

可见光域叠层成像中照明光束的关键参量研究*

王雅丽¹⁾ 史祎诗^{1)2)†} 李拓¹⁾ 高乾坤¹⁾ 肖俊¹⁾ 张三国¹⁾

1) (中国科学院大学, 北京 100049)

2) (中国科学院信息工程研究所, 信息安全国家重点实验室, 北京 100093)

(2012年8月1日收到; 2012年11月21日收到修改稿)

研究了可见光域叠层成像中照明光束的系列关键参量对成像质量的影响. 利用叠层成像迭代恢复算法, 通过模拟实验研究了照明光束的交叠率、光束尺寸以及几何形状对成像恢复质量的相互制约关系. 模拟结果表明, 光束的交叠率是影响成像恢复质量的主要因素, 光束的形状主要影响成像的收敛速度, 而光束尺寸对成像的恢复质量以及收敛速度直接影响较小. 因此, 通过模拟可以对可见光域、X射线以及电子波段等其他波段的实验进行系统优化照明光束参数起到一定的理论指导作用.

关键词: 相干衍射, 叠层成像, 相位恢复

PACS: 42.30.-d, 42.25.Fx, 42.30.Rx, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.62.064206

1 引言

基于叠层成像 (ptychography) 原理的扫描相干衍射成像方法是由 Hoppe^[1,2] 为了研究晶体结构所提出的, 并通过研究晶体和非晶体的扫描透射电子衍射显微成像, 验证了此方法的有效性. Rodenburg 和 Faulkner 等^[3,4] 结合相位恢复算法将此方法多次改进, 目前这种成像方法已在可见光域、X射线、电子显微镜等不同波段得到了实验证实^[5-10], 并发展出若干种技术以提高成像质量以及分辨率^[4,11,12], 该技术显示了在大幅面成像和高分辨成像方面的巨大潜力. 叠层成像术是通过改变照明光束和样品的相对位置, 获得系列交叠区域的衍射图样, 恢复得到样品的复振幅分布. 与传统的衍射成像相比, 此成像系统无须透镜, 不但避免了透镜的像差对成像恢复质量的影响, 而且也消除了数值孔径对样品尺寸的限制; 由于“层”与“层”之间的约束, 样品的复振幅是所有“层”的共解, 因此不但成像恢复的收敛速度快, 而且也消除了正确解和复共轭之间的二义性. 叠层成像术可以说是一种稳健而简约的显微成像技术. 但目前最突出的问题在于其

成像效率与质量之间的矛盾. 为了进行可见光波段的实验, 本文系统地研究了照明光束的交叠率、光束尺寸、噪声以及几何形状等因素对成像质量的综合影响. 通过模拟实验研究获得了叠层成像中影响成像恢复质量的照明光束的关键参数及相互制约关系. 研究结果对可见光域、X射线以及电子波段等其他波段的实验的应用均具有一定的指导作用.

2 理论分析

2.1 叠层成像的基本原理

为了获取待测样品的复振幅信息, 移动一个全透的小孔 (或样品本身) 使入射平面波照射到样品的不同部位, 即由小孔控制照明光束尺寸、几何形状及位置, 并利用由此得到的一系列衍射强度图样重构出样品的振幅与位相信息, 如图 1(a)—(c) 所示. 叠层成像术的关键在于: 每次照射样品的一个“层”也就是样品的某一部分时, 都要和至少一个其他的“层”发生交叠. 图 1(b) 为 4 行 4 列的照明光束交叠位置的示意图. 这样就可建立一种重构算法,

* 国家自然科学基金 (批准号: 60907004)、中国科学院优博论文启动基金、中国科学院研究生院院长基金、中国科学院科教结合项目及香港王宽诚教育基金会资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: sysopt@126.com

在分别重构每“层”的复振幅时也要同时满足其他“层”衍射分布的约束,使得最后的样品的整体复振幅信息是所有“层”的共同解.图 1(c)表示叠层成像所恢复的振幅.

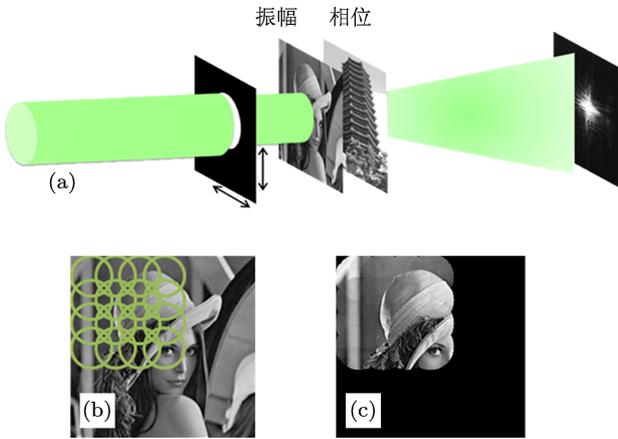


图 1 叠层成像的基本原理 (a) 光路; (b) 小孔交叠位置; (c) 叠层成像所恢复的振幅

2.2 叠层成像的迭代算法 [13]

由基本原理可知,叠层成像的迭代恢复算法是通过多“层”衍射图样的强度恢复得到物面的复振幅信息.与大多数相位恢复算法不同的是:重构每“层”的复振幅时,受其他“层”衍射分布的约束,可以快速得到准确解,因此,该迭代恢复算法具有收敛速度快、可消除解的二义性等优点.利用迭代恢复算法获得的物面的复振幅信息取决于像面的衍射分布.而像面的衍射分布决定于孔的复透射函数.设 $P(\mathbf{r})$ 为孔的复透射函数,即照明函数,物体的复振幅分布函数为 $O(\mathbf{r})$,因此,透过物体的光场的波函数为 $\Psi(\mathbf{r}) = P(\mathbf{r})O(\mathbf{r})$. \mathbf{R}_i 是照明光束第 i 个位置相对于前一次移动的矢量, n 为迭代次数.第一次迭代时,物体的复函数 $O(\mathbf{r})$ 是随机分布的.通过已知的照明函数和随机分布的物函数可得透射波函数为

$$\Psi_{ni}(\mathbf{r}) = P(\mathbf{r})O_n(\mathbf{r} + \mathbf{R}_i). \quad (1)$$

由快速傅里叶变换得到透射波在远场的振幅和相位分布:

$$A_{ni}(\mathbf{q}) \exp(i\phi_{ni}(\mathbf{q})) = \text{FFT}[\Psi_{ni}(\mathbf{r})]. \quad (2)$$

经过逆快速傅里叶变换可以得到一个新的输出波函数:

$$\Psi_{n,l,\text{new}}(\mathbf{r}) = \text{IFFT}[A_{ni}(\mathbf{q}) \exp(i\phi_{ni}(\mathbf{q}))]. \quad (3)$$

在入射波平面,用一个新的物函数代替上一步得到的物函数:

$$\begin{aligned} & O_{n+1}(\mathbf{r} + \mathbf{R}_i) \\ &= O_n(\mathbf{r} + \mathbf{R}_i) + \beta \frac{P(\mathbf{r})}{P(\mathbf{r}) + \alpha} \\ & \quad \times (\Psi_{n,l,\text{new}}(\mathbf{r}) - \Psi_{n,l}(\mathbf{r})), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, α, β 为调节因子, α 为了调节分母不等于 0, β 是一个反馈参数,一般取值范围为 [0.9, 1]. 在以下的模拟中 $\alpha = 0.01, \beta = 1$.

叠层成像算法每次用一个已知的照明光束乘以一个物函数,相邻位置的照明光束之间都是有交叠的,进行多次迭代,求得所有“层”的共解,消除了解的二义性.对每个位置的衍射分布进行相位恢复时都进行了约束,因此相对于传统的相位恢复算法,收敛速度提高较大.

可用相关系数 (correlation coefficient, Co) 和均方差 (mean square error, MSE) 评价成像的恢复质量 [14]. Co 是表示恢复图像与原始图像相关关系密切程度的指标,用 Co 值来评价恢复图像的质量,从而判定光束的几项参数对于图像质量的影响.

$$Co(g, g_0) = \text{cov}(g, g_0) (\sigma_g \cdot \sigma_{g_0})^{-1}, \quad (5)$$

其中, $\text{cov}(g, g_0)$ 表示恢复图像信息 g 和原始图像信息 g_0 之间的互协方差, σ 为标准偏差 Co 取值范围为 [0, 1], 其越接近 1 表明图像的恢复质量越高.需注意的是,运用 Co 判定复振幅分布时,须分别对比两者的实部与虚部,或者振幅与位相.

用输入图像和输出图像之间的 MSE 来评价图像输入端到输出端的质量,进而反映各参数对图像恢复质量的影响. MSE 的数学定义式为

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |P(i, j) - P'(i, j)|^2, \quad (6)$$

其中, $M \times N$ 为图像的大小, $P(i, j)$ 表示原始图像, $P'(i, j)$ 表示恢复图像. MSE 越接近 0 表明恢复图像越接近原始图像,成像的恢复质量越高,与评价参数 Co 相同,运用 MSE 评价复振幅时,分别对比振幅和相位.

Co 和 MSE 从不同角度揭示了所恢复出样品区域的单位面积上的相对误差量.根据 (6) 式可知,直接可从分母中含有面积的净像素数容易看出, MSE 描述的相对误差是其对单位面积的折算.而 Co 值域为 [0, 1], 即其具有归一化的属性,但是也并不影响其反映相对误差的客观性.

2.3 照明光束的关键参数

成像恢复质量和照明光束的几何形状及尺寸等参数有关, 照明光束的几何形状以及尺寸在模拟和实验中均容易由小孔控制.

由叠层成像的迭代算法可知成像的恢复质量还与层与层的交叠面积有关系, 而计算绝对交叠面积对于不同形状的孔有不同的计算公式, 为了简单而又能说明问题, 我们定义了一个参数表示相对交叠区域的大小. 这个参数是一个线性的补偿距离. 设圆孔的半径是 r , 两个圆孔的圆心与圆心之间的距离为 $a \in [0, 2r]$. 定义绝对交叠区域参数是 $\delta_{\text{abs}} = 2r - a$. 因此相对交叠率定义为^[13]

$$\delta = (1 - a/2r) \times 100\%. \quad (7)$$



图2 样品和孔的示意图 (a) 样品的振幅; (b) 样品的相位; (c) 圆孔; (d) 方孔; (e) 六边形孔

3.1 交叠率不同对成像质量的影响

首先模拟均采用圆孔控制波前时交叠率不同对成像恢复质量的影响. 取孔的直径为 64 pixels ($1 \text{ pixel} = 8 \mu\text{m}$), 第一个孔的起始位置为左上角, 向右依次移动. 为了比较交叠率不同带来的恢复质量的差异, 我们模拟了 8 种不同相对交叠率的情况. 每次圆心移动 $(64 - n \times 8)$ pixels, $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$. 根据 (7) 式, 相对应的相对交叠率分别 0%, 12.5%, 25.0%, 37.5%, 50.0%, 62.5%, 75.0%, 87.5%. 利

3 模拟实验及分析

模拟实验中采用样品的振幅和相位分别为图 2(a), (b) 所示的“Lena”和“Tower”, 采样点数均为 $256 \text{ pixels} \times 256 \text{ pixels}$. 图 2(c), (d) 和 (e) 分别为模拟过程中采用的圆孔、方孔和六边形孔的形状示意图. 激光波长取 532 nm, 孔的移动扫描均为 4 行 4 列, 如图 1(b) 所给出的照明光束阵列的位置示意图. 通过移动小孔控制照明光束, 获得 16 幅衍射强度分布图样, 利用叠层迭代相位恢复算法获得样品的振幅和相位信息.

用叠层迭代相位恢复算法迭代 200 次以后获得对应的振幅信息和相位信息, 分别如图 3 和图 4 所示. 由振幅和相位的恢复图像可以直观地看出: 恢复质量均随着交叠率的增加而增加. 当相对交叠率达到 50% 时, 可以获得较好的复振幅分布. 但是当交叠率继续增大, 通过振幅和相位分布就难以分辨出成像质量是否变得更好.

为了量化相对交叠率的不同对成像恢复质量的影响, 计算了振幅和相位的相关系数 C_o 值以及均方差 MSE, 如图 5 和图 6 所示.

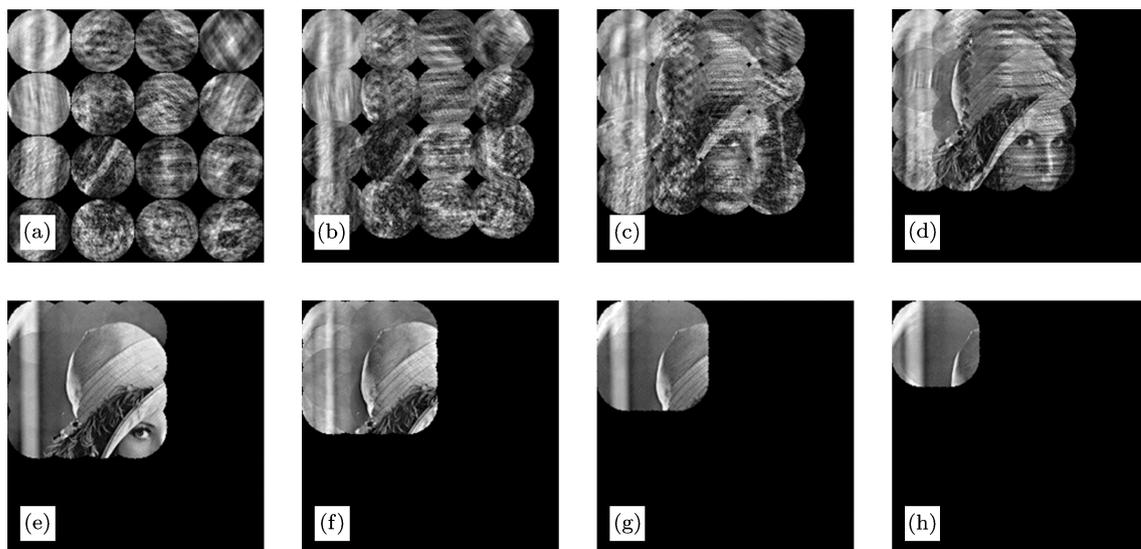


图3 迭代 200 次, 圆孔交叠率不同时的振幅 (a) 0%; (b) 12.5%; (c) 25.0%; (d) 37.5%; (e) 50.0%; (f) 62.5%; (g) 75.0%; (h) 87.5%

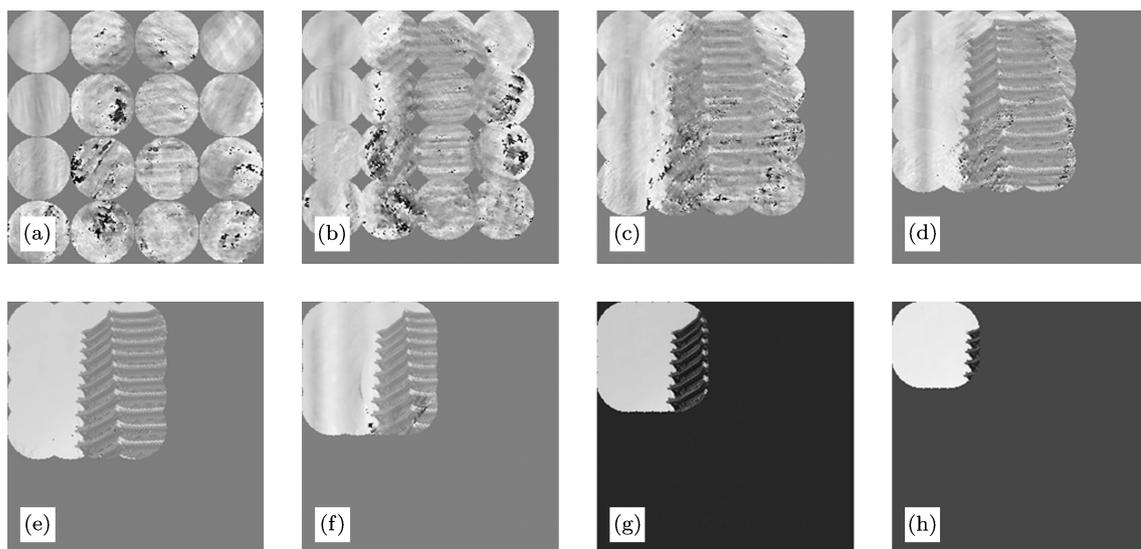


图4 迭代 200 次, 圆孔交叠率不同时的相位 (a) 0%; (b) 12.5%; (c) 25.0%; (d) 37.5%; (e) 50.0%; (f) 62.5%; (g) 75.0%; (h) 87.5%

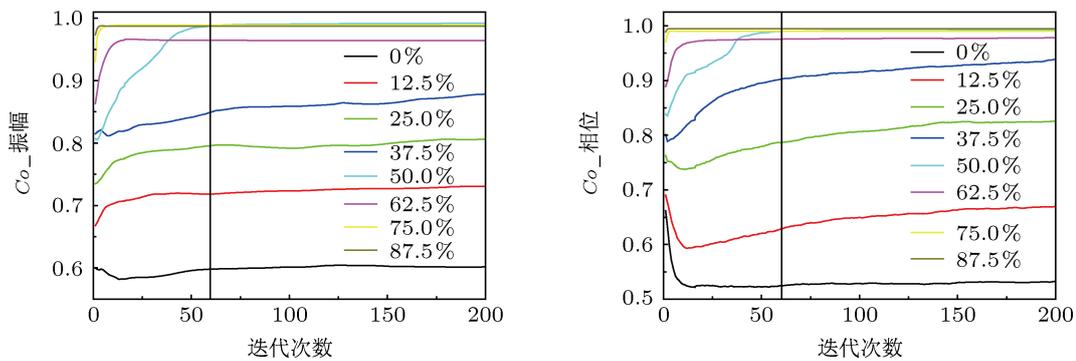


图5 采用圆孔控制波前时, 200 次迭代后不同交叠率的振幅和相位的相关系数

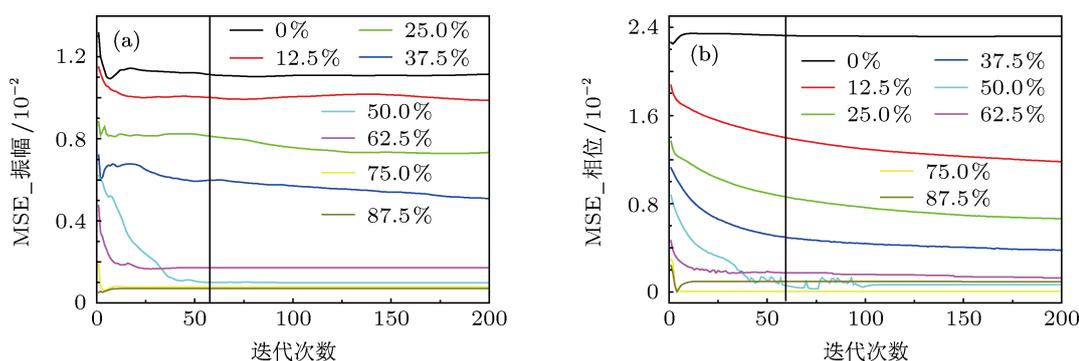


图6 采用圆孔控制波前时, 200次迭代后不同交叠率的振幅和相位的均方差

表1 迭代60次时振幅的相关系数与均方差

	$\delta = 0.0\%$	$\delta = 12.5\%$	$\delta = 25.0\%$	$\delta = 37.5\%$	$\delta = 50.0\%$	$\delta = 62.5\%$	$\delta = 75.0\%$	$\delta = 87.5\%$
相关系数 C_o	0.59798	0.71858	0.79587	0.84957	0.98767	0.96456	0.98876	0.98731
均方差 MSE	0.01111	0.01001	0.0081	0.00598	0.001	0.00171	0.00079	0.0007

表2 迭代60次时, 相位的相关系数与均方差

	$\delta = 0.0\%$	$\delta = 12.5\%$	$\delta = 25.0\%$	$\delta = 37.5\%$	$\delta = 50.0\%$	$\delta = 62.5\%$	$\delta = 75.0\%$	$\delta = 87.5\%$
相关系数 C_o	0.52515	0.62867	0.7864	0.90276	0.98956	0.97568	0.98995	0.99497
均方差 MSE	0.02324	0.01397	0.00859	0.00494	0.00057	0.00176	0.00005	0.00094

由振幅和相位的相关系数关系可知: $\delta = 0\%$, 即照明光束在不同的位置没有相互交叠, 相当于普通的衍射成像, C_o 值较低, MSE 较大, 恢复图像几乎无法辨认; $\delta = 87.5\%$ 时, 稳定后相位的 C_o 值最大, 振幅的 MSE 最小, 振幅和相位得收敛速度均最快, 迭代 5 次后, C_o 和 MSE 就趋于平稳. 由表 1 和表 2 可知, 当相对交叠率达到 50% 及以上后, 迭代 60 次时, 成像的振幅和相位的 C_o 值均大于 0.95, MSE 均小于 1×10^{-3} , 表明获得了较好的成像恢复质量. 但是交叠率 50% 时的收敛速度明显低于相对交叠率大于 50% 的情况. 上述结果表明, 交叠率

的增大, 不但可以提高成像质量, 而且可以提高收敛速度, 交叠率是影响成像质量的关键参数.

通过研究大量的相同面积不同复振幅分布的成像样本, 以上的结论均得到了良好的验证, 并且基于相关系数和均方差这两个量化指标的相关结论都显示了很好的一致性.

随着交叠率的增大, 成像的有效恢复面积减小, 定义照明函数照射的有效区域即可恢复的成像面积大小为 E , 样品大小为 S , 因此, 可恢复成像面积占总图像面积的比值为恢复效率 e , 公式表示如下:

$$e = E/S. \tag{8}$$

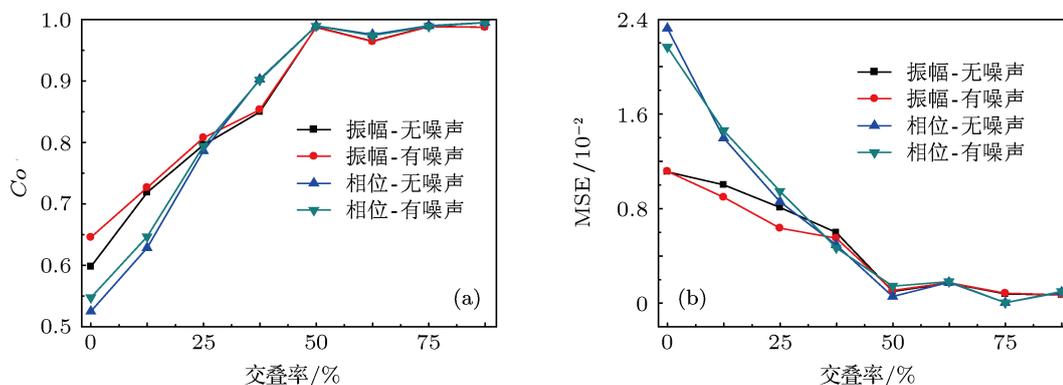


图7 迭代60次, 有噪声和无噪声时, 振幅和相位的相关系数与均方差

根据 (8) 式可知, 提高照明光束的相对交叠率 δ , E 减小, 虽然提高了成像的质量和收敛速度, 但是却损失了成像的有效面积. 因此, 在实验中需要优化以上两个参数.

接下来模拟了叠层成像恢复算法对抗噪声的能力. 将系数为 0.1 的随机噪声分布到衍射图样上, 模拟了交叠率从 0—87.5% 的振幅和位相分布, 直观的效果与图 3 和图 4 并无差异. 图 7 给出了迭代 60 次时无噪声和有噪声两种情况的成像振幅和相位的相关系数与均方差. 结果表明, 相关系数值和均方差基本无变化. 这说明, 这种成像算法对抗噪

声的效果很好.

3.2 光束尺寸不同对成像质量的影响

模拟相对交叠率相同时, 照明光束尺寸不同对成像恢复质量的影响. 我们选取了四种不同直径的圆孔, 孔的直径大小分别为: 160, 120, 80, 40 pixels. 每次圆心移动的大小为圆孔直径的 20%, 则根据 (5) 式相对交叠率为 80%. 图 8 和图 9 是恢复得到的振幅和相位图. 由 3.1 可知, 光束的交叠率达到 50% 以上, 都可以获得质量较高的图像. 从图 7 和图 8 中难以直观地分辨恢复图像的质量差别.

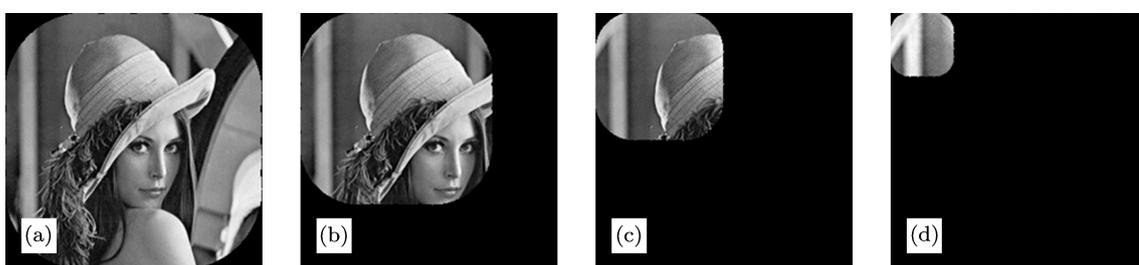


图 8 迭代 200 次, 孔径不同, 交叠率相同时的振幅图 (a) 160 pixels; (b) 120 pixels; (c) 80 pixels; (d) 40 pixels

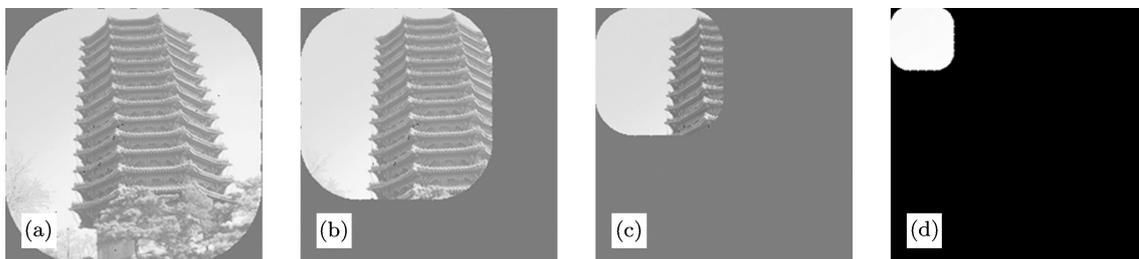


图 9 迭代 200 次, 孔径不同, 交叠率相同时的相位图 (a) 160 pixels; (b) 120 pixels; (c) 80 pixels; (d) 40 pixels

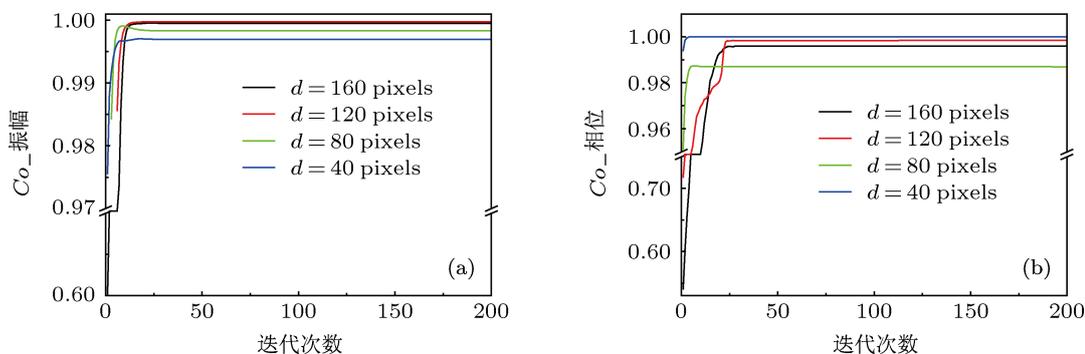


图 10 交叠率相同、不同孔径、200 次迭代后的振幅和相位的相关系数 (a) 振幅; (b) 相位

振幅和相位的相关系数以及均方差可以量化光束尺寸的不同对成像恢复质量的影响, 如图 10 和图 11 所示. 由相关系数值可知, 四种不同直径的情

况, 振幅的 C_o 值均在 0.995 以上. 直径为 40 pixels 的 MSE 值最大, 迭代 20 次稳定后为 1.5112×10^{-3} . 而且四种情况下, 成像的收敛速度都较快. 通过以

上关系可知,当交叠率相同时,照明光束尺寸对成像的恢复质量和收敛速度直接影响均不大.

因此,实验中可以尽量增大光束尺寸,提高图像的恢复效率.

3.3 几何形状不同对成像质量的影响

最后模拟了圆孔、正方形孔和正六边形孔三种不同的几何形状的照明光束对成像质量的影响.圆孔直径、正方形边长以及正六边形的对角线均为 160 pixels,交叠率均为 80%.图 12 和图 13 是恢复得到的振幅和相位图.三种不同形状的光束都获得了高质量的恢复图像.

图 14 和图 15 是为了量化照明光束形状对成像质量的影响,计算得到的相关系数和均方差的关系图.方孔的收敛速度明显低于圆孔和六边形孔的速度(如图 14 所示),振幅和相位的 MSE 关系也反映了同样的收敛速度关系,相比方孔和六边形孔,圆孔相位的 MSE 收敛速度更快,平稳值更低(如图 15 所示).六边形孔和圆孔在迭代 20 次后, Co 值趋近于 1,随后平稳.方孔迭代 120 次以后, $Co = 0.99704$,与另外两种形状孔的 Co 接近.由此可知,光束的形状主要影响图像恢复的收敛速度.综合考虑三种不同形状的照明光束对成像质量和收敛速度的影响,圆形光束和六边形光束的效果要好于方形光束.

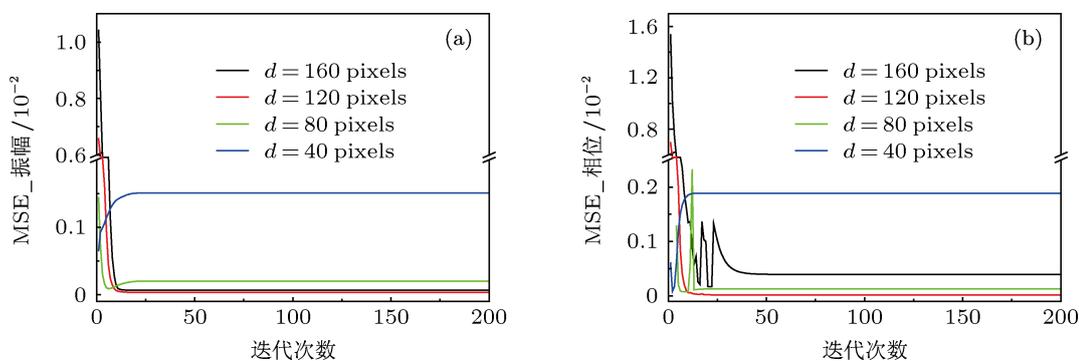


图 11 交叠率相同、不同孔径、200 次迭代后的振幅和相位的均方差 (a) 振幅; (b) 相位



图 12 迭代 200 次、三种形状的照明光束交叠率均为 80%时的振幅 (a) 圆孔; (b) 方孔; (c) 六边形

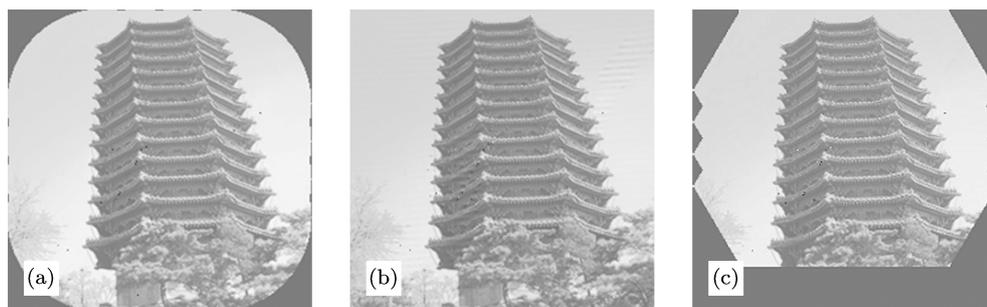


图 13 迭代 200 次、三种形状的照明光束交叠率均为 80%时的相位图 (a) 圆孔; (b) 方孔; (c) 六边形

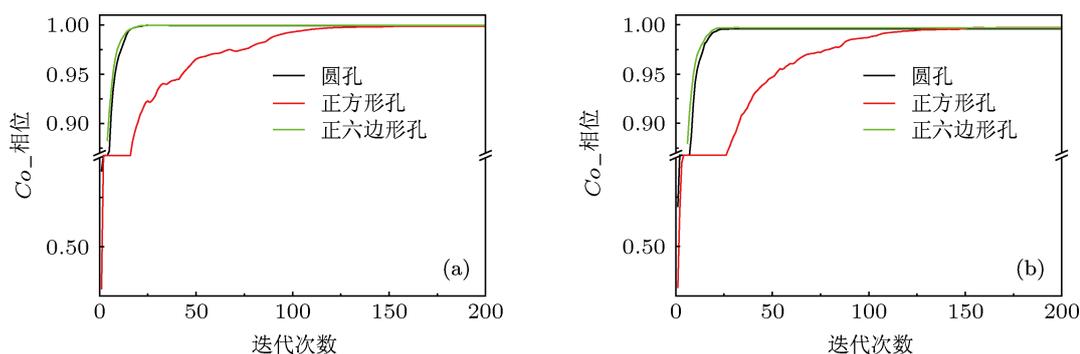


图 14 迭代 200 次、交叠率均为 80%, 三种形状照明光束的振幅和相位的相关系数 (a) 振幅; (b) 相位

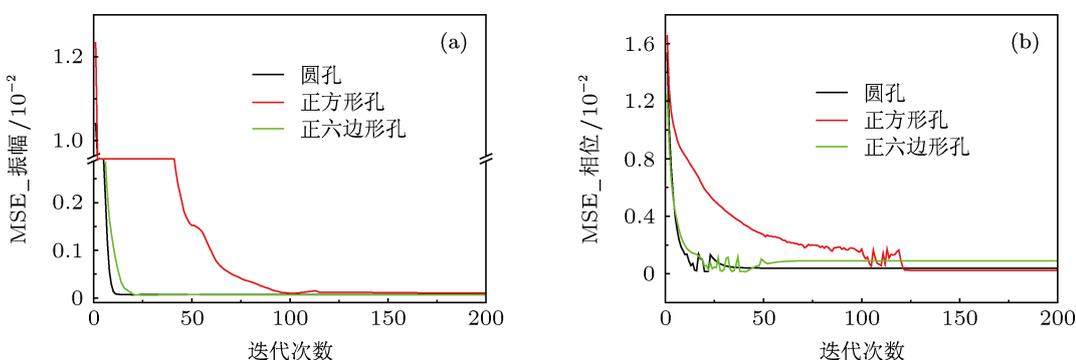


图 15 迭代 200 次、交叠率均为 80%, 三种形状照明光束的振幅和相位的均方差 (a) 振幅; (b) 相位



图 16 正方形孔、圆孔和六边形孔的夫琅禾费衍射图样

为了解释这一现象, 计算了与三种不同形状孔的夫琅禾费衍射图样^[15,16], 如图 16 所示. 由三种的衍射图像比较可知, 圆孔和六边形孔由低频到高频在 360° 方向都包含信息, 而方孔的信息分布在 x 方向和 y 方向附近. 方孔相对于圆孔和六边形孔, 远场衍射的信息度降低, 影响了快速找到正确解的速度.

虽然这几种不同形状的孔控制波前通过多次迭代, 都能达到较高的图像恢复质量, 但是如果将这种成像技术应用于实时成像, 很明显, 采用圆形

孔或者近似于圆形孔的多边形孔控制波前, 效果较好. 在可见光实验中, 找一个理想的圆对称孔不容易做到, 可以做成多边形的孔, 这就是为什么很多可见光实验中, 可以采用光阑控制光束.

4 结论

本文利用叠层成像的迭代恢复算法, 系统的模拟并分析了照明光束的系列关键参数: 相对交叠率、光束尺寸以及几何形状对成像恢复质量的影响. 模拟结果表明: 交叠率是影响成像质量的关键

因素,当相对交叠区域增大到 50% 及以上时,可以获得高质量的复振幅,但是随着交叠率的上升,恢复效率降低;光束尺寸对成像质量以及收敛速度影响均不大;通过模拟三种不同几何形状的照明光束,发现利用方孔控制光束收敛速度较慢,不适于实时成像,而圆形和六边形的照明光束在迭代 5 次后均可以获得高质量复振幅分布.因此,在实验中尽量采用圆孔或者近似圆对称的多边形孔控制光束,在

尽量增大孔径的基础上,优化交叠率和恢复效率这两个参数,获得高质量的样品的复振幅信息.另外,还模拟了不同交叠率下抗噪声的能力,模拟结果显示是否加入噪声对成像质量几乎无影响,叠层成像算法抗噪声能力非常强.上述结果无论是对可见光还是 X 射线以及电子显微镜等其他波段的显微成像均具有一定的指导意义,并表现了叠层成像应用于实时显微成像领域的潜力.

-
- [1] Hoppe W 1969 *Acta Cryst. A* **25** 495
[2] Hoppe W 1969 *Acta Cryst. A* **25** 508
[3] Rodenburg J M, Faulkner H M L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4795
[4] Faulkner H M L, Rodenburg J M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 023903
[5] Rodenburg J M, Hurst A C, Cullis A G, Dobson B R, Pfeiffer F, Bunk O, David C, Jefimovs K, Johnson I 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 034801
[6] Rodenburg J M, Hurst A C, Cullis A G 2007 *Ultramicroscopy* **107** 227
[7] Thibault P, Dierolf M, Menzel A, Bunk O, David C, Pfeiffer F 2008 *Science* **321** 379
[8] Dierolf M, Menzel A, Thibault P, Schneider P, Kewish M C, Wepf R, Bunk O, Pfeiffer F 2010 *Nature* **467** 436
[9] Humphry M J, Kraus B, Hurst A C, Maiden A M, Rodenburg J M 2012 *Nature Commun.* **3** 730
[10] Pan X C, Lin Q, Liu C, Zhu J Q 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 084216
[11] Maiden A M, Rodenburg J M, Humphry M J 2010 *Opt. Lett.* **35** 2585
[12] Guizar-Sicairos M, Fienup J R 2008 *Opt. Express* **16** 7264
[13] Bunk O, Dierolf M, Kynde S, Johnson I, Marti O, Pfeiffer F 2008 *Ultramicroscopy* **108** 481
[14] Shi Y S, Situ G H, Zhang J J 2008 *Opt. Lett.* **33** 542
[15] Li J C, Xiong B H 2009 *Theory and Computation on Information Optics* (Beijing: Science Press) p65 (in Chinese) [李俊昌,熊秉衡 2009 信息光学理论与计算(北京:科学出版社)第 65 页]
[16] Wang L Z, Cheng T M, Qi S 2011 *J. Jimusi Univ. (Natural Science Edition)* **29** 135 (in Chinese) [王丽芝,成泰民,祁烁 2011 佳木斯大学学报(自然科学版) **29** 135]

Research on the key parameters of illuminating beam for imaging via ptychography in visible light band*

Wang Ya-Li¹⁾ Shi Yi-Shi^{1)2)†} Li Tuo¹⁾ Gao Qian-Kun¹⁾
Xiao Jun¹⁾ Zhang San-Guo¹⁾

1) (University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2) (State Key Laboratory of Information Security, Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(Received 1 August 2012; revised manuscript received 21 November 2012)

Abstract

Some key parameters of illuminating beam and the influence on imaging quality are investigated via ptychography in visible light band. The influences of overlap ratio, size and shape of illuminating beam on imaging quality and their relationship are studied using ptychographical iterative engine algorithm. The simulation results show that the overlap ratio of illuminating beam is a main factor influencing imaging quality. Shape of illuminating beam mainly influences the convergence of ptychography. And the size of illuminating beam less influences directly the imaging quality and convergence. Therefore, the simulation results play an important theoretic guiding role in optimizing the beam parameters in visible light, the X-ray and electronic band and other bands.

Keywords: coherent-diffraction, ptychography, phase retrieval

PACS: 42.30.-d, 42.25.Fx, 42.30.Rx, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.62.064206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60907004), the Scientific Research Funds for Excellent Doctoral Dissertation of CAS, the President Fund of UCAS the Fund of Fusion of Research and Education, CAS and K. C. Wong Education Foundation, Hong Kong.

† Corresponding author. E-mail: sysopt@126.com