

小孔扫描傅里叶叠层成像的关键参量研究

谢宗良^{1,2,3} 马浩统^{1,2,4} 任 戈^{1,2} 齐 波^{1,2} 丁 科^{1,2}

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

²中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209

³中国科学院大学, 北京 100049

⁴国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 小孔扫描傅里叶叠层成像术已在三维全息重聚焦和超分辨宏观成像领域显示出巨大的潜力。对小孔扫描傅里叶叠层成像技术的关键参量对光场恢复质量的影响进行了研究,根据小孔扫描傅里叶叠层成像的迭代算法,通过仿真实验研究了小孔的交叠率和孔径大小对光场恢复质量的影响。仿真结果表明:在相同孔径情况下,小孔交叠率存在一个阈值,当交叠率大于该阈值时,光场恢复质量随交叠率增大而显著提高;在相同交叠率情况下小孔孔径越小光场恢复质量越高。该研究成果对小孔扫描傅里叶叠层成像术在进一步应用中的参数优化能起到一定程度的理论指导作用。

关键词 成像系统; 傅里叶光学; 傅里叶叠层; 相位恢复

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1011002

Research on the Key Parameters of Aperture-Scanning Fourier Ptychography

Xie Zongliang^{1,2,3} Ma Haotong^{1,2,4} Ren Ge^{1,2} Qi Bo^{1,2} Ding Ke^{1,2}

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁴College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Aperture-scanning Fourier ptychography technology shows great potential capacity in the fields of three-dimensional holographic refocusing and super-resolution macroscopic imaging. The influence of some key parameters of the technique on recovering quality is investigated. The influences of overlap ratio and size of circular apertures are studied based on light field simulation experiments using aperture-scanning Fourier ptychography iterative algorithm. The simulation results show that there is a threshold of overlap ratio under the circumstance of same aperture size, when overlap ratio is greater than the threshold, the recovering quality increases with overlap ratio raising. Under the circumstance of same overlap ratio, the recovering quality increases with reduction of the aperture size. The research results can provide guiding role for optimizing aperture parameter in the further applications of aperture-scanning Fourier ptychography.

Key words imaging systems; Fourier optics; simulation experiment; Fourier ptychography; phase retrieval

OCIS codes 110.1220; 100.3190; 100.5070

1 引 言

傅里叶叠层成像术是一种利用角度多样性和合成孔径概念来恢复高分辨样本图像的相位恢复技术^[1-5]。同其

收稿日期: 2015-03-17; 收到修改稿日期: 2015-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61205144)、校科研计划项目(JC13-07-01)

作者简介: 谢宗良(1990—),男,博士研究生,主要从事合成孔径成像、光场恢复等方面的研究。

E-mail: 17708106637@163.com

导师简介: 任 戈(1964—),男,博士,研究员,主要从事光电工程总体、光电跟踪等方面的研究。E-mail: renge@ioe.ac.cn

他相位恢复技术相似⁶⁻⁹，傅里叶叠层成像术的处理过程也是由空域中已知的样本信息的增强和频域中某种固定的限制交替迭代组成，而特别的是，这项技术借用了叠层的思想，通过一组平行发光二极管(LED)光源多角度地照射样本，不同角度的LED入射光可等效为在频谱上交叠的光瞳函数，在频域上形成谱的叠层，层与层的交叠扩展了频域带宽，再利用电荷耦合器件(CCD)采集到对应的低分辨光强图样不断更新并合成频谱，从而恢复出样本的复振幅分布。传统叠层成像是一种无透镜的衍射成像技术¹⁰⁻¹⁵，通过逆衍射过程来恢复复振幅，而傅里叶叠层成像则提出了角度多样性的概念，结合合成孔径的思想，同时扩展了频域带宽，恢复了丢失的相位信息。在傅里叶叠层成像术中使用的透镜尽管带来了像差，但并没有起到限制频率成分的副作用，同时还提高了信噪比，降低了对光源相干性的要求¹³。

受限于多角度的平行光源以及稀薄的样本，傅里叶叠层成像技术目前主要应用于显微成像领域，但 Dong 等¹⁶提出的小孔扫描傅里叶叠层成像技术，突破了上述两个瓶颈，有望在宏观成像领域得到广泛应用。不同于传统傅里叶叠层成像，小孔扫描傅里叶叠层成像采用在频域上直线式移动的小孔取代多角度光源照明，最后恢复的复振幅取决于样本的出射波而不是入射波，消除了样本厚度的限制。在平行光照明情况下，Dong 等¹⁶在实验室环境下成功地应用小孔扫描傅里叶叠层成像术在 $4f$ 系统中完成了样本的三维全息重聚焦，在宏观成像系统中实现了超分辨成像。为了更好地将该技术应用于宏观成像，诸如三维(3D)物体追踪，合成孔径成像以及遥感成像等领域，以及完成相关的外场实验，有必要对影响小孔扫描傅里叶叠层成像术中成像质量的关键因素进行研究。本文分别研究了小孔的交叠率以及孔径大小对光场恢复质量的影响，通过仿真实验得到了小孔的关键参量与恢复质量的变化关系，研究成果对拓展该技术的应用领域及于该技术在实验中的参数优化可以起到一定的理论指导作用。

2 理论分析

2.1 小孔扫描傅里叶叠层成像的基本原理

小孔扫描傅里叶叠层成像术利用一个小孔在成像系统的频谱面上进行叠层式地扫描，以让不同成分的空间频率信息通过，并利用由此得到的多幅低分辨率图样来合成频谱，从而恢复样本出射光波的振幅和相位信息，如图 1(a)和(b)所示。图 1(a)为典型的 $4f$ 成像系统，利用外置的小孔在频谱面限制频率成分；图 1(b)为一般的宏观成像系统，样本出射的光波发生远场夫琅费衍射在成像透镜面上产生频谱，因此成像透镜本身的孔径光阑起到限制频率成分的作用。如图 1(c)所示，小孔在频谱面上进行扫描，孔径的光瞳函数进行频域限制，CCD 记录下的对应的光强图样进行空域限制，利用这些约束条件在空域和频域不断迭代可以恢复出样本的出射光场。同叠层成像术类似，小孔扫描傅里叶叠层成像的关键也在于叠层：频谱的某一层，也就是频谱受小孔光瞳函数限制通过的某一部分，需要与其他层发生交叠，因此重构的每层频谱也要同时满足其他层的频谱约束，最后重构的频谱是所有层的共解，因而提高了迭代速度，增加了重构的准确性。

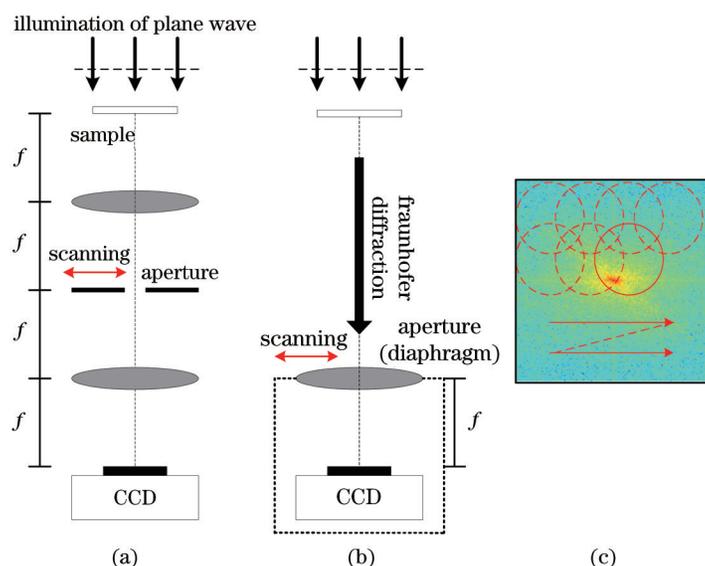


图 1 小孔扫描叠层成像的原理图。(a) $4f$ 成像系统；(b) 一般宏观成像系统；(c) 扫描轨迹

Fig.1 Schematic of aperture-scanning ptychography imaging. (a) $4f$ imaging systems; (b) common macroscopic imaging systems; (c) scanning trajectory

2.2 小孔扫描傅里叶叠层成像的迭代算法

设从样本出射的光场为 $s(x, y)$, $\tilde{s}(k_x, k_y)$ 由 $s(x, y)$ 的傅里叶变换得到, 是频谱面的场分布。对于 n 个不同位置的小孔, 使用一个 0~1 分布的光瞳函数 $a_i(k_x, k_y)$ 来表征, 其定义为

$$a_i(k_x, k_y) = \begin{cases} 1, & \text{inside} \\ 0, & \text{outside} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

小孔可以选择性地让不同空间频率成分通过, 于是在像面上得到相应的强度图样 $I_{mi} = |\mathcal{F}(a_i \tilde{s})|^2$, 其中 $\mathcal{F}(\cdot)$ 表示傅里叶变换, 下标 i 表示第 i 个小孔的位置。然后将这些图样在频谱面上进行合成, 从而恢复出样本的复振幅分布。第一次迭代估计的样本出射复振幅 s_0 是随机的, 于是可以得到频谱面的场分布

$$\tilde{s}_i(k_x, k_y) = \mathcal{F}[s_{i-1}(x, y)], \quad (2)$$

根据不同小孔位置的光瞳函数和频谱面的场分布, 可以得到估计的像面场分布

$$u_{ei}(x, y) \exp[i\phi_{ei}(x, y)] = \mathcal{F}[a_i(k_x, k_y) \cdot \tilde{s}_i(k_x, k_y)], \quad (3)$$

利用记录的强度图样的平方根值替换估计的像面场分布的振幅, 而其相位保持不变, 再进行逆快速傅里叶变换得到新的频谱场分布

$$\tilde{s}_{\text{update}, i}(k_x, k_y) = \mathcal{F}^{-1}\{\sqrt{I_{mi}}(x, y) \exp[i\phi_{ei}(x, y)]\}, \quad (4)$$

原来的频谱面场分布对应于通光孔径的部分用新的频谱场分布相应部分进行替换, 得到

$$\tilde{s}_i(k_x, k_y) = \tilde{s}_i(k_x, k_y) [1 - a_i(k_x, k_y)] + \tilde{s}_{\text{update}, i}(k_x, k_y) \cdot a_i(k_x, k_y), \quad (5)$$

再进行傅里叶逆变换得到重建的物面的场分布

$$s_i(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{s}_i(k_x, k_y)], \quad (6)$$

重复以上(2)~(6)式遍历所有 n 个小孔。最后再反复迭代整个过程, 直到收敛, 恢复出样本出射光波的复振幅分布。

2.3 小孔的关键参量

同叠层成像术中照明光束的关键参量研究类似^[17], 小孔扫描傅里叶叠层成像术的光场恢复质量与小孔的形状、大小以及交叠率有关, 考虑到大多数成像透镜的光圈都近似于圆形, 因此主要研究圆孔的交叠率和孔径大小对光场恢复质量的影响。

参照叠层成像中照明光束的交叠率定义^[17], 圆孔的相对交叠率也可以定义为

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

式中 r 为圆孔半径, a 是相邻圆孔圆心之间的距离。

3 仿真实验及分析

为了研究小孔的关键参量对光场恢复质量的影响, 建立了一个 $4f$ 仿真系统, 参考实际元件, 所选参数如下: 透镜口径 48 mm, 焦距 300 mm, CCD 像素尺寸 $7.7 \mu\text{m}$ (即采样间隔), 所用激光波长为 632.8 nm。样本经平面波照射后的出射光波振幅分布仿真如图 2(a) 所示的 Lena; 出射相位仿真如图 2(b) 所示的船图样。模拟的振幅和相位值采样点均为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 扩大采样点倍数为 2, 因此频谱面上的采样点为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。根据离散傅里叶变换采样关系, 可得频谱面的大小为 24.7 mm, 模拟的理想频谱分布(取自然对数后的值)如图 2(c) 所示。通过控制小孔在频谱面上扫描, 获得多幅低分辨率强度图样, 利用上文介绍的算法将这些图样在频谱面上进行合成, 可恢复出样本出射光波的复振幅信息。



图 2 仿真样本。(a) 理想振幅; (b) 理想相位; (c) 理想频谱(取自然对数)

Fig.2 Simulated sample. (a) Ideal amplitude; (b) ideal phase; (c) ideal spectrum (natural logarithm)

需要指出的是, Dong等利用小孔扫描傅里叶叠层成像术在 $4f$ 成像系统中实现了三维全息重聚焦, 在一般宏观成像系统中实现了超分辨成像, 尽管应用的背景不同, 但两者的原理在本质上是一样的。因此基于 $4f$ 成像系统所得出的研究成果同样适用于一般宏观成像系统。

3.1 恢复质量评价指标

为了定量的评价光场恢复的好坏, 利用恢复值和理想值的相关系数(Co)和均方根误差(RMSE)来判定恢复质量。

相关系数定义为

$$x_{Co} = \frac{\sum_x \sum_y (A_{xy} - \bar{A})(B_{xy} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_x \sum_y (A_{xy} - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_x \sum_y (B_{xy} - \bar{B})^2}}, \quad (8)$$

式中 A_{xy} 和 B_{xy} 分别表示理想图像 A 和恢复图像 B 中 (x,y) 点的灰度值, \bar{A} 和 \bar{B} 分别表示理想图像 A 和恢复图像 B 的平均灰度值。相关度越接近 1 表示恢复质量越高。

均方根误差定义为

$$x_{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [A(i,j) - B(i,j)]^2 / (M \times N)}, \quad (9)$$

式中 $M \times N$ 为图像的大小, A 是恢复后的值, B 是原始的理想值。均方根误差越接近 0, 表示误差越小, 恢复质量越高。

3.2 交叠率不同对恢复质量的影响

首先研究了小孔孔径相同情况下交叠率不同对光场恢复质量的影响。取孔的直径为 128 个采样点(采样间隔约为 0.05 mm), 控制小孔在频谱面上从左到右, 从上到下地进行扫描。为了比较交叠率不同带来的恢复质量的差异, 模拟了 8 种不同相对交叠率的情况, 分别为 0%, 12.5%, 25.0%, 37.5%, 50.0%, 62.5%, 75.0%, 87.5%。利用小孔扫描傅里叶叠层算法迭代 200 次以后获得恢复的频谱(取自然对数后的值)、样本出射光波的振幅和相位, 分别如图 3~5 所示。从三者的恢复图像可以直观地看出: 光场恢复质量随着交叠率增加而增加, 当交叠率为 50% 的时候, 频谱、振幅和相位可以得到较好地恢复, 当交叠率继续增加时, 通过分布图难以分辨出恢复质量的好坏。

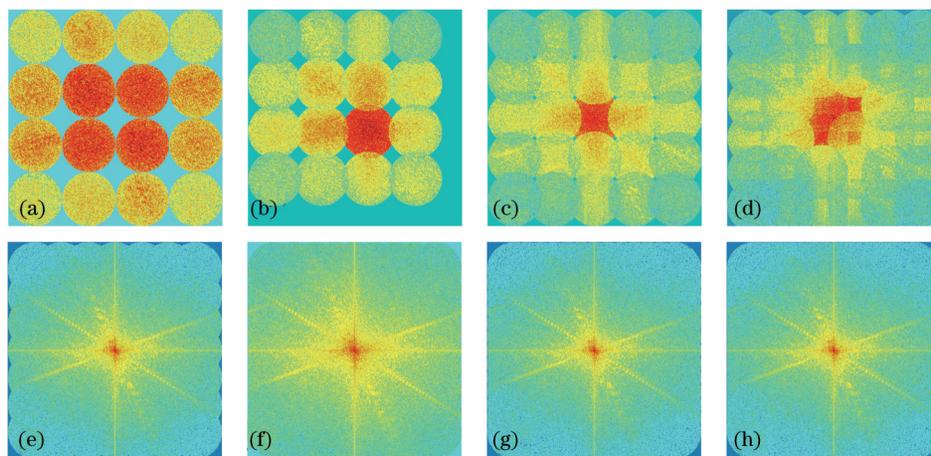


图 3 孔径相同交叠率不同的重建频谱。(a) 0%; (b) 12.5%; (c) 25%; (d) 37.5%; (e) 50%; (f) 62.5%; (g) 75%; (h) 87.5%

Fig.3 Reconstructed spectrums of different overlap ratios with the same aperture size. (a) 0%; (b) 12.5%; (c) 25%; (d) 37.5%; (e) 50%; (f) 62.5%; (g) 75%; (h) 87.5%

为了量化交叠率对恢复质量的影响, 分别研究了不同交叠率情况下恢复振幅和理想振幅的相关系数和均方根误差随迭代次数的变化关系如图 6 所示, 恢复相位和理想相位的相关系数和均方根误差随迭代次数的变化关系如图 7 所示, 以及两者收敛后相关系数和均方根误差的稳态值随交叠率的变化关系如图 8 所示。分析这三幅曲线图可知: 当交叠率达到差不多 50% 及以上时, 光场可以得到有效恢复, 且光场恢复质量随着交叠率增加而增加, 但交叠率增加到一定程度以后, 恢复质量增加缓慢。总体上收敛速度也随着交叠

率增加而增加。从理论上分析,交叠率越大,频谱层与层的共解越多,约束性越强,得到的解越准确,与仿真结果吻合。

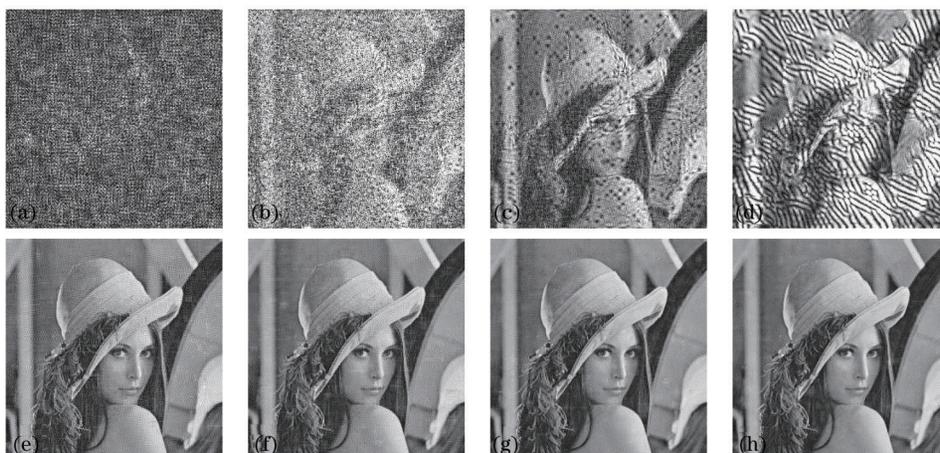


图4 孔径相同交叠率不同的重建振幅。(a) 0%; (b) 12.5%; (c) 25%; (d) 37.5%; (e) 50%; (f) 62.5%; (g) 75%; (h) 87.5%

Fig.4 Reconstructed amplitudes of different overlap ratios with the same aperture size. (a) 0%; (b) 12.5%; (c) 25%; (d) 37.5%; (e) 50%; (f) 62.5%; (g) 75%; (h) 87.5%

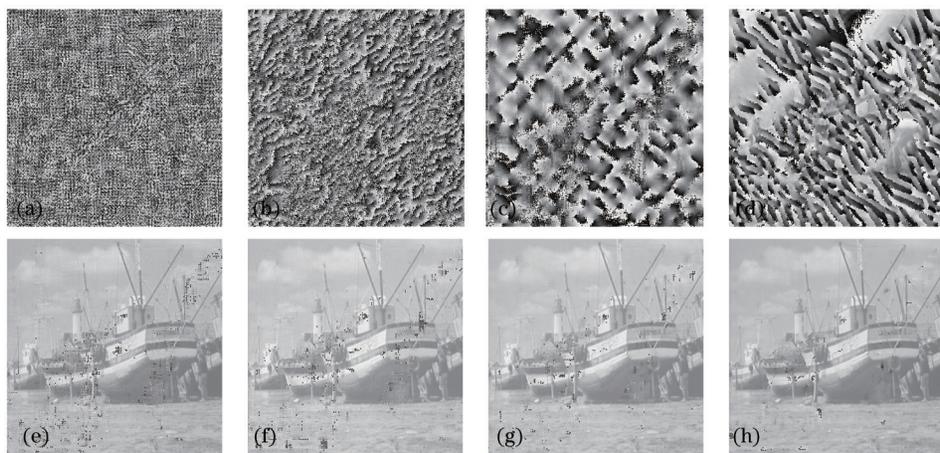


图5 孔径相同交叠率不同的重建相位分布。(a) 0%; (b) 12.5%; (c) 25%; (d) 37.5%; (e) 50%; (f) 62.5%; (g) 75%; (h) 87.5%

Fig.5 Reconstructed phase distributions of different overlap ratios with the same aperture size. (a) 0%; (b) 12.5%; (c) 25%; (d) 37.5%; (e) 50%; (f) 62.5%; (g) 75%; (h) 87.5%

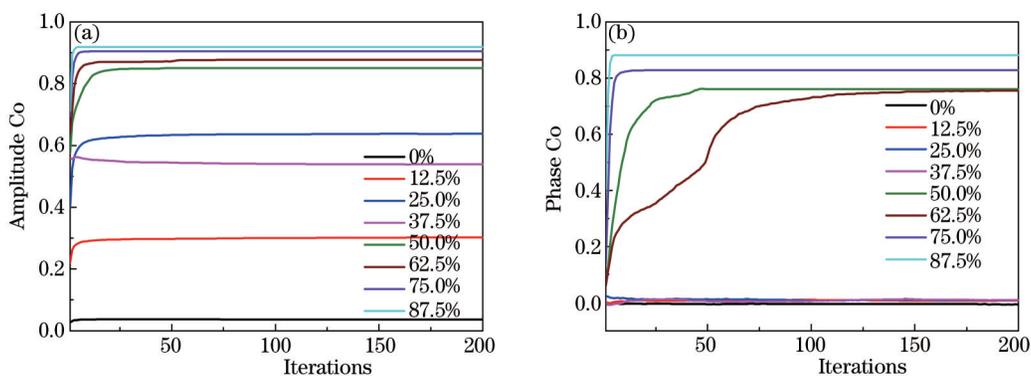


图6 交叠率不同振幅和相位的相关系数随迭代次数的变化曲线

Fig.6 Evolution curves of correlation coefficients of amplitude and phase versus iterations with different overlap ratios

由以上分析可知,交叠率介于40%和50%之间可能存在阈值,为了进一步研究该阈值,又模拟了交叠率为40%,45%,47%和49%的情况,并与交叠率为50%的情况进行了对比,仿真重建的振幅和相位,如图9所示。从图9可以很直观地看出,当交叠率为50%时,振幅和相位的恢复质量明显提高,考虑到仿真的数值误

差,当交叠率在50%左右时,存在一个合适的阈值。

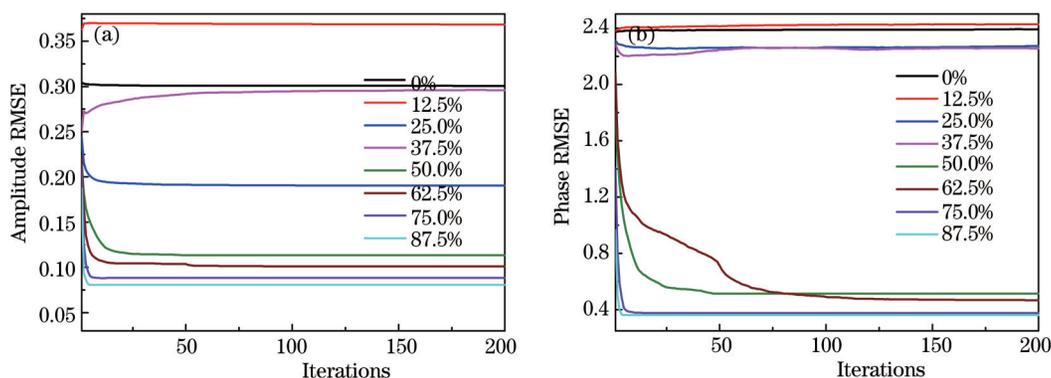


图7 交叠率不同振幅和相位的均方根误差随迭代次数的变化曲线

Fig.7 Evolution curves of RMSE of amplitude and phase versus iterations with different overlap ratios

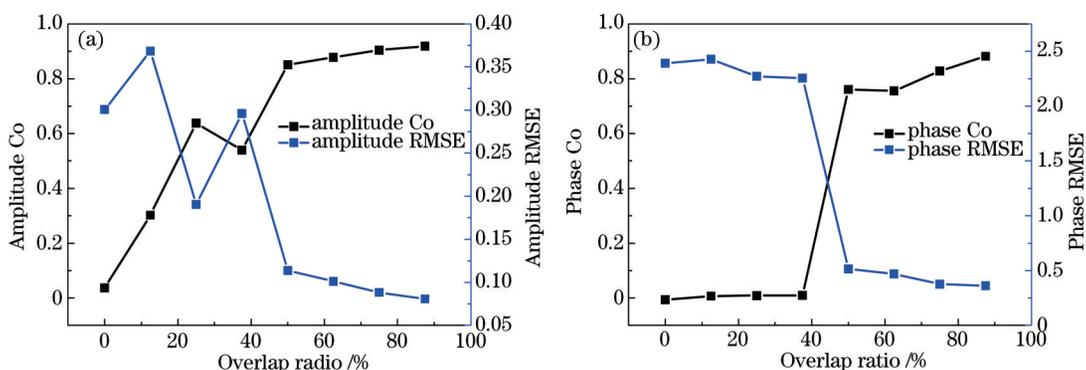


图8 收敛的振幅和相位的相关系数和均方根误差随交叠率的变化曲线

Fig.8 Evolution curves of correlation coefficients and RMSE of converged amplitude and phase versus different overlap ratios

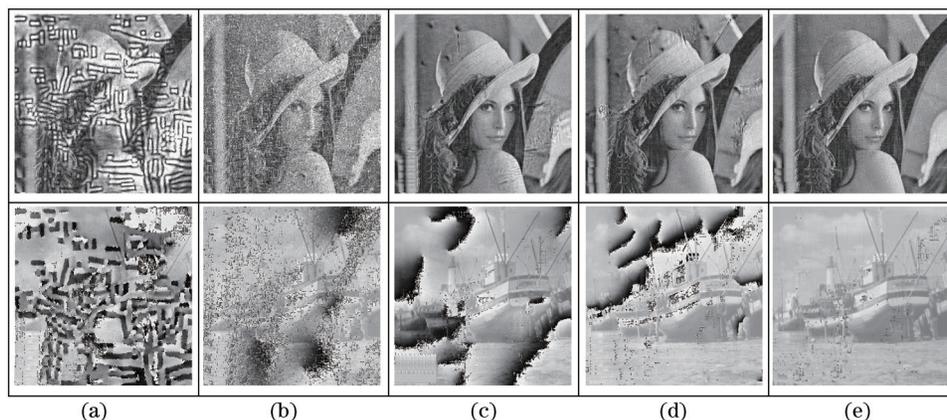


图9 孔径相同交叠率介于40%和50%之间的振幅和相位恢复图。(a) 40%; (b) 45%; (c) 47%; (d) 49%; (e) 50%

Fig.9 Reconstructed amplitudes and phase distributions of overlap ratios between 40% to 50% with the same aperture size.

(a) 40%; (b) 45%; (c) 47%; (d) 49%; (e) 50%

3.3 孔径大小不同对恢复质量的影响

研究了在相同交叠率情况下孔径大小不同对光场恢复质量的影响。取圆孔间相对交叠率为80%,分别模拟了孔径大小为80,120,160,200,240,280,320,360个采样点的情况,仿真输出的重建频谱(取自然对数后的值)、重建振幅和重建相位,分别如图10~12所示。从三者的恢复图像可以直观地看出:频谱、振幅和相位的恢复质量随着孔径增大而下降,当孔径增大到240个采样点以上时,已基本不能恢复出光场信息。

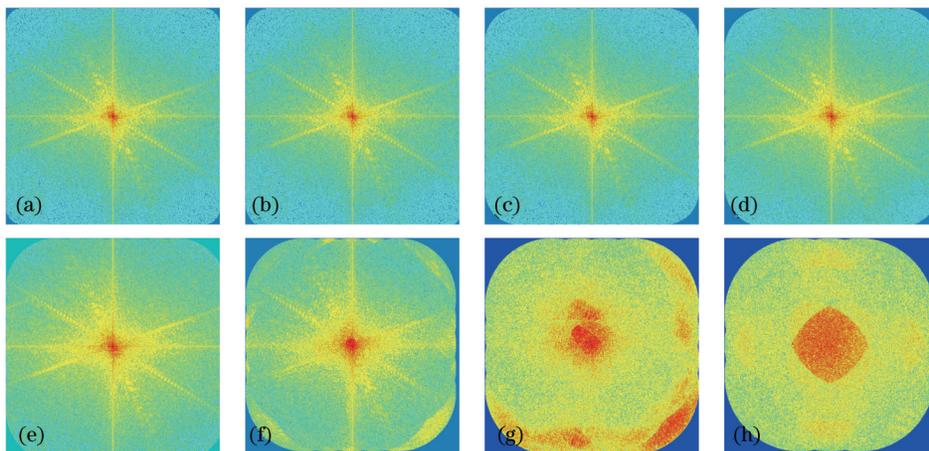


图 10 交叠率相同孔径不同的重建频谱。(a) 80; (b) 120; (c) 160; (d) 200; (e) 240; (f) 280; (g) 320; (h) 360

Fig.10 Reconstructed spectrums of different aperture sizes with the same overlap ratio. (a) 80; (b) 120; (c) 160; (d) 200; (e) 240; (f) 280; (g) 320; (h) 360



图 11 交叠率相同孔径不同的重建振幅。(a) 80; (b) 120; (c) 160; (d) 200; (e) 240; (f) 280; (g) 320; (h) 360

Fig.11 Reconstructed amplitudes of different aperture sizes with the same overlap ratio. (a) 80; (b) 120; (c) 160; (d) 200; (e) 240; (f) 280; (g) 320; (h) 360

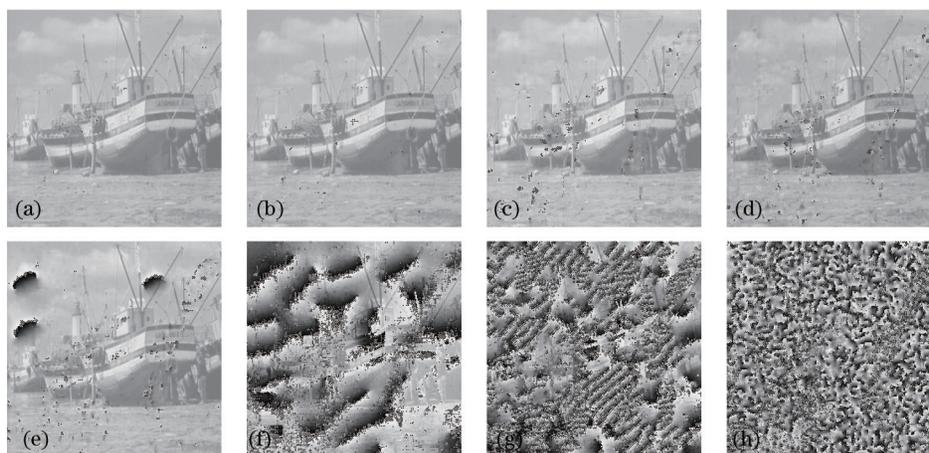


图 12 交叠率相同孔径不同的重建相位分布。(a) 80; (b) 120; (c) 160; (d) 200; (e) 240; (f) 280; (g) 320; (h) 360

Fig.12 Reconstructed phase distributions of different aperture sizes with the same overlap ratio. (a) 80; (b) 120; (c) 160; (d) 200; (e) 240; (f) 280; (g) 320; (h) 360

为了量化孔径大小对恢复质量的影响,分别研究了不同孔径大小情况下恢复振幅和理想振幅的相关系数和均方根误差随迭代次数的变化关系如图 13 所示,恢复相位和理想相位的相关系数和均方根误差随迭代

次数的变化关系如图 14 所示,以及两者收敛后的相关系数和均方根误差的稳态值随交叠率的变化关系如图 15 所示。分析这三幅曲线图可知:光场的恢复质量随着孔径的增加而减小,迭代的收敛速度大体上随着孔径增加而增加。从理论上分析,在交叠率相等情况下孔径越小,需要更多次的扫描来得到相同范围的频谱,可等效为需求解的方程越多,则所得解更加接近准确值,与仿真结果吻合。

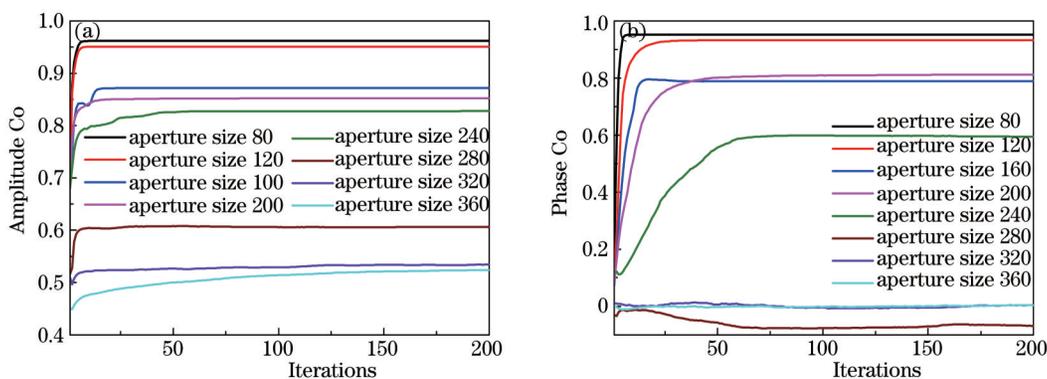


图 13 孔径不同振幅和相位的相关系数随迭代次数的变化曲线

Fig.13 Evolution curves of correlation coefficients of amplitude and phase versus iterations with different aperture sizes

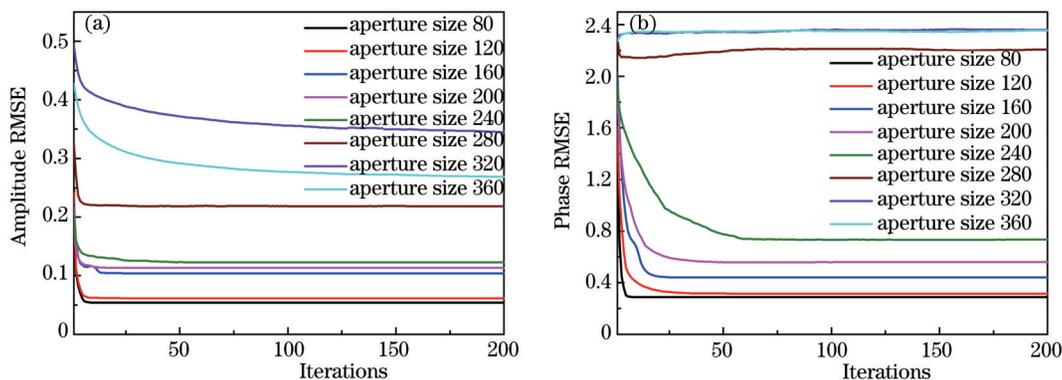


图 14 孔径不同振幅和相位的均方根误差随迭代次数的变化曲线

Fig.14 Evolution curves of RMSE of amplitude and phase versus iterations with different aperture sizes

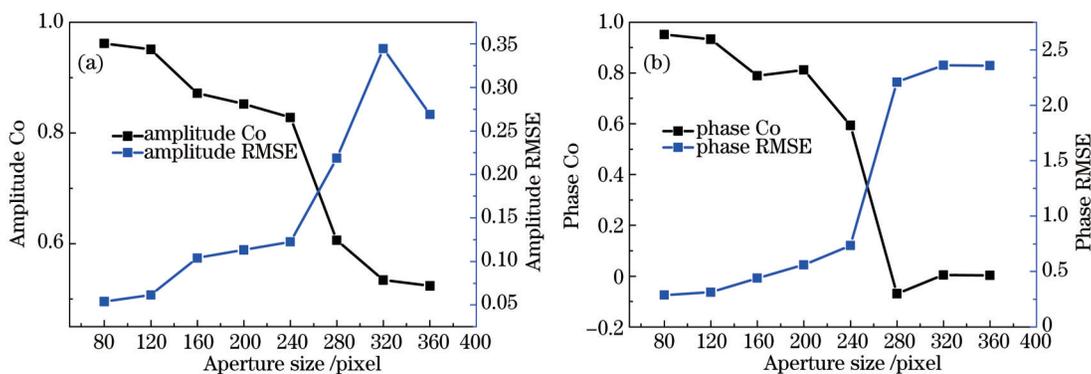


图 15 收敛的振幅和相位的相关系数和均方根误差随孔径的变化曲线

Fig.15 Evolution curves of correlation coefficients and RMSE of converged amplitude and phase versus different aperture sizes

4 结 论

基于 4f 仿真系统,研究了小孔扫描叠层成像中小孔的关键参量对光场恢复质量的影响。模拟结果表明:在相同孔径下,小孔相对交叠率存在一个阈值,当交叠率大于该阈值,光场恢复质量显著提高,且随着交叠率继续增大,光场恢复质量越好,总体上计算迭代收敛速度越快;在相同交叠率下,小孔孔径越小,则恢复质量越高,总体上收敛速度更快。研究结果可以为实验提供指导:在实验中要尽可能选择越小的孔径和更

大的交叠率,可以得到更好的恢复质量,但同时也要根据实际需要兼顾整个系统的响应速度。上述研究成果对该技术在显微成像领域的进一步应用,以及该技术在诸如合成孔径成像、遥感成像等宏观成像领域的外场实验,都能起到一定程度的指导作用。

参 考 文 献

- 1 G Zheng, R Horstmeyer, C Yang. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy[J]. Nature Photonics, 2013, 7(9): 739-745.
- 2 X Ou, R Horstmeyer, C Yang. Quantitative phase imaging via Fourier ptychographic microscopy[J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4845-4848.
- 3 S Dong, R Shiradkar, P Nanda. Spectral multiplexing and coherent-state decomposition in Fourier ptychographic imaging[J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(6): 1757-1767.
- 4 G Zheng. Fourier ptychographic imaging[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4).
- 5 G Zheng, X Ou, R Horstmeyer, *et al.*. Fourier ptychographic microscopy: A gigapixel superscope for biomedicine[J]. Optics and Photonics News, 2014, 25(4): 26-33.
- 6 J R Fienup. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. Opt Lett, 1978, 3(1): 27-29.
- 7 J R Fienup. Phase retrieval algorithms: A comparison[J]. Appl Opt, 1982, 21(15): 2758-2769.
- 8 L Waller, S S Kou, C J R Sheppard, *et al.*. Phase from chromatic aberrations[J]. Opt Express, 2010, 18(22): 22817-22825.
- 9 C H Lu, C Barsi, M O Williams, *et al.*. Phase retrieval using nonlinear diversity[J]. Appl Opt, 2013, 52(10): D92-D96.
- 10 H M L, Faulkner, J M Rodenburg. Movable aperture lensless transmission microscopy: A novel phase retrieval algorithm[J]. Phys Rev Lett, 2004, 93(2): 023903.
- 11 M Guizar-Sicairos, J R Fienup. Phase retrieval with transverse translation diversity: A nonlinear optimization approach[J]. Opt Express, 2008, 16(10): 7264-7278.
- 12 P Thibault, M Dierolf, O Bunk, *et al.*. Probe retrieval in ptychographic coherent diffractive imaging[J]. Ultramicroscopy, 2009, 109(4): 338-343.
- 13 A M Maiden, J M Rodenburg, M J Humphry. Optical ptychography: A practical implementation with useful resolution[J]. Opt Lett, 2010, 35(15): 2585-2587.
- 14 F Hüe, J M Rodenburg, A M Maiden, *et al.*. Extended ptychography in the transmission electron microscope: Possibilities and limitations [J]. Ultramicroscopy, 2011, 111(8): 1117-1123.
- 15 Y Wang, T Li, Q Gao, *et al.*. Application of diffractive optical elements for controlling the light beam in ptychography[J]. Opt Eng, 2013, 52(9): 091720.
- 16 S Dong, R Horstmeyer, R Shiradkar, *et al.*. Aperture-scanning Fourier ptychography for 3D refocusing and super-resolution macroscopic imaging[J]. Opt Express, 2014, 22(11): 13586-13599.
- 17 Wang Yali, Shi Yishi, Li Tuo, *et al.*. Research on the key parameters of illuminating beam for imaging via ptychography in visible light band[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 064206.
王雅丽, 史祎诗, 李 拓, 等. 可见光域叠层成像中照明光束的关键参量研究[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 064206.

栏目编辑: 苏 岑