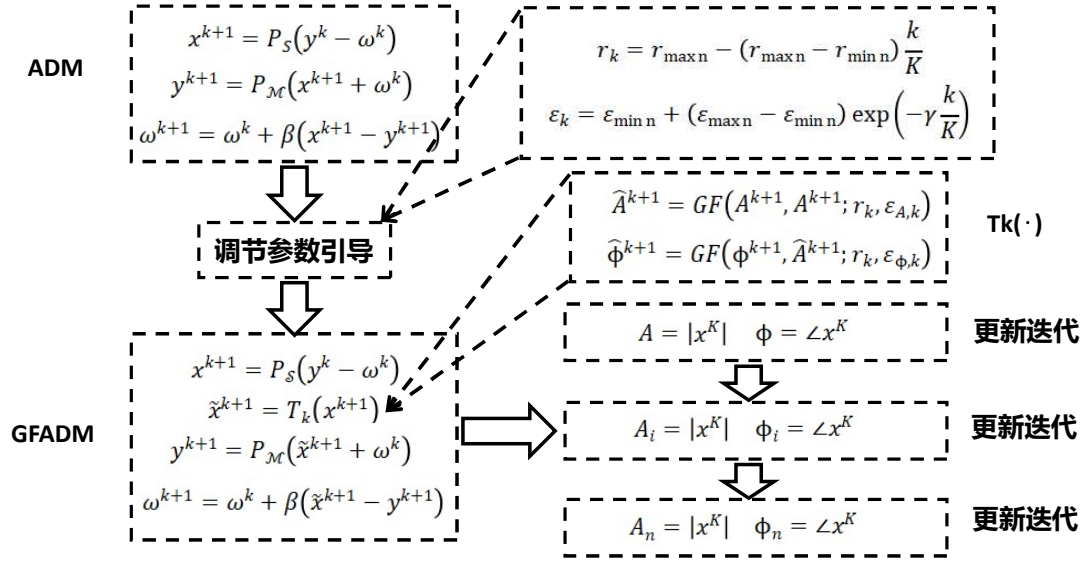


图 3 引导滤波增强的 ADM 算法流程图

Fig. 3. Flow chart of the guided filtering enhanced ADM algorithm

2.5 滤波强度调度

迭代初期，当前估计受初值误差与噪声影响较大，需要较强平滑以稳定解的演化；迭代后期，高频结构逐步恢复，过强滤波会导致边缘钝化与分辨率损失。为此，令滤波窗口半径和正则参数随迭代动态变化。

(1) 设总迭代次数为 K ，则第 k 次迭代的参数可写为：

$$r_k = r_{\max n} - (r_{\max n} - r_{\min n}) \frac{k}{K} \quad (22)$$

$$\epsilon_k = \epsilon_{\min n} + (\epsilon_{\max n} - \epsilon_{\min n}) \exp\left(-\gamma \frac{k}{K}\right) \quad (23)$$

其中 $r_{\max n}$, $r_{\min n}$, $\epsilon_{\max n}$, $\epsilon_{\min n}$ 为预设上下界， γ 为衰减系数。该方法在前期采用较强先验抑制噪声，在后期逐步减弱滤波强度，以更好地保留边缘与细节，实现“前期强去噪、后期保结构”的动态平衡。

(2) 将上述引导滤波先验嵌入 ADM 后，本文提出的增强迭代过程写为：

$$x^{k+1} = P_S(y^k - \omega^k) \quad (24)$$

$$\tilde{x}^{k+1} = T_k(x^{k+1}) \quad (25)$$

$$y^{k+1} = P_{\mathcal{M}}(\tilde{x}^{k+1} + \omega^k) \quad (26)$$

$$\omega^{k+1} = \omega^k + \beta(\tilde{x}^{k+1} - y^{k+1}) \quad (27)$$

经过 K 次迭代后，最终输出复透射函数估计为 x^K 。

3 实验结果与讨论

3.1 实验系统与重建条件

单波长衍射成像的实验装置如图 4 所示，为验证本文所提引导滤波增强的 ADM 在近场和远场相干衍射成像中的重建性能，实验采用单波长绿光照明的衍射成像光路。系统中，532 nm 绿光激光经反射镜引导后进入光路，并通过衰减器调节入射光强；随后光束依次通过显微物镜和针孔，以完成空间滤波与光束整形，再经透镜准直平行后照明样品。样品后的衍射场由 CCD 记录，其中样品后直接放置 CCD 时对应近场衍射接收模式；当在样品后加入透镜，并在其后焦面附近放置 CCD 时，对应远场衍射接收模式。

近场实验中，照明波长为 532 nm，CCD 像元尺寸为 2.74 μm ，样品到 CCD 的传播距离为 57.3 mm，圆形支撑域直径设为 2.0 mm。近场重建迭代次数为 30 次，ADM 惩罚参数 β 取 0.1。GFADM 中引导滤波参数采用分段递减设置，在迭代前期窗口半径 r 为 5、正则化参数 ϵ 为 0.002，迭代中期 r 为 3， ϵ 为 0.001，在迭代后期 r 为 2、 ϵ 为 0.001。本文结合标准的 USAF1951 分辨率板的可分辨线对对重建结果进行评价，实际成像分辨能力则在后续 USAF1951 重建结果中结合可分辨线对、局部放大图和像素剖面曲线进行分析。实验过程中已尽量保持光路稳定，并通过光强调节、空间滤波和准直整形等方式提高实验稳定性。

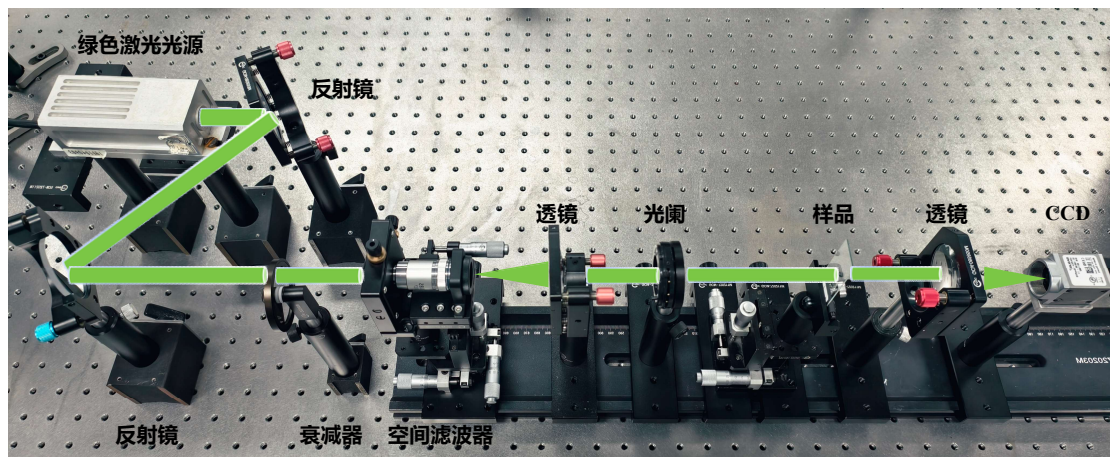


图 4 单波长衍射成像的实验装置

Fig. 4. Experimental setup for single-wavelength diffraction imaging

3.2 近场重建结果

近场实验分别对 USAF1951 分辨率板及生物样品进行成像，用于考察所提方法在标准分辨率目标和复杂结构样品上的重建性能；远场实验则以 USAF1951 分辨率板为测试对象，用于分析不同方法在高频细节恢复、背景抑制及伪影控制方面的差异。近场实验迭代次数取 30 次，远场实验迭代次数取 200 次，最终根据重建得到的振幅图与相位图，对不同方法在边界清晰度、伪影抑制能力和分辨率等方面的性能进行比较分析。

3.2.1 USAF1951 近场重建结果

USAF1951 分辨率板的近场衍射成像重建结果如图 5 所示。图 5(a)—(d)为 EADM 算法的重建结果，其中图 5(a)和图 5(c)分别为恢复得到的振幅图和相位图，图 5(b)和图 5(d)分别为对应虚线框区域的局部放大结果；图 5(e)—(h)为 GFADM 算法的重建结果，其中图 5(e)和图 5(g)分别为恢复得到的振幅图和相位

图，图 5(f)和图 5(h)为对应区域的局部放大结果。图 5(i)和图 5(j)分别给出了结构区域和背景区域的像素分布曲线，用于进一步比较两种算法在局部细节恢复和背景噪声抑制方面的差异。EADM 可分辨第 5 组第 1 单元，对应空间频率为 32 lp/mm，半周期分辨率约为 15.63 μm ；GFADM 可分辨第 5 组第 3 单元，对应空间频率为 40.3 lp/mm，半周期分辨率约为 12.41 μm 。由整体重建结果可以看出，EADM 已能够恢复出分辨率板的主要轮廓和基本条纹结构，但振幅图中仍存在较明显的背景起伏，局部线对区域的边缘过渡相对模糊；相位图中也可观察到一定程度的纹理扰动和残余伪影，使得局部结构的连续性受到影响。

相比之下，GFADM 的振幅重建结果具有更高的背景均匀性，目标区域内的条纹边界更加清晰，细线对之间的分离更加明显。尤其是在图中虚线框选区域内，GFADM 对细线对结构的恢复更完整，条纹间的灰度过渡更自然，说明其对高频细节的保持能力更强。从相位图来看，GFADM 结果整体更加平滑，背景中的无关起伏明显减弱，局部特征与振幅图中的目标结构具有更好的对应关系。进一步结合局部放大图和像素曲线分析可以发现，GFADM 在结构区域内表现出更明显的峰谷变化，周期性线对特征更加突出，而背景区域的像素波动则明显小于 EADM，表明其在提高分辨能力的同时有效抑制了背景噪声。总体来看，GFADM 在分辨率板近场成像中表现出更好的边界保持能力、背景平滑能力和局部分辨能力。

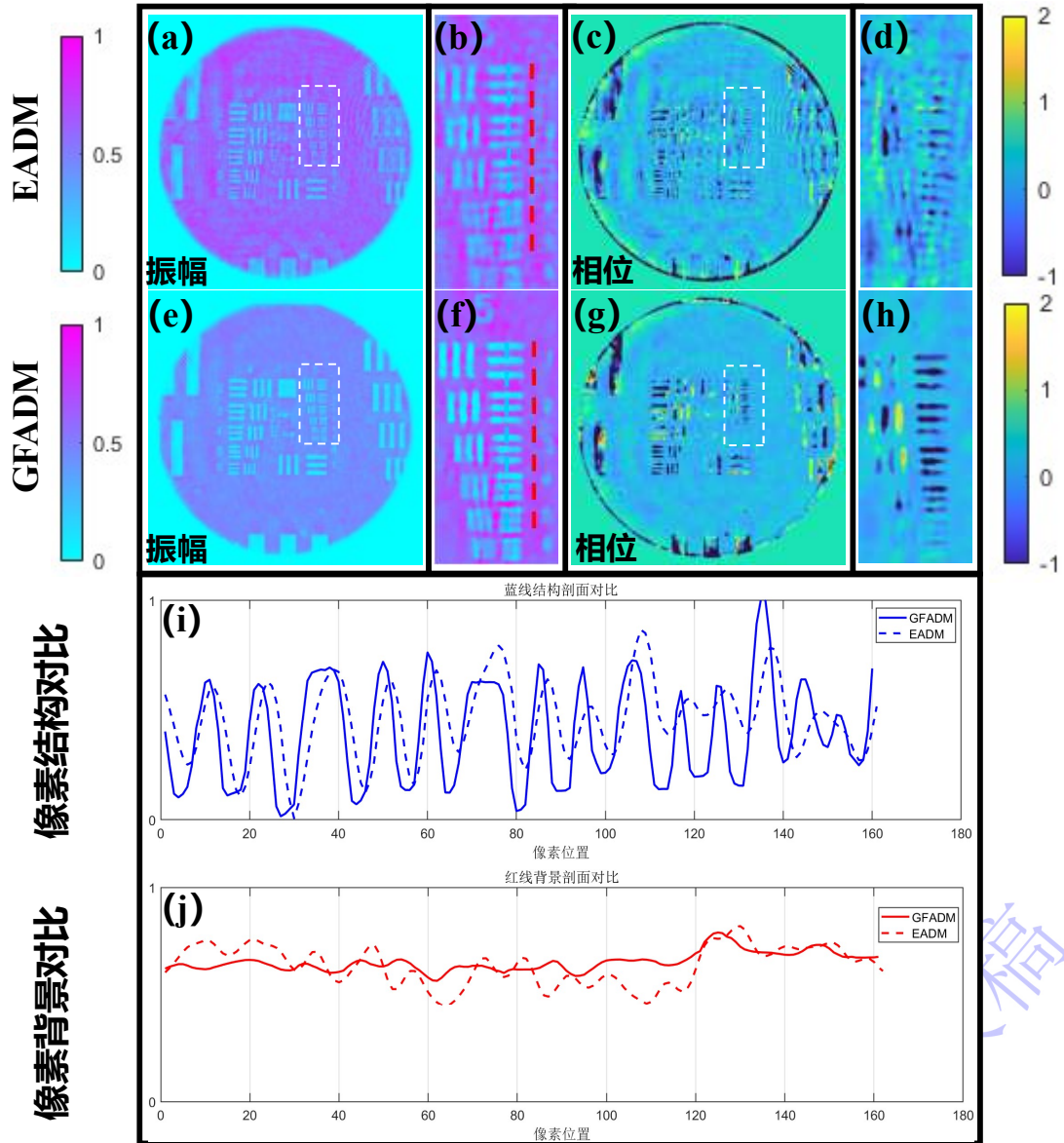


图 5 USAF1951 分辨率板近场衍射成像结果：(a—d) EADM 重建结果，依次为振幅、振幅局部放大、相位和相位局部放大；(e—h) GFADM 重建结果，依次为振幅、振幅局部放大、相位和相位局部放大；(i) 结构区域像素剖面对比；(j) 背景区域像素剖面对比。

Fig. 5. Near-field diffraction imaging results of the USAF1951 resolution target: (a - d) EADM reconstruction results, including amplitude, enlarged amplitude, phase, and enlarged phase; (e - h) GFADM reconstruction results, including amplitude, enlarged amplitude, phase, and enlarged phase; (i) pixel profile comparison of the structural region; (j) pixel profile comparison of the background region.

3.2.2 生物样品近场重建结果

蚊子翅和油菜花粉的近场衍射成像重建结果如图 6 所示。其中，图 6(a)—(d) 为 EADM 算法的重建结果，图 6(a)和图 6(b)分别为蚊子翅的振幅和相位重建结果，图 6(c)和图 6(d)分别为油菜花粉的振幅和相位重建结果；图 6(e)—(h)为 GFADM 算法的重建结果，图 6(e)和图 6(f)分别为蚊子翅的振幅和相位重建结果，图 6(g)和图 6(h)分别为油菜花粉的振幅和相位重建结果，图 6(i)和图 6(j)分别为蚊子翅和油菜花粉的显微镜下的结果。与 USAF1951 分辨率板相比，生物样品内部结构更加复杂，灰度和相位变化更加连续，因此能够更直观地反映不同算法在复杂样品重建中的噪声抑制、伪影控制和结构保持能力。

由图 6(a)—(d)可以看出，EADM 算法能够恢复出蚊子翅和油菜花粉的整体轮廓及主要内部结构，但重建结果中仍存在一定程度的背景扰动和局部伪影。对于蚊子翅样品，EADM 振幅图中翅脉结构可以被辨认，但局部纹理对比度相对较低，背景区域仍有细微起伏；其相位图中存在较明显的环状边界扰动和局部条纹状伪影。对于油菜花粉样品，EADM 能够恢复出花粉颗粒的整体形貌，但振幅图中颗粒状噪声较为明显，相位图中也存在较强的散斑干扰，使得局部结构的连续性和细节辨识度受到一定影响。

相比之下，GFADM 算法在两类生物样品的重建中均表现出较好的结构保持和背景抑制能力。对于蚊子翅样品，如图 6(e)和图 6(f)所示，GFADM 重建的振幅图中翅脉轮廓更加清晰，背景起伏有所减弱；相位图中的环状扰动和无关纹理干扰得到一定抑制，样品主体结构更加连续。对于油菜花粉样品，如图 6(g)和图 6(h)所示，GFADM 在保持花粉整体形貌和内部颗粒结构的同时，降低了部分背景噪声和伪影干扰，使局部结构分布更加稳定。需要指出的是，由于油

菜花粉本身具有较复杂的颗粒状结构，其重建结果中仍保留一定的局部高频变化，这部分既包含样品真实细节，也可能包含残余噪声，因此对复杂生物样品的评价应结合结构连续性、背景均匀性和局部细节保持情况综合分析。

综合两类样品的近场重建结果可以看出，GFADM 在保持样品整体轮廓的基础上，对蚊子翅的线状纹理结构和油菜花粉的颗粒状结构均具有较好的恢复能力。与 EADM 相比，GFADM 能够在一定程度上减弱近场重建中的背景扰动和环状伪影，提高复杂样品振幅和相位结果的结构一致性。上述结果表明，将引导滤波先验嵌入 ADM 迭代过程，有助于提升复杂生物样品近场衍射成像中的重建稳定性和结构保真度。

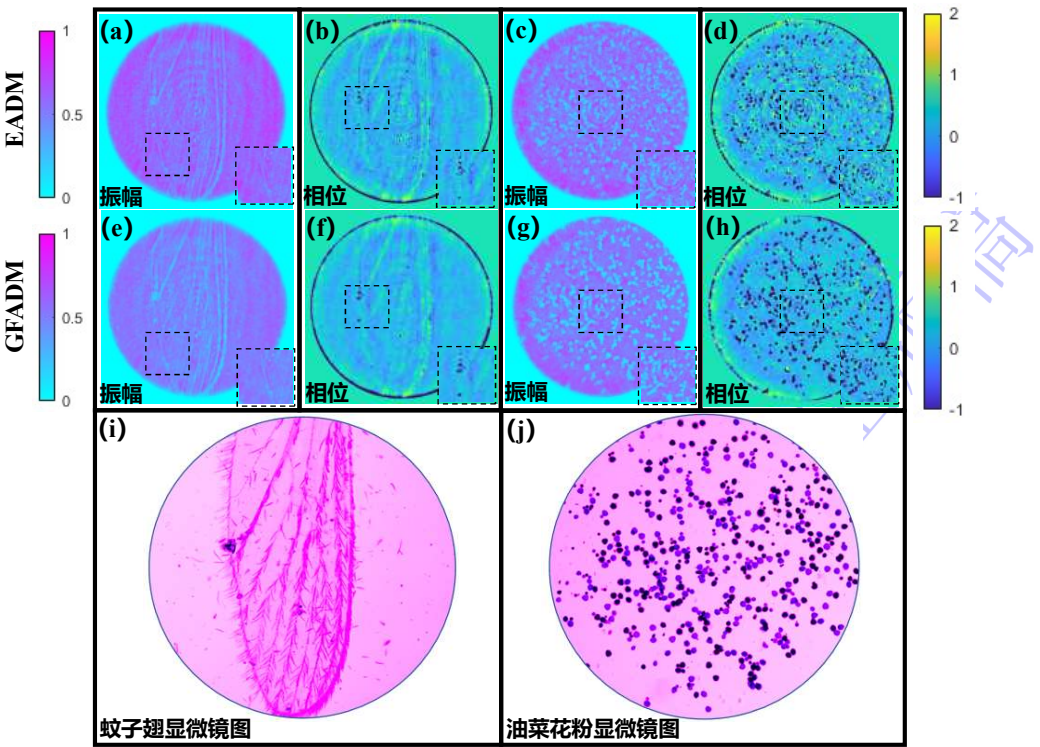


图 6 蚊子翅和油菜花粉近场衍射成像结果：(a—d) EADM 重建结果，依次为蚊子翅振幅、蚊子翅相位、油菜花粉振幅和油菜花粉相位；(e—h) GFADM 重建结果，依次为蚊子翅振幅、蚊子翅相位、油菜花粉振幅和油菜花粉相位；(i)蚊子翅显微镜图；(j)油菜花粉显微镜图

Fig. 6. Near-field diffraction imaging results of mosquito wing and rapeseed pollen: (a – d) EADM reconstruction results, including mosquito wing amplitude, mosquito wing phase, rapeseed pollen amplitude, and rapeseed pollen phase; (e – h) GFADM reconstruction results, including mosquito wing amplitude, mosquito wing phase, rapeseed pollen amplitude, and rapeseed pollen phase; (i) optical microscopic image of mosquito wing; (j) optical microscopic image of rapeseed pollen.

3.3 远场重建结果

分辨率板远场衍射成像结果如图 7 所示。其中图 7(a)-(d)为 EADM 的结果，图 7(e)-(h)为 GFADM 的结果，图 7(i)和图 7(j)分别给出了结构区域和背景区域的像素分布曲线，用于进一步分析两种算法在远场条件下的细节恢复能力和背景抑制效果。EADM 可分辨第 4 组第 3 单元，对应空间频率为 20.16 lp/mm，半周期分辨率约为 24.8 μm ；GFADM 可分辨第 4 组第 6 单元，对应空间频率为 28.5 lp/mm，半周期分辨率约为 17.54 μm 。由整体结果可见，两种方法均能够恢复出分辨率板的基本轮廓和主要线对结构，但 EADM 的振幅图仍存在较明显的背景起伏，局部条纹对比度较低，细线对分离不够清楚；其相位图中也存在一定程度的背景扰动，影响了局部结构的连续性。相比之下，GFADM 的振幅图背景更加均匀，条纹边界更清晰，局部放大区域中的线对结构更完整，说明其对高频细节的恢复能力更强。结合像素曲线可以进一步看出，GFADM 的峰谷变化更清晰、周期性更明显，而背景区域波动更小，表明其在提高线对分辨能力的同时有效抑制了背景噪声，说明该方法在远场条件下同样具有良好的稳定性和适用性。

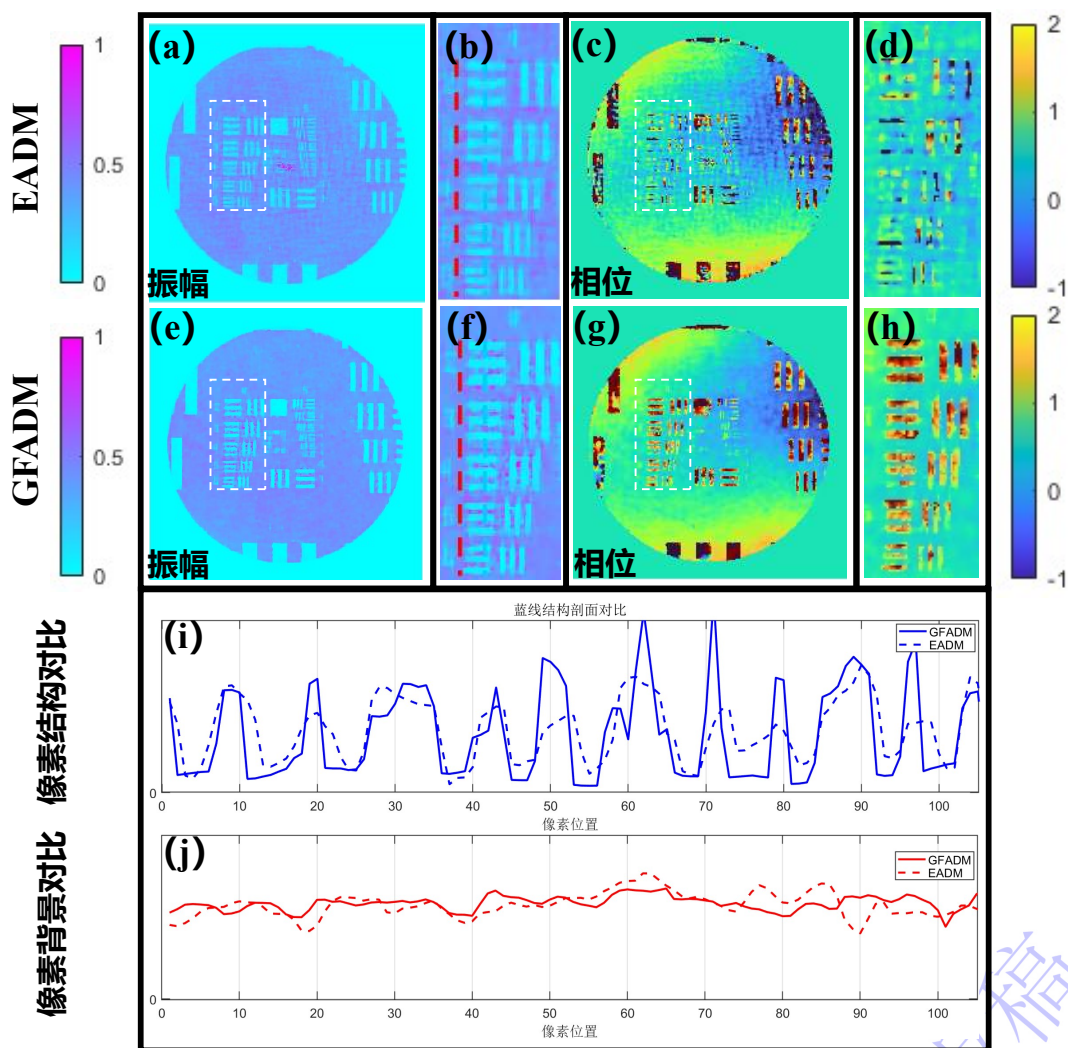


图 7 USAF1951 分辨率板远场衍射成像结果：(a—d) EADM 重建结果，依次为振幅、振幅局部放大、相位和相位局部放大；(e—h) GFADM 重建结果，依次为振幅、振幅局部放大、相位和相位局部放大；(i) 结构区域像素剖面对比；(j) 背景区域像素剖面对比

Fig. 7. Far-field diffraction imaging results of the USAF1951 resolution target: (a – d) EADM reconstruction results, including amplitude, enlarged amplitude, phase, and enlarged phase; (e – h) GFADM reconstruction results, including amplitude, enlarged amplitude, phase, and enlarged phase; (i) pixel profile comparison of the structural region; (j) pixel profile comparison of the background region.

3.4 方法适用性

综合近场和远场实验结果可以看出，本文所提 GFADM 方法在标准分辨率样品和复杂生物样品的相干衍射成像中均表现出较好的重建性能，说明该方法具有较好的适用性。对于近场成像，GFADM 通过在 ADM 物体域更新中引入引导滤波先验，能够有效抑制背景噪声和环状伪影，并改善边界过渡与局部细节恢复。对于远场成像，由于衍射能量更加集中于频谱中心，高阶频率信息较弱，单幅衍射图更容易受到过曝和噪声影响，因此重建过程对先验约束和抗噪能力更为敏感。单次 CDI 相位恢复属于非凸反问题，在仅记录衍射强度的条件下，重建结果仍可能受到初始估计、支撑约束、测量噪声和实验稳定性等因素影响，因此相位结果中可能存在一定残余伪影和局部波动。本文主要在相同实验数据和相同重建条件下比较 GFADM 相对于 EADM 的改进效果。后续工作将进一步结合隔振优化、多次采集平均、多距离约束或叠层冗余约束，以进一步提高相位恢复的稳定性和可靠性。

4 结论

本文提出了一种引导滤波增强的交替方向法相干衍射成像方法。该方法在传统 ADM 框架中引入引导滤波先验，并结合振幅引导相位更新与分段递减的滤波强度调度，实现了迭代前期噪声抑制与后期细节保持的有效平衡。近场、远场实验结果表明，所提方法能够有效抑制噪声传播和伪影累积，提高边界清晰度和线对对比度，改善局部结构可辨识度 and 结构保真度，并在不同成像条件下表现出良好的稳定性与适用性，为高分辨率复振幅重建提供了一种有效方法。

参考文献

- [1] Luke D R 2005 *Inverse Probl.* **21** 37
- [2] Shechtman Y, Eldar Y C, Cohen O, Chapman H N, Miao J, Segev M 2015 *IEEE Signal Process. Mag.* **32** 87
- [3] Miao J, Charalambous P, Kirz J, Sayre D 1999 *Nature* **400** 342
- [4] Li J, Zhang Y, Poon T C 2024 *Opt. Lasers Eng.* **173** 107898
- [5] Fienup J R 1982 *Appl. Opt.* **21** 2758
- [6] Sayre D 1952 *Acta Crystallogr.* **5** 843
- [7] Gerchberg R W, Saxton W O 1972 *Optik* **35** 237
- [8] Zuo J M, Vartanyants I, Gao M, Zhang R, Nagahara L A 2003 *Science* **300** 1419
- [9] Zhang R F, Li H Y, Sun Y X, Fei L, Liu X R, Ning C Q, Xu X C, Liu Z J, Liu W 2024 *Opt. Lasers Eng.* **175** 108028
- [10] Latychevskaia T, Longchamp J N, Fink H W 2012 *Opt. Express* **20** 28871
- [11] Yang C, Xu C, Lan J, Pang H, Yan W, Zhao L X, Hu S, Tang Y, Zhu X C 2025 *Opt. Lasers Eng.* **193** 109057
- [12] Marchesini S 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 3289
- [13] Wen Z W, Yang C, Liu X J, Marchesini S 2012 *Inverse Probl.* **28** 115010
- [14] Bao P, Zhang F C, Pedrini G, Osten W 2008 *Opt. Lett.* **33** 309
- [15] Wang D, Ma Y J, Liu Q, Shi Y S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084203 (in Chinese) [王东, 马英俊, 刘全, 史伟诗 2015 物理学报 **64** 084203]
- [16] Liu Y Y, Liu Q W, Li Y, Xu B X, Zhang J Y, He Z Y 2021 *Opt. Express* **29** 7197
- [17] Li S, Chen Y Q, Huang L, Wang Q X, Zhao Y H, Pan A, Shi Y S 2025 *Opt. Commun.* **592** 132223
- [18] He K M, Sun J, Tang X O 2013 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **35** 1397
- [19] Qiao Z L, Wen X, Zhou X Y, Qin F, Liu S T, Gao B, Liu W, Chi D Z, Liu Z J 2023 *Opt. Lasers Eng.* **160** 107233
- [20] Abe M, Takazawa S, Uematsu H, Sasaki Y, Okawa N, Ishiguro N, Takahashi Y 2024 *Optica* **11** 1708
- [21] Zhu S J, Yu Z K 2020 *IET Image Process.* **14** 2561
- [22] Li S T, Kang X D, Hu J W 2013 *IEEE Trans. Image Process.* **22** 2864
- [23] Hao S J, Pan D R, Guo Y R, Hong R C, Wang M 2016 *Signal Process.* **120** 789
- [24] Wang L, Jeon G 2015 *IEEE Signal Process. Lett.* **22** 2083
- [25] Kiku D, Monno Y, Tanaka M, Okutomi M 2016 *IEEE Trans. Image Process.* **25** 1288

Guided-filtering-enhanced ADM coherent diffraction imaging*

ZHANG Tianhao^{1) #} GUO Guangyan^{3) #} LI Su¹⁾ DENG Kaiyu²⁾ WU Haoyu³⁾

JIA Tianlei¹⁾ XIONG Peixiang²⁾ SHI Yishi^{2) 3)}†

1) (School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of

Engineering, Handan 056038, China)

2) (School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,

China)

3) (Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094,

China)

Abstract

Coherent diffraction imaging (CDI) reconstructs the complex-valued object of a sample from measured diffraction intensities, but its phase retrieval performance is often affected by measurement noise and insufficient prior constraints. To address these problems, a guided-filter-enhanced alternating direction method (GFADM) is proposed. In this method, guided filtering is embedded into the ADM iterative framework as a structure-preserving prior, and a filtering step is introduced between the measurement projection and the object-domain support projection to improve noise suppression and artifact control. For samples with distinct absorption boundaries or pronounced amplitude structures, the amplitude estimate is first processed by self-guided filtering, and the filtered amplitude is then used as a guidance image to assist phase updating. This strategy helps improve the structural consistency between the reconstructed amplitude and phase. In addition, a piecewise decreasing filtering-strength schedule is adopted to balance denoising and detail preservation: stronger filtering is applied in the early iterations to suppress noise propagation and stabilize the reconstruction, whereas

weaker filtering is used in the later iterations to retain fine structural details. Near-field and far-field CDI experiments demonstrate that the proposed method can effectively suppress noise propagation and artifact accumulation, reduce background fluctuations, and improve the distinguishability of local structures. Compared with the enhanced ADM (EADM), GFADM produces clearer line-pair features, higher line-pair contrast, and better structural fidelity. These results indicate that the proposed method achieves a good balance between noise suppression and detail preservation, and exhibits stable reconstruction performance under different imaging conditions.

Keywords: coherent diffraction imaging, guided filtering, alternating direction method, phase retrieval

PACS: 42.30.Rx,42.30.Kq,42.30.Wb,42.25.Fx

* National Natural Science Foundation of China (62131011); National Key Research and Development

Program of China (2021YFB3602604); Fusion Foundation of Research and Education of CAS;

University of Chinese Academy of Sciences; Fundamental Research Funds for the Central Universities.

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail:shiyishi@ucas.ac.cn

The first author.E-mail:heu_zhangtianhao@163.com

Co-first author.E-mail:guogy@aircas.ac.cn

非最终出版稿
录用稿件，