

非相干照明条件下的 ptychographic iterative engine 成像技术

余伟 何小亮 刘诚 朱健强

Ptychographic iterative engine with the incoherent illumination

Yu Wei He Xiao-Liang Liu-Cheng Zhu Jian-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 244201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.244201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带有未知非对称控制增益的不确定分数阶混沌系统自适应模糊同步控制

[Adaptive fuzzy synchronization for uncertain fractional-order chaotic systems with unknown non-symmetrical control gain](#)

物理学报.2015, 64(7): 070503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.070503>

混沌海杂波背景下的微弱信号检测混合算法

[Hybrid algorithm for weak signal detection in chaotic sea clutter](#)

物理学报.2015, 64(4): 040506 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.040506>

基于线性矩阵不等式的一类新羽翼倍增混沌分析与控制

[Analysis on a class of double-wing chaotic system and its control via linear matrix inequality](#)

物理学报.2014, 63(21): 210502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.210502>

自然循环流动不稳定性的多目标优化极限学习机预测方法

[Prediction method of flow instability based on multi-objective optimized extreme learning machine](#)

物理学报.2014, 63(20): 200505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.200505>

基于不确定性变时滞分数阶超混沌系统的滑模自适应鲁棒的同步控制

[Synchronizing a class of uncertain and variable time-delay fractional-order hyper-chaotic systems by adaptive sliding robust mode control](#)

物理学报.2014, 63(16): 160507 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.160507>

非相干照明条件下的ptychographic iterative engine成像技术*

余伟¹⁾ 何小亮¹⁾ 刘诚^{1)†} 朱健强²⁾

1)(江南大学理学院, 无锡 214122)

2)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2015年7月5日收到; 2015年8月17日收到修改稿)

在传统多波长相干衍射成像理论的基础上提出适用于 X-射线和电子束等非相干光源照明成像的改进多波长 ptychographic iterative engine 方法, 同时将小孔形状和照明光谱信息用于叠代计算, 可以在非相干照明条件下精确重建出物体的强度透射像和相位透射像, 并对光源带宽对重建精度的影响进行了分析, 对于解决如何在非相干照明条件下对大尺寸物体进行精确相位成像的问题具有较好的科研和实用价值.

关键词: 相干衍射成像, 相位恢复, 多波长相干衍射成像算法

PACS: 42.25.Fx, 42.30.Rx, 42.55.Vc

DOI: 10.7498/aps.64.244201

1 引言

作为一种无透镜成像方法, 相干衍射成像(CDI)从远场散射斑强度通过迭代算法直接得到被成像物体的强度像和相位像, 由于不受光学元件质量的限制, 理论上可以实现接近衍射极限的空间分辨率, 因此在 X 射线和电子束等短波长成像领域有重要的意义^[1-4]. CDI的迭代算法最早由 Gerchberg 和 Saxton 提出, 简称 G-S 算法, 它通过在输入和输出两个平面间的来回迭代来重建物体的振幅和相位; Fienup^[1]在对 G-S 算法进行改进的基础上, 提出了误差减小算法(error-reduction, ER)和混合输入输出算法(hybrid input-output, HIO). 与 G-S 算法相比, ER 算法和 HIO 算法均能有效地提高再现像质量和收敛速度. 20 世纪 90 年代, 杨国桢教授和顾本源教授结合已有相位恢复算法, 提出了杨-顾算法(Y-G), 此算法在任意线性变换系统中有着较好的应用. 但所有这些算法均需要利用小孔对待成像物体的空间范围进行限制, 因此成像

视场较小, 而且对于相位分布稍微复杂的样品, 往往收敛速度较低或者得不到可靠的再现像. 为了解决这些问题, 英国谢菲尔德大学 Rodenburg 教授于 2004 年提出了一种基于横向扫描的相位恢复成像方法, 并命名为 ptychographic iterative engine, 简称 PIE^[5-9]. 该方法利用空间局域照明光对待测物体进行扫描并用电荷耦合器件(CCD)同步记录扫描时所产生的多幅衍射斑, 只要扫描时相邻两次照明区域有一定比例的重叠, PIE 可快速准确地恢复出被测物体的振幅和相位信息, 因此可以快速地对大尺寸物体进行成像, 目前已在 X 射线和电子束成像领域中获得大量研究和应用^[10-13].

由于需要在多个平面间利用菲涅耳衍射公式对光场进行反复的数值传播和迭代运算, 传统 CDI 必须采用完全相干光的理想照明光. 在可见光频段, 激光的高度空间相干性和时间相干性可完全满足 CDI 成像的这个要求, 但在 X-射线和电子束等短波长成像领域, X-射线和电子束的相干度往往很不理想, 当利用传统的 CDI 理论把实验中所采集到的部分相干衍射斑当作完全相干衍射斑进行图像

* 江苏省自然科学基金(批准号: BK2012548)和江南大学校基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

重建时, 所得图像的分辨率和信噪比都大幅降低. 如何克服照明光部分相干性的影响一直是阻碍相干衍射成像大量应用的一个技术瓶颈.

2011年, Abbey等成功地将照明光源的光谱分布信息纳入迭代元算中, 从而发展出了可以在部分相干照明条件下获得清晰再现像的 polyCDI [14-16] 算法. 实验证明, 无论是对于具有多个分立谱线的部分光源还是具有连续谱分布的非相干光源, polyCDI 算法均可以得到准确的再现像. polyCDI 算法的出现是相干衍射成像发展进程中的一个技术突破, 这意味着 CDI 可以用相干度不高的台式辐射源来实现, 从而摆脱对高相干度辐射源(宝石光源、瑞士光源过、上海光源等)的严重依赖并因此极大地扩展其可应用范围. polyCDI 是 Fienup 算法的改进型, 需要利用一个有限大小的孔对被成像物体的空间尺寸进行限制, 因此视场受限, 能被成像的物体尺寸很小. 为了能对大尺寸物体进行成像, 本文将照明光束的光谱信息和形成照明光的小孔形状同时纳入重建叠代运算 [17,18], 实现改进的 polyPIE 成像并对光源带宽对成像质量的影响进行了研究, 可实现利用部分相干光进行快速 PIE 成像.

2 polyPIE 成像原理

polyCDI 与传统 CDI 的光路及数据采集过程完全相同, 不同的是在重建过程中需要将光源中每个波长都纳入迭代计算. 当光源中心波长 λ_0 处的物体透射函数为 $|O(x_0, y_0)| \exp[i\phi(x_0, y_0)]$ 时, 则其他任意波长 λ 的透射函数可以近似为 $|O(x_0, y_0)| \exp[i\lambda_0/\lambda\phi(x_0, y_0)]$, 针对光谱分布为 $B(\lambda)$ 的光源, 在每一步叠代过程中将不同波长计算所得到衍射斑强度 $I_\lambda(x, y)$ 求和后同实际记录的强度 $I_0(x, y)$ 相比, 并将所得到的系数对中心波长 λ_0 的叠代运算进行强度调整, 从而获得清楚的再现像. 在重建过程上 polyCDI 的往复叠代运算仍然按照相干光进行, 只是在记录平面上考虑了光谱的叠加效应, 因此理论上非相干光照明下的 PIE 成像也可以用类似的方法实现.

图 1 为 PIE 成像光路, 照明光经过小孔后在被测量物体上形成光斑分布 $P(x_0, y_0)$, 对物体做横向扫描并在每个位置记录下相应的衍射光斑后, 利用 PIE 可以得到比 CDI 范围更大的物体的像. polyCDI 中的限制小孔对于任何波长都具有固定的透

射函数, 即孔外为 0, 孔内为 1. 但在 PIE 方法中, 物体上的照明光斑 $P(x_0, y_0)$ 是小孔的衍射, 它的复振幅分布依赖于所用的波长 λ , 因此当用 polyCDI 原理进行非相干光 PIE 成像时, 照明光随着波长的变化必须纳入迭代重建过程, 这是与 polyCDI 不同的地方. 图 1 中的小孔的形状可以预先精确地测量出来, 这在普通的 PIE 方法中已经被实验证实, 因此在平行照明的条件下, 和每个波长相应的照明光 $P(\lambda, x_0, y_0)$ 都可以精确计算. 采用和 polyCDI 相类似的原理, 对待成像物体的复振幅透过率给出一个针对中心波长 λ_0 的初始猜测值 $|O(x_0, y_0)| \exp[i\phi(x_0, y_0)]$, 然后采用下述 polyPIE 步骤进行图像重建, 流程图见图 2.

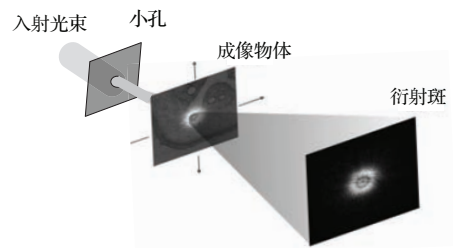


图 1 (网刊彩色) PIE 成像光路图

Fig. 1. (color online) The principle of standard PIE method.

1) 分别计算和其他任意波长相对应的物体的透射分布

$$u_\lambda(x_0, y_0) = P(\lambda, x_0, y_0) |O(x_0, y_0)| \times \exp[i\lambda_0/\lambda\phi(x_0, y_0)];$$

2) 将各透射光分布 $u_\lambda(x_0, y_0)$ 传播到 CCD 记录平面得到复振幅分布 $U(\lambda, x, y)$, 并计算强度值 $|U(\lambda, x, y)|^2$, 将各波长强度值相加求和得到 CCD 平面计算总光强 $I_0 = \sum |U(\lambda, x, y)|^2$;

3) 将中心波长 λ_0 的复振幅 $U(\lambda_0, x, y)$ 替换为: $U'(\lambda_0, x, y) = U(\lambda_0, x, y) \times \sqrt{I_0(x, y)}/\sqrt{I(x, y)}$, $I(x, y)$ 为物体在该扫描位置时所记录的衍射光斑强度;

4) 将 $U'(\lambda_0, x, y)$ 逆向传播到样品平面, 利用下面的更新公式对物体透射函数 $|O(x_0, y_0)| \exp[i\phi(x_0, y_0)]$ 进行更新, 得到物体新的复振幅分布

$$O_n(x_0, y_0) = O_{n-1}(x_0, y_0) + \frac{p_n^*(x_0, y_0) |p_n(x_0, y_0)|}{(|p_n(x_0, y_0)|^2 + \alpha) |p_n(x_0, y_0)|_{\max}} \times \beta [U'(\lambda_0, x_0, y_0) - U(\lambda_0, x_0, y_0)], \quad (1)$$

式中 α 和 β 一般取 0—1 之间的正数;

5) 移动到下一个位置, 重复 1)—5) 步骤, 完成所有位置的叠代;

6) 重复步骤 1)—5) 直至恢复出物体准确的振幅和相位信息.

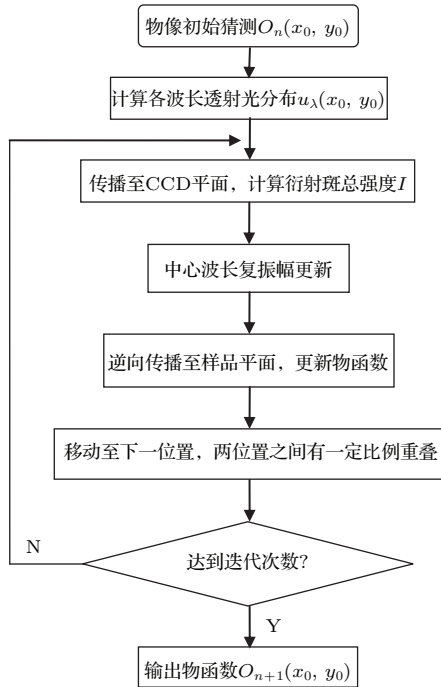


图 2 polyPIE 流程图

Fig. 2. Flowchat of the polyPIE.

3 数值模拟分析

为了验证上述 polyPIE 方法在理论上的可行性, 我们按照图 1 所示的光路对 polyPIE 进行了数值模拟计算. 其中小孔被假定为直径为 5 nm 的圆孔; 样品尺寸为长和宽都为 2 μm 的正方形, 并具图 3(a) 和图 3(b) 所示的振幅和相位透过率; 小孔和物体的间距为 3 cm; 记录散射斑强度的 CCD 和样品之间的距离为 5 cm. 图 3(c) 为采用波长为 0.88 nm 的 X-射线照明时计算所得的一个散射斑. 图 3(d) 展示了中心波长为 0.88 nm、频宽为 0.047 nm 的波源光谱. 当用具有图 3(d) 所示光谱分布的非相干 X-射线源照明物体时, 若每隔 0.01 nm 的波长差计算一个衍射斑并将所有强度求和, 则在相同的位置得到图 3(e) 中的衍射斑. 和图 3(d) 中的衍射斑相比较可以发现, 非相干照明情况下的衍射斑明显平滑, 很多细节结构已经消失. 若用图 3(c) 中所示的衍射斑按照 PIE 理论进行图像重建, 则可以得到与图 3(a) 和图 3(b) 完全

一样的再现像, 而当采用图 3(e) 中所示的衍射斑按照一般 PIE 算法进行图像重建时所得到的图像如图 3(f) 和图 3(g) 所示. 与图 3(a) 和图 3(b) 对比可以发现, 不但再现像中存在很多噪声, 而且很多原有图像中存在的细节都已经分辨不清, 同时强度和相位透过率的图像之间出现明显的串扰. 为了衡量重建图像和原始图像之间的差别, 可采用

$$ER = \frac{\sum [|G_k(u) - G'_k(u)|]^2}{\sum |G_k(u)|^2}$$

计算二者之间的相对误差, 式中 $G_k(u)$ 是样品的真实振幅分布, $G'_k(u)$ 是恢复的样品的振幅分布.

图 3(h) 是用相干照明散射斑和非相干照明散射斑重建时残余误差随着迭代次数增加的变化情况, 可以看出, 当照明为完全相干时, 不到 20 次的迭代运算已经使误差降到 0.5% 以下, 而非相干照明的再现像的最终误差高于 25%, 而且随着迭代次数的增加, 误差有明显增大的趋势.

若按照上述 polyPIE 重建方法, 利用图 3(e) 中所示的衍射斑进行图像重建, 重建过程中仍然采用每 0.01 nm 的光谱间隔进行, 此时所获得的再现像在图 4(a) 和图 4(b) 中给出, 将其和原图 3(a) 和图 3(b) 对比可以发现, 二者的区别很难用肉眼察觉. 图 4(c) 的实线给出了收敛误差变化曲线, 可以看出在不到 20 次迭代计算的情况下, 重建误差已经小于 2%, 虽然残余误差相对于完全相干照明情况仍然偏高, 但是对于普通 PIE 重建方法的结果已经发生了根本的改变.

为了验证 polyPIE 算法对谱宽的适用范围, 我们使用谱线更宽的光源进行验证: 光源中心波长依旧为 0.88 nm, 谱宽为 0.08 nm, 该频宽相较于图 3(d) 所示光源, 频宽增大了近一倍. 按照 polyPIE 重建方法对其衍射斑进行图像重建, 重建过程中仍采用每 0.01 nm 的光谱间隔进行恢复, 其误差收敛变化曲线在图 4(c) 中以蓝色虚线表示, 和带宽为 0.047 nm 的结果相比较可发现其收敛速度有所下降, 迭代 30 次左右误差才趋于稳定, 但最终误差仍然在 2% 左右, 即重建精度仍然较高. 但当带宽进一步增加到 0.14 nm 时, 其误差曲线以图 4(c) 中红色曲线所示, 可以看出此时重建已经不收敛, 不可能得到准确的重建像. 所以 polyPIE 算法仅适用于谱宽较窄的光源, 对我们的模拟参数来说, 允许的谱宽大小约为为中心波长的 10%, 对于谱宽太大的光源, polyPIE 方法并不适用.

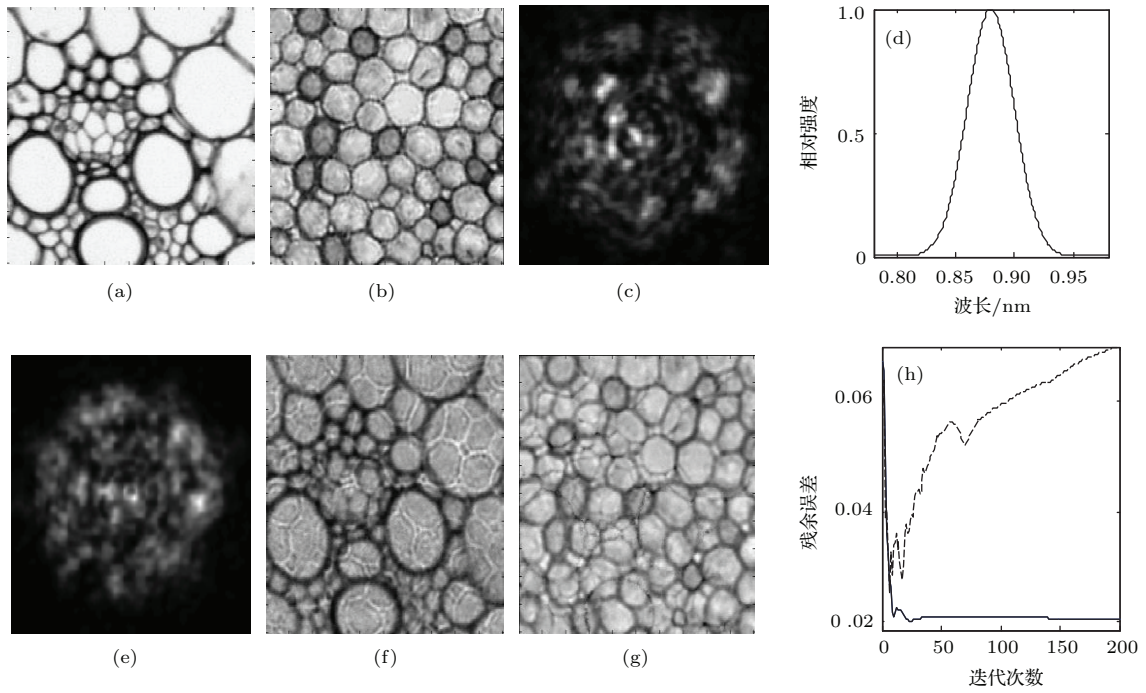


图3 (网刊彩色) (a) 样品振幅分布图; (b) 样品相位分布图; (c) 单波长照明衍射斑; (d) 非相干 X-射线源光谱分布; (e) 多波长照明衍射斑; (f) 普通 PIE 算法重建振幅分布; (g) 普通 PIE 算法重建相位分布; (h) 相干照明与非相干照明误差对比, 虚线为非相干照明迭代误差曲线, 实线为相干照明迭代误差曲线

Fig. 3. (color online) (a) Amplitude for simulation; (b) phase for simulation; (c) diffraction pattern with single wavelength; (d) the spectrum of the source, the horizontal axis represents wavelength, the vertical axis represents relative intensity; (e) diffraction pattern with broadband source; (f) reconstructed image of amplitude; (g) reconstructed image of phase; (h) errors of incoherent illumination (dashed line) and errors of coherent illumination (solid line).

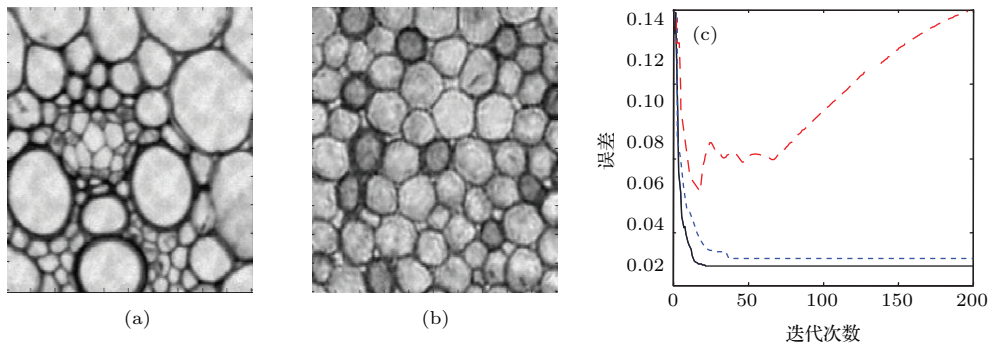


图4 (网刊彩色) (a) polyPIE 算法重建样品振幅分布; (b) polyPIE 算法重建样品相位分布; (c) polyPIE 算法迭代误差曲线

Fig. 4. (color online) (a) Reconstructed image of amplitude by polyPIE; (b) reconstructed image of phase by polyPIE; (c) errors of polyPIE method, the horizontal axis represents number of iteration, the vertical axis represents error.

4 E-polyPIE 成像原理和数值分析

在上述的 polyPIE 分析过程中, 我们假设形成照明光的小孔的形状实验前是已知的, 这虽然在实际上确实可以做到, 但明显增加了实验难度,

为此我们将 ePIE 技术中重建照明光的思路引入 polyPIE 形成 E-polyPIE 方法. 其迭代过程(图5)可以按照下面步骤进行, 首先对图1中所示的小孔大小 $H(x_0, y_0)$ 给出一个初始猜测, 令孔内值为1孔外值为0, 为了保证计算收敛性, 孔的大小必须比实际的孔略大:

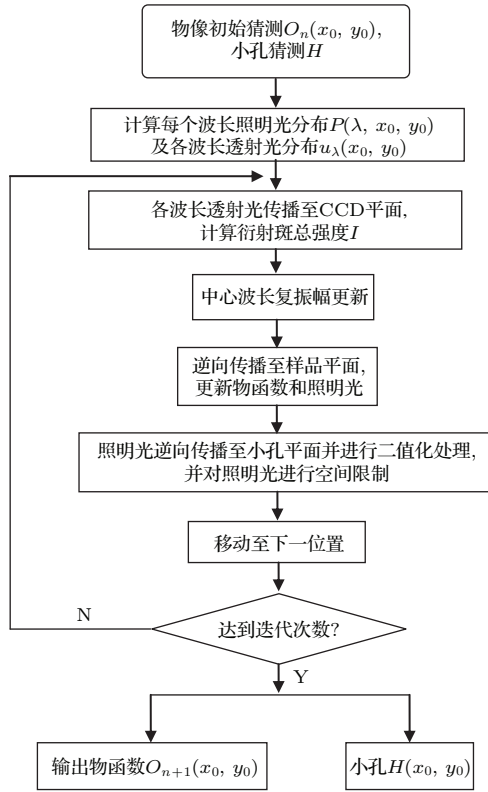


图 5 E-polyPIE 流程图
Fig. 5. Flowchat of E-polyPIE.

1) 分别计算每个波长在物体表面所形成的照明光分布 $P(\lambda, x_0, y_0)$, 并计算对应的物体的透射分布: $u_\lambda(x_0, y_0) = P(\lambda, x_0, y_0) |O(x_0, y_0)| \exp[i\lambda_0/\lambda\varphi(x_0, y_0)]$;

2) 将各透射光分布 $u_\lambda(x_0, y_0)$ 传播到 CCD 记录平面得到复振幅分布 $U(\lambda, x, y)$ 并计算强度值 $|U(\lambda, x, y)|^2$, 将各波长强度值相加求和得到 CCD 平面计算总光强 $I = \sum |U(\lambda, x, y)|^2$;

3) 将中心波长 λ_0 的复振幅 $U(\lambda_0, x, y)$ 替换为 $U'(\lambda_0, x, y) = U(\lambda_0, x, y) \times \sqrt{I_0(x, y)}/\sqrt{I(x, y)}$, $I(x, y)$ 为物体在该位置扫描时所记录的衍射光斑强度;

4) 将 $U'(\lambda_0, x, y)$ 逆向传播到样品平面, 利用下面的更新公式对物体透射函数 $|O(x_0, y_0)| \exp[i\phi(x_0, y_0)]$ 和照明光 $P(\lambda_0, x_0, y_0)$ 进行更新, 得到物体和照明光的新复振幅分布:

$$O_n(x_0, y_0) = O_{n-1}(x_0, y_0) + \frac{P_n^*(x_0, y_0) |p_n(x_0, y_0)|}{(|p_n(x_0, y_0)|^2 + \alpha) |p_n(x_0, y_0)|_{\max}} \times \beta [U'(\lambda_0, x_0, y_0) - U(\lambda_0, x_0, y_0)], \quad (2a)$$

$$P_n(x_0, y_0) = P_{n-1}(x_0, y_0) + \frac{O_n^*(x_0, y_0) |O_n(x_0, y_0)|}{(|O_n(x_0, y_0)|^2 + \alpha) |O_n(x_0, y_0)|_{\max}} \times \beta [U'(\lambda_0, x_0, y_0) - U(\lambda_0, x_0, y_0)] \quad (2b)$$

中 α 和 β 一般取 0—1 之间的正数;

5) 将 $P(\lambda_0, x_0, y_0)$ 传播到小孔所在平面得到孔的像, 并对其进行二值化, 得到优化的 $H(x_0, y_0)$ 并立用其对所得照明光在平面上此进行空间限制;

6) 移动到下一个位置, 重复 1)—4) 步骤, 完成所有位置的叠代;

7) 重复步骤 1)—5) 直至恢复出物体准确的振幅和相位信息.

为了检验上述方法的正确性, 并使其尽可能地接近于真实情况, 我们使用一个尺寸在 5 nm 左右的不规则形状的小孔来产生照明光, 小孔的形状如图 6(a) 所示. 图 6(b) 是采用 0.88 nm 的相干 X-射线照明时所产生的衍射斑强度, 图 6(c) 是采用具有图 3(d) 的光谱分布的非相干 X-射线照明时的衍射斑强度分布. 如果假设小孔的形状已知并按照上述 polyPIE 的重建方法进行成像, 可以得到和图 4 完全一样的重建像和误差曲线. 当孔的形状为未知时, 按照上述 E-polyPIE 的重建方法, 需要对小孔的形状给出一个初始猜测, 初始猜测的形状如图 6(a) 中的虚线所示, 它是一个比实际小孔稍大的一个圆. 图 6(d) 和图 6(e) 是再现所得到物体的强度像和相位像; 图 6(f) 中的实线是误差收敛曲线, 可以看出其最终的误差和小孔预先测量的 polyPIE 方法基本相同. 图 6(g) 和图 6(h) 是再现所得到的小孔的强度像和相位像, 图 6(g) 和图 6(a) 高度一致, 同时图 6(h) 基本是一个平面, 这也从侧面证明了上述方法的可行性.

同样, 为了验证 E-polyPIE 对谱宽的适用范围, 我们仍用中心波长为 0.88 nm、谱宽分别为 0.08 和 0.14 nm 的光源做对比, 其收敛曲线分别如图 6(f) 中蓝色及红色虚线所示, 谱宽为 0.08 nm 时算法的迭代收敛速度明显下降, 而且最终误差明显升高; 当谱宽进一步变为 0.14 nm 时, 误差收敛曲线如图 6(f) 中红色所示, 此时重建图像已不收敛, 无法重建准确的再现像. 因此 E-polyPIE 算法同样仅适用于谱宽较窄的光源, 对于我们模拟的参数来说, 谱宽大小约为中心波长的 10% 时仍能获得精度较高的再现像, 但对于谱宽更宽的光源则不再适用.

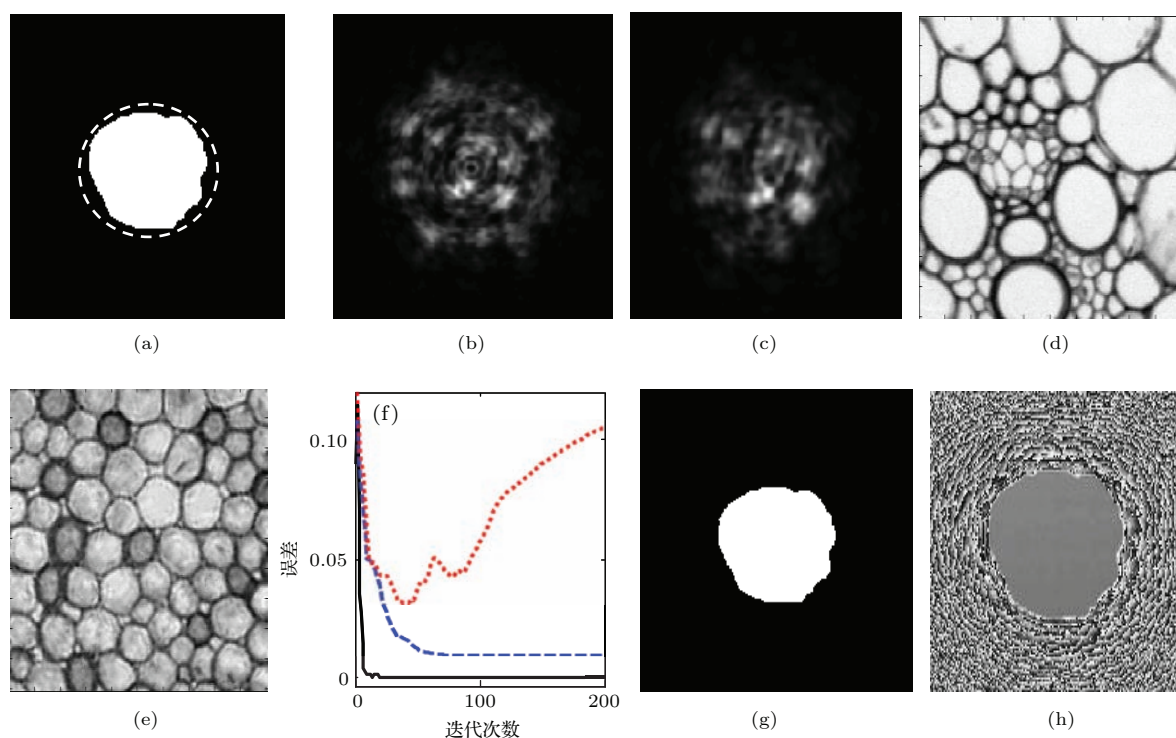


图6 (网刊彩色) (a) 模拟恢复小孔形状分布, 其中虚线部分为猜测小孔分布; (b) 0.88 nm 相干 X-射线照明模拟所产生的衍射斑强度; (c) 非相干 X-射线照明时模拟衍射斑强度分布; (d) E-polyPIE 算法重建样品振幅分布; (e) E-polyPIE 算法重建样品相位分布; (f) E-polyPIE 算法迭代误差曲线; (g) 重建小孔强度分布; (h) 重建小孔相位分布

Fig. 6. (color online) (a) The pinhole for simulation, dash line is the initial guess of pinhole for the simulation; (b) diffraction pattern by coherent light source 0.88 nm; (c) diffraction pattern by broadband source; (d) reconstructed image of amplitude, (e) reconstructed image of phase; (f) errors of E-polyPIE method with broadband source, the horizontal axis represents number of iteration, the vertical axis represents error; (g) reconstructed amplitude of pinhole; (h) reconstructed phase of pinhole.

5 结 论

同时将光源的光谱信息和小孔形状纳入到 PIE 成像的迭代计算中可以实现在非相干照明条件下对样品进行成像的改进 polyPIE 算法, 该方法除保留了原有 PIE 成像的快速收敛和大视场的优点外, 可在照明带宽不大于中心波长 10% 的情非相干照明条件下对物体进行相位成像, 从而使 PIE 技术摆脱对光源相干性的依赖, 理论上甚至可以使用普通 X-射线管进行 PIE 成像, 从而不仅有效地提高了其空间分辨率, 还大幅拓宽了 PIE 成像的应用范围. 本文在进行理论分析的同时, 给出了系列数值模拟分析.

参考文献

[1] Fienup J R 1982 *Appl. Opt.* **21** 2578
 [2] Williams G J, Quiney H M, Dhal B B, Tran C Q, Nugent K A, Peele A G, Paterson D, de Jonge M D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 025506

[3] Miao J, Charalambous P, Kirz J, Sayre D 1999 *Nature* **400** 342
 [4] Rodenburg J M, Faulkner H M L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4795
 [5] Faulkner H M A, Rodenburg J M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 023903
 [6] Elser V 2003 *Opt. Soc. Am. A* **20** 40
 [7] Maiden M A, Rodenburg J M 2009 *Ultramicroscopy* **109** 1256
 [8] Claus D, Maiden M A, Zhang F, Sweeney F, Humphry M, Rodenburg J 2011 *SPIE* **8001** 800109
 [9] 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
 [10] Rodenburg J M 2008 *Adv. Imaging. Electron. Phys.* **150** 87
 [11] Fienup J R 1978 *Opt. Lett.* **31** 27
 [12] Spence C H, Weierstall U, Howells M 2004 *Ultramicroscopy* **101** 149
 [13] Liu C, Pan X C, Zhu J Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184204 (in Chinese) [刘诚, 潘星辰, 朱健强 2013 物理学报 **62** 184204]
 [14] He J, Liu C, Gao S M, Wang J C, Wang Y K, Zhu J Q 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0511008 (in Chinese) [何靖, 刘诚, 高淑梅, 王继成, 王跃科, 朱健强 2014 光学学报 **34** 0511008]

- [15] Abbey B, Whitehead L W, Quiney H M, Vine D J, Cadenazzi G A, Henderson C A, Nugent K A, Balaur E, Putkunz C T, Peele A G, Williams G J, McNulty I 2011 *Nat. Photon.* **5** 420
- [16] Wang Y X, Yun W B, Jacobsen C 2003 *Nature* **424** 50
- [17] Thibault P, Menzel A 2013 *Nature* **494** 68
- [18] Claus D, Robinson D J, Chetwynd D G, Shuo Y, Pike W T, Garcia J, Rodenburg J M 2013 *J. Opt.* **15** 035702

Ptychographic iterative engine with the incoherent illumination*

Yu Wei¹⁾ He Xiao-Liang¹⁾ Liu-Cheng^{1)†} Zhu Jian-Qiang²⁾

1) (School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

2) (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 5 July 2015; revised manuscript received 17 August 2015)

Abstract

Ptychographic iterative engine (PIE) is an ideal phase microscopic method for imaging with short wavelength including X-ray and electron beam. The traditional PIE algorithm requires a purely coherent illumination. Since the coherencies of X-ray and electron beam are always much lower than coherency of the laser, it is greatly important to develop new algorithm for enhancing the capability of PIE in handling the incoherence of the illumination. A method, named polyCDI (coherent diffraction imaging), which can generate clear reconstruction with the illumination of partial coherency, was proposed recently, however due to the use of tiny pinhole in the data acquisition the view field of the reconstructed image is limited. The polyPIE algorithm, which combines the principles of polyCDI with PIE, can realize the imaging of large object with partially coherent illumination. In this paper, an improved polyPIE algorithm is developed to realize the high-resolution phase imaging under incoherent illumination by bringing the shape of the illuminating pinhole and the spectral distribution of the light source into the iterative computation. The image of the object and the illuminating probe are reconstructed for each spectral component, and the shape of the pinhole forming the illumination is used as the same spatial constraint for all the reconstructed probes on the pinhole plane. With this method a very high convergence speed and reconstruction accuracy as well as a wide view field can be achieved. This method can find many applications in the imaging with X-ray and electron beam, which are of low coherence in most of cases. The influence of the spectral width on reconstruction accuracy is also analyzed by imaging the object with illuminations of different spectral widths. It is found that the improved polyPIE algorithm can accurately reconstruct the phase and modulus images of the object when the width of the incoherent illuminating source is smaller than 10% of the central wavelength, otherwise, the convergence speed and reconstruction accuracy will become remarkably lower. By bringing the shape of the pinhole into the iterative computation, the relevance of the reconstructed illuminating probes of different spectral components is used and accordingly the reconstruction speed can be obviously accelerated. The feasibility of this suggested method is verified by a series of numerical simulations.

Keywords: coherent diffraction imaging, phase retrieve, polyCDI algorithm

PACS: 42.25.Fx, 42.30.Rx, 42.55.Vc

DOI: 10.7498/aps.64.244201

* Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2012548) and the Funds from Jiannan University, China.

† Corresponding author. E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk