

X 光超瑞利散斑场傅里叶变换关联成像模拟研究

陈倩^{1,2}, 喻虹^{1,3*}, 谈志杰¹, 朱瑞国¹, 韩申生^{1,3}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

摘要 X 光傅里叶变换关联成像有望实现台式纳米显微系统,但在实际应用中受限于较低的光通量和成像信噪比,重构图像质量不佳。为解决这一问题,针对 X 光调制屏的二元特性,研究了基于 X 光超瑞利散斑场的傅里叶变换关联成像技术,并理论推导了二元调制屏调制散斑场,提出将散斑场对比度以及局部对比度之差作为目标函数,用带精英策略的非支配排序遗传算法优化设计二元调制屏。数值仿真结果表明,该方法可以得到高对比度的 X 光超瑞利散斑场,利用 X 光超瑞利散斑场可实现傅里叶变换关联成像,提高图像可见度,在低信噪比条件下提高图像质量。

关键词 X 射线光学; X 光关联成像; 超瑞利散斑场; 带精英策略的非支配排序遗传算法

中图分类号 O434.19

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1934001

Simulation Research on X-Ray Fourier-Transform Ghost Imaging Using Super-Rayleigh Speckle Field

Chen Qian^{1,2}, Yu Hong^{1,3*}, Tan Zhijie¹, Zhu Ruiguo¹, Han Shensheng^{1,3}

¹Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences,

Hangzhou, Zhejiang 310024, China

Abstract X-ray Fourier-transform ghost imaging has the potential to achieve tabletop nanoscale microscopy. However, due to the limited luminous flux in practical applications, the imaging signal-to-noise ratio is low, which leads to poor image quality. In light of the binary characteristics of the X-ray modulating screen, this paper studies the X-ray Fourier-transform ghost imaging using a super-Rayleigh speckle field to solve the above problem. The theoretical derivation of the X-ray speckle field generated by the binary modulation screen is first carried out. Then, with the speckle contrast and the difference of local contrast as objective functions, the non-dominated sorting genetic algorithm with elite strategy is adopted to optimize the design of the binary modulation screen. Numerical simulation results show that the proposed method can obtain high-contrast X-ray super-Rayleigh speckle fields, with which the Fourier-transform ghost imaging can be realized. As a result, the image visibility can be enhanced, and the image quality can be improved especially at a low signal-to-noise ratio.

Key words X-ray optics; X-ray ghost imaging; super-Rayleigh speckle field; non-dominated sorting genetic algorithm with elite strategy

OCIS codes 340.7440; 030.6600; 030.6140

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(11627811)、国家重点研发计划(2017YFB0503303)

通信作者: *yuhong@siom.ac.cn

1 引言

X 光具有波长短、穿透性强的特点,成像时不需要对样品进行复杂制样,因而 X 光成像成为观察生物内部结构的有力工具^[1-3]。传统的 X 光成像技术包括 X 光吸收成像、X 光相衬成像^[4-5]和 X 光相干衍射成像^[6-7],是通过探测光场的强度分布,即光场的一阶关联得到待测样品的信息。与传统的 X 光成像方式不同,X 光傅里叶变换关联成像(FGI)利用光场的高阶关联特性,通过对参考臂和探测臂的散斑场进行关联计算获取样品的傅里叶像,具有物像分离、非相干光源成像等优点^[8]。2016 年,Yu 等^[9]首次完成了 X 光 FGI 的原理演示实验,并在此基础上开展了台式 X 光 FGI 系统研究^[10-15]。但由于实验室小型 X 光光源的光通量较低,考虑到成像系统的固有噪声,台式系统 X 光 FGI 只能在低信噪比条件下进行,得到的傅里叶像可见度较低,图像质量不佳。要解决这一问题,关键在于提高 X 光散斑场的对比度,实现低信噪比下的高质量成像^[16-17]。

通过对散斑场进行设计可以提高散斑场对比度,以及成像质量。通过测量矩阵优化可以进行散斑场设计,现有的测量矩阵优化方法包括多尺度散斑矩阵^[18-20]、Hadamard 基矩阵^[21-22],基于正弦变换与 Fourier 基矩阵的优化等^[23-28],它们可以减少测量次数,提高采样效率,但并未对提高散斑场对比度进行探究。常规关联成像中的散斑场一般是瑞利散斑场,其散斑场对比度为 1,而对比度高于 1 的散斑场称之为超瑞利散斑场^[16]。产生对比度高的超瑞利散斑场技术已经取得了一些研究进展。在可见光波段,Bromberg 等^[16]对瑞利散斑场高阶关联后的光场进行傅里叶逆变换,将得到的相位部分加载到空间光调制器(SLM)上,实现了远场的超瑞利散斑场。Liu 等^[17]基于光路可逆的原理,在不同的距离下加载不同的相位矩阵到 SLM 上,实现了 SLM 和散斑场距离可调的超瑞利散斑场。但上述方法对光场进行调制都是采用在 $[0, 2\pi]$ 内变化的相位矩阵,矩阵元为连续分布。然而在 X 光 FGI 中,受限于 X 光元件的加工工艺,光场调制只能采用二元调制屏,上述方法并不适用。

本文从理论上推导了参考臂散斑场的强度分布关于二元调制屏孔分布的表达式,通过分析超瑞利散斑场的特性设计了目标函数,提出用带精英策略的非支配排序遗传(NSGA-II)算法对调制屏孔分布进行优化,产生 X 光超瑞利散斑场。通过数值模

拟说明了 NSGA-II 算法产生的超瑞利散斑场的分布特点,并与瑞利散斑场进行对比,验证了 X 光超瑞利散斑场用于 FGI 衍射成像的可见度更高,在信噪比较低的情况下可显著提高 X 光 FGI 重建图像质量。

2 理论模型与方法

2.1 傅里叶变换关联成像基本原理

傅里叶变换关联成像通过计算参考光路和探测光路光强涨落之间的关联得到样品的傅里叶像。其成像原理如图 1 所示,入射光经过二元调制屏后分成两路光,一路光不经过样品,为参考光路,其光强由具备空间分辨能力的面探测器 D_r 记录,光强的空间分布为 $I_r(x_r, y_r)$;一路光经过样品,为探测光路,其光强由点探测器 D_t 记录,光强的空间分布为 $I_t(x_t, y_t)$ 。

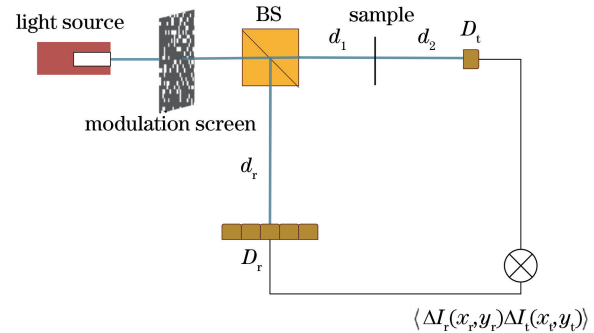


图 1 傅里叶变换关联成像原理图

Fig. 1 Schematic of Fourier-transform ghost imaging

对这两路光的光强涨落进行关联计算,当满足 $d_r = d_1 + d_2$ 时^[8],

$$\langle \Delta I_r(x_r, y_r) \Delta I_t(x_t, y_t) \rangle \propto \left| \mathcal{F} \left[\frac{-2\pi(x_r - x_t)}{\lambda d_2}, \frac{-2\pi(y_r - y_t)}{\lambda d_2} \right] \right|^2, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; $\mathcal{F}(\cdot)$ 为样品透过率函数的傅里叶变换。即通过关联计算后可以得到样品傅里叶变换的模平方,再反演得到样品的透过率函数。

2.2 X 光二元调制屏散斑场理论模型

在 X 光傅里叶关联成像中,X 光经过二元调制屏后形成散斑场,考虑二元孔分布的调制屏,对图 1 中的参考光路进行分析。由于二元调制屏 (x_s, y_s) 处只可能是“有孔”或“无孔”,将孔分布函数 $g(x_s, y_s)$ 定义为

$$g(x_s, y_s) = \begin{cases} 1, & \text{with a hole at } (x_s, y_s) \\ 0, & \text{no hole at } (x_s, y_s) \end{cases}. \quad (2)$$

在调制屏的后表面光场为二值分布,受到孔调

制处的光场记为 E_{s1} , 受到屏调制处的光场记为 E_{s2} , 则调制屏后表面光场为

$$E_s(x_s, y_s) = E_{s1}g(x_s, y_s) + E_{s2}[1 - g(x_s, y_s)], \quad (3)$$

式中: E_{s1} 和 E_{s2} 可由光与介质相互作用的经典理论得到。即

$$\begin{cases} E_{s1} = E_0 \exp(ikh) \\ E_{s2} = E_0 \exp(-k\beta h) \exp[ik(1-\delta)h] \end{cases}, \quad (4)$$

式中: E_0 、 h 、 k 分别为入射 X 光的初始光场、调制屏的厚度和 X 光的波矢大小; β 、 δ 分别为调制屏复折

射率 $1 - \delta + i\beta$ 的吸收因子和相位因子。产生的 X 光散斑场要满足 FGI 关联成像要求, 则经过调制屏后 E_{s1} 和 E_{s2} 的相位差需为 π ^[29], 由此可知:

$$k\delta h = \pi. \quad (5)$$

将(4)式、(5)式代入(3)式, 经整理可得:

$$E_s(x_s, y_s) = E_{s1}[1 + \exp(-\pi\beta/\delta)]g(x_s, y_s) - E_{s1}\exp(-\pi\beta/\delta). \quad (6)$$

经过二元调制屏后 X 光在空间中自由传播, 由菲涅耳衍射公式可以得到参考臂探测面的散斑场分布, 进一步得到光强分布为

$$I_r(x_r, y_r) = \left| \frac{\exp(ikd_r)}{i\lambda d_r} \iint E_s(x_s, y_s) \exp\left\{i \frac{k}{2d_r} [(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2]\right\} dx_s dy_s \right|^2 = \frac{E_0^2}{\lambda^2 d_r^2} \left| \iint \{[1 + \exp(-\pi\beta/\delta)]g(x_s, y_s) - \exp(-\pi\beta/\delta)\} \exp\left\{i \frac{k}{2d_r} [(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2]\right\} dx_s dy_s \right|^2, \quad (7)$$

参考面散斑场对比度 C_r 为

$$C_r = \sqrt{\bar{I}_r^2(x_r, y_r) / \bar{I}_r(x_r, y_r)^2 - 1}. \quad (8)$$

当 $g(x_s, y_s)$ 为随机的二元函数, 即孔随机分布时在参考面产生瑞利散斑场, 即 $C_r = 1$ ^[30], 通过优化 $g(x_s, y_s)$ 可以得到 $C_r > 1$ 的超瑞利散斑场。

2.3 超瑞利散斑场 NSGA-II 算法设计

在优化过程中首先对 $g(x_s, y_s)$ 进行处理。由于 $g(x_s, y_s)$ 在数值计算中是离散的, 可将其转化为仅含有 0、1 元素的二值矩阵 \mathbf{G} , 所在的行和列与 (x_s, y_s) 对应, 对 \mathbf{G} 进行优化。接下来确定产生超瑞利散斑场的目标函数。算法需要将初始矩阵优化为产生 $C_r > 1$ 的超瑞利散斑场的矩阵, C_r 要尽可能增大, 因此将 $\max\{C_r\}$ 作为目标函数。除了 $C_r > 1$, 超瑞利散斑场的另一个特点是散斑场内高亮度的散斑在为数不多的分散区域, 因此将局部散斑场对比度之差 ΔC 作为第二个目标函数, 它可以反映不同区域的高亮度散斑比例的差异。对于 $l \times l$ 大小的区域 L , 局部散斑场对比度^[31]为

$$C = \frac{\sigma_l}{\bar{I}}, \quad (9)$$

式中: σ_l 和 \bar{I} 分别为 L 中光强的标准差和均值, 反映了该区域内高亮度的散斑比例。在参考面选取 n 个不重叠的大小相同的区域, 这 n 个区域的散斑场局部对比度为 C_1, C_2, \dots, C_n , 局部对比度之差 ΔC 为

$$\Delta C = \max\{C_1, C_2, \dots, C_n\} - \min\{C_1, C_2, \dots, C_n\}. \quad (10)$$

ΔC 越小, 这 n 个区域内高亮度散斑的比例越接近, 越有利于这些散斑分散到这 n 个区域。综上所述, 将 $\max\{C_r\}$ 和 $\min\{\Delta C\}$ 作为目标函数, 进行散斑场优化。

由于目标函数不止一个, 考虑采用多目标优化算法。由于多个目标之间是相互约束、相互排斥的, 使得各目标不能同时达到各自的最优值, 多目标优化问题一般只能得到一组最优解集, 并且这些解之间无法进一步比较相互间的优劣性。称这样的一组解为 Pareto 最优解^[32]。传统的多目标优化方法包括加权求和法, ϵ -约束法、最小-最大法等, 往往通过转化为单目标问题, 用数学规划的方法来求解, 效率较低且难以得到 Pareto 最优解^[33]。相比于这些算法, 遗传算法的全局搜索能力更好且能以较大的概率找到全局最优解, 对搜索 Pareto 最优解很有帮助。NSGA-II 是基于 Pareto 最优解的多目标遗传算法, 对种群中的个体按 Pareto 最优解进行排序, 按照序值从小到大选择个体, 若某些个体具有相同的序值, 则偏好于那些位于目标空间中稀疏区域的个体, 因此 NSGA-II 可以得到分布均匀的非劣最优解集^[34-35]。下面采用 NSGA-II 设计二元调制屏实现高对比度的超瑞利散斑场, 算法流程如图 2 所示。

首先初始化种群, 由于矩阵 \mathbf{G} 为二值分布, 采用二进制编码方式对 \mathbf{G} 进行编码产生 0 或者 1 随机分布的个体。生成初始种群后对所有个体非支配

排序使之分层,保证个体从各个维度上逼近最优,对同一层的个体采用拥挤度比较算子进行排序,保证种群的多样性^[34]。通过锦标赛选择策略淘汰在排序中靠后的个体,选择出父代,被选择的个体经过单点交叉和多项式变异操作产生子代。为了保证种群中的优秀个体不会被遗漏,采用精英策略合并子代和父代种群,让父代中的优秀个体可以和子代个体共同竞争产生下一代。重复以上操作,当迭代次数 T 达到最大次数 T_{\max} 时算法终止,种群的第一层所有个体对应的解集为最优解。

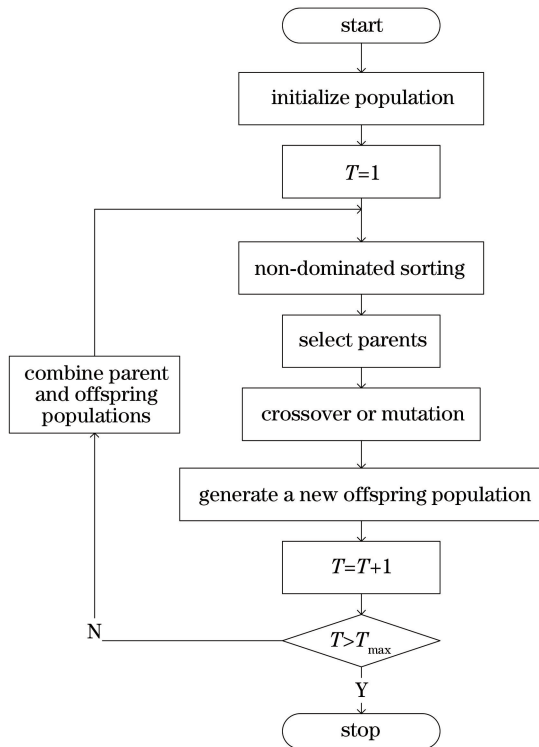


图 2 NSGA-II 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the NSGA-II algorithm

3 数值模拟

3.1 NSGA-II 算法产生的超瑞利散斑场

模拟波长为 1 nm 的 X 光采用上述方法设计的调制屏获取超瑞利散斑场。调制屏材质为金,相应的复折射率 $1 - \delta + i\beta$ 中 $\delta = 1.457 \times 10^{-3}$, $\beta = 5.145 \times 10^{-4}$,调制屏上的孔尺寸为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$,辐照调制屏的光源尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。调制屏到样品的距离 $d_1 = 3.5 \text{ cm}$,样品到探测器距离 $d_2 = 7.5 \text{ cm}$,调制屏到探测器的距离 $d_r = 11 \text{ cm}$,满足 $d_r = d_1 + d_2$ 。探测面散斑场尺寸为 $44 \mu\text{m} \times 44 \mu\text{m}$,用 NSGA-II 算法优化,初始的种群包含 50 个个体,交叉率设为 0.8,变异率设为 0.1,迭代最大

次数 $T_{\max} = 50$,目标函数中的局部对比度之差所选区域个数 $n = 3$ 。

采用 Pareto 最优解前沿对使用 NSGA-II 设计调制屏的有效性进行说明。图 3 为不同迭代次数下的 Pareto 前沿,每个点对应了 Pareto 最优解的其中一个解,对应的坐标为上述的两个目标函数值 ΔC 和 C_r ,所有相同颜色的点构成了某个迭代次数下的 Pareto 最优解前沿,当这些点分布越均匀越连续,说明最优解的多样性越好。从图中可以看出,迭代次数相同时 Pareto 最优解前沿向 ΔC 减小、 C_r 增大和 ΔC 增大、 C_r 减小两个方向延伸,说明这两个函数的优化存在相互约束,不好同时优化到最大值,NSGA-II 的优化提供了多个可行解。随着迭代次数的增加,最优解的解的个数增多,且分布更加连续和均匀,分布更为广泛,保证了最优解的多样性。迭代的过程中 Pareto 最优解前沿朝 C_r 增大的方向推进,说明 NSGA-II 可以提高散斑场的对比度。

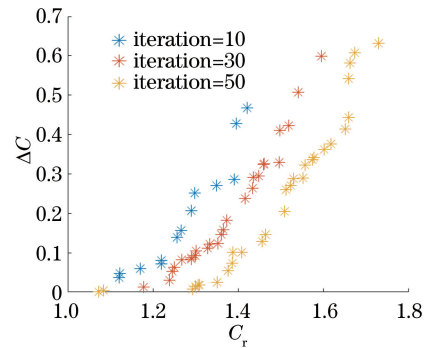


图 3 不同迭代次数下的 Pareto 最优解前沿

Fig. 3 Pareto optimal solutions at different iterations

取 Pareto 最优解前沿的其中一个解进行分析,对应的调制屏和超瑞利散斑场光强分布如图 4(a)、(b)所示,图 4(a)中白色区域代表孔分布。分析超瑞利散斑场的光场特性,将其与图 4(c)、(d)所示孔随机分布的调制屏及对应的瑞利散斑场对比,白色区域代表孔分布。瑞利散斑场亮斑较多且与周围暗的区域光强差异不大,对比度 $C_r = 0.9815$ 。超瑞利散斑场的光强集中于三个散斑,这些散斑明显比周围亮许多,对比度 $C_r = 1.7364$ 。优化得到的超瑞利散斑场通过将光强集中于少数颗粒,其他区域光强减小,拉大了亮暗区域的光强之差,实现了对比度的明显提高。

为了对散斑场光强分布做进一步说明,对图 4(b)、(d)进行总光强归一化,二者的强度概率分布函数如图 5(a)所示,横坐标 $I/\langle I \rangle$ 为光强与光强平

均之比,纵坐标 $P(I)$ 为对应的概率分布。由于光强分布特性不同,优化后超瑞利散斑场的光强统计特性不同于瑞利散斑场,从图中可以看出,超瑞利散斑场光强相对低 ($I/\langle I \rangle < 0.7$) 的区域和光强相对高 ($I/\langle I \rangle > 5.1$) 区域的概率分布函数值也大于瑞利散斑场,两极分化更明显。

根据散斑场分布可以分析超瑞利散斑场对关联

成像可见度的影响。关联成像的可见度由散斑场归一化二阶 Glauber 函数 $g^{(2)}$ 的峰值反映,其峰值越大,可见度越高^[36]。计算参考面中心点和其他点的归一化二阶关联函数,其计算公式为

$$g^{(2)}(x_r, y_r; 0, 0) = \frac{\langle I_r(x_r, y_r) I_r(0, 0) \rangle}{\langle I_r(x_r, y_r) \rangle \langle I_r(0, 0) \rangle} \quad (11)$$

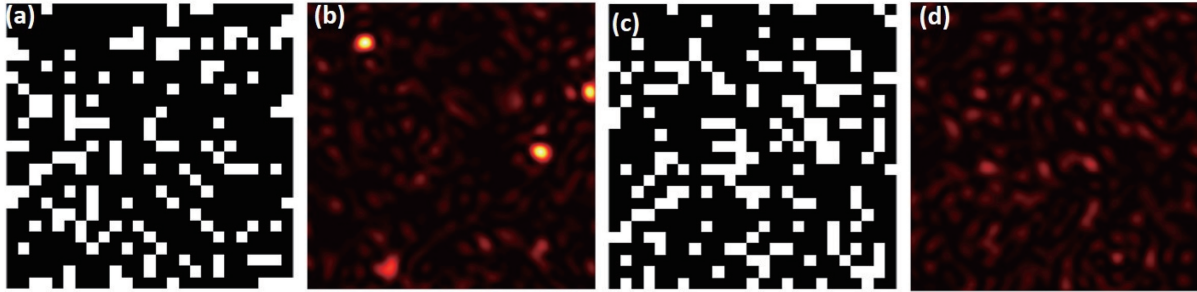


图 4 优化后的二元调制屏和随机分布的二元调制屏结果对比。(a) NSGA-II 优化后的二元调制屏;(b)由(a)产生的超瑞利散斑场;(c)孔随机分布的二元调制屏;(d)由(c)产生的瑞利散斑场

Fig. 4 Comparison between optimized binary modulation screen and randomly distributed binary modulation screen.

(a) Binary modulation screen optimized by NSGA-II ; (b) super-Rayleigh speckle field generated by Fig. (a); (c) binary modulation screen with randomly distributed holes; (d) Rayleigh speckle field generated by Fig. (c)

超瑞利散斑场和瑞利散斑场的 $g^{(2)}$ 在 $x_r = 0$ 处的横截面如图 5(b)所示,这两条线均在中心点取得最大值,往两边趋向平缓。两个散斑场的 $g^{(2)}$ 峰值

分别为 2.00 和 2.81,超瑞利散斑场峰值 $g^{(2)}$ 大于瑞利散斑场,用超瑞利散斑场进行 FGI,其可见度较瑞利散斑场将有所提升。

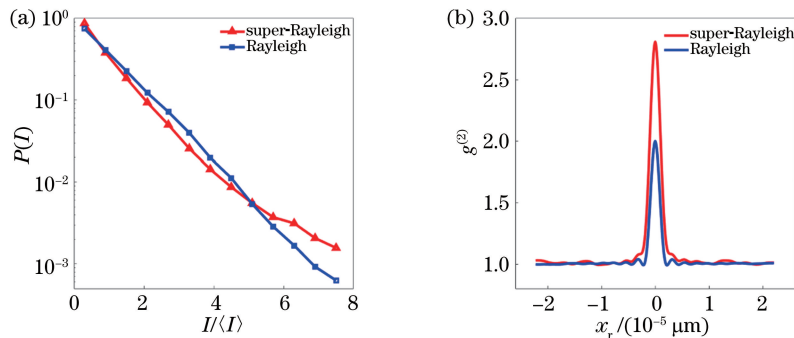


图 5 超瑞利散斑场和瑞利散斑场特性对比。(a)强度概率分布函数对比;(b)二阶归一化关联函数对比

Fig. 5 Characteristics comparison between super-Rayleigh speckle field and Rayleigh speckle field. (a) Comparison of intensity probability distribution functions; (b) comparison of normalized second-order correlation functions

3.2 超瑞利散斑场傅里叶变换关联成像

将设计的 X 光超瑞利散斑场用于傅里叶变换关联成像,对尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 的“E”场字母样品进行成像。仿真中采用的散斑场测量次数为 800。将超瑞利散斑场和瑞利散斑场 FGI 得到的关联结果与理论傅里叶像进行对比,如图 6(a)~(c)所示,图中两种散斑场关联结果都与理论傅里叶像一致。对图 6(a)~(c)沿纵向方向选取横截面,峰值归一化后得到图 6(d),可以看出两种散斑场衍射

峰的位置都与理论结果接近,得到的曲线与理论曲线整体上符合,表明在 X 光 FGI 中超瑞利散斑场与瑞利散斑场一样可以得到样品的傅里叶像。关联计算得到的是样品透过率函数傅里叶变换的模平方,对其进行相位恢复得到的重建结果就是样品透过率函数的空间分布,如图 6(e)、(f)所示。可以看到,超瑞利散斑场与瑞利散斑场一样恢复出了样品“E”的分布,说明超瑞利散斑场可以用于 FGI,实现对样品的重建。

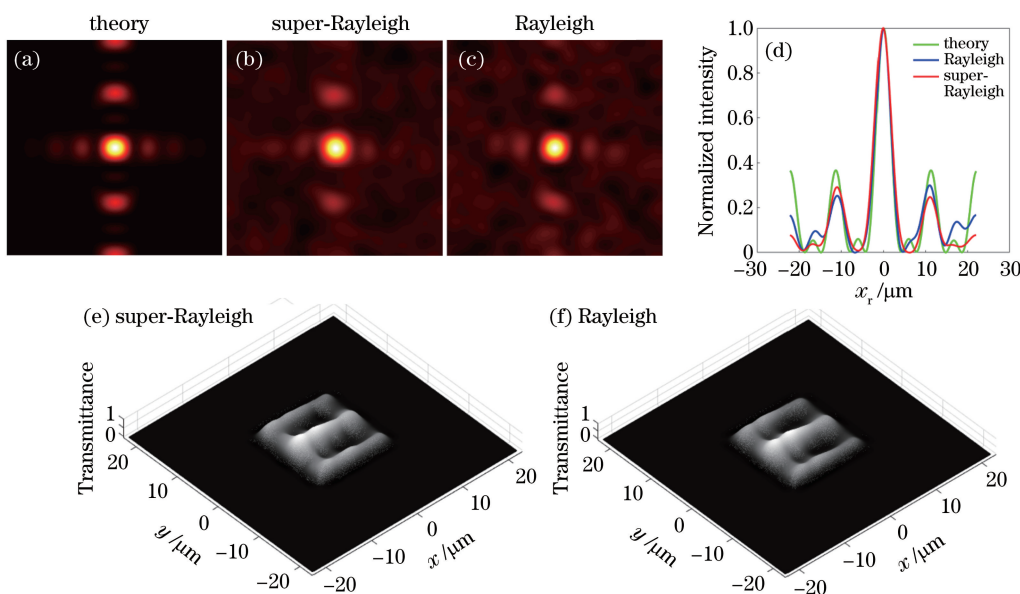


图 6 样品“E”的超瑞利散斑场和瑞利散斑场 FGI 结果。(a)~(c)样品的理论傅里叶谱和超瑞利及瑞利散斑场关联结果;(d)图(a)~(c)的纵向横截面曲线;(e)(f)超瑞利和瑞利散斑场重建图像结果

Fig. 6 FGI results of sample "E" with super-Rayleigh speckle field and Rayleigh speckle field. (a)–(c) Theoretical Fourier pattern of sample and correlation results of super-Rayleigh and Rayleigh speckle fields; (d) cross-section curves of Fig. (a)–(c); (e)(f) reconstructed images of super-Rayleigh and Rayleigh speckle fields

结合此关联结果分析超瑞利散斑场对 FGI 可见度的影响。关联成像可见度定义为^[10]

$$v = \left[\frac{\langle \Delta I_r(x_r, y_r) \Delta I_t(x_t, y_t) \rangle}{\langle I_r(x_r, y_r) \rangle \langle I_t(x_t, y_t) \rangle} \right]_{\max} \quad (12)$$

可见度越高,就越有利于重建图像。对超瑞利散斑场和瑞利散斑场关联结果进行计算,可见度分别为 0.2595 和 0.1058,前者相对于后者有明显提升,超瑞利散斑场可以提高 FGI 的可见度。

由于实验室 X 射线源的光通量限制,台式 X 光 FGI 成像系统的信噪比较低,下面分析在低信噪比条件下超瑞利散斑场对成像质量的影响。主要考虑

系统中的高斯噪声,对于均值为 0 的高斯噪声,信噪比^[37]定义为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\mu_S}{\sigma_N^2} \quad (13)$$

式中: μ_S 、 σ_N 分别为信号强度的均值和高斯噪声的标准差; R_{SN} 的单位为 dB。图 7 给出了信噪比为 5 dB、0 dB、-5 dB、-10 dB 时超瑞利散斑场和瑞利散斑场的关联结果。当信噪比减小,即噪声变大时,两个结果都趋向模糊。相对于瑞利散斑场,超瑞利散斑场的关联结果变化较小,与背景区别较大,细节部分更明显。从整体上看,在低信噪比的条件下

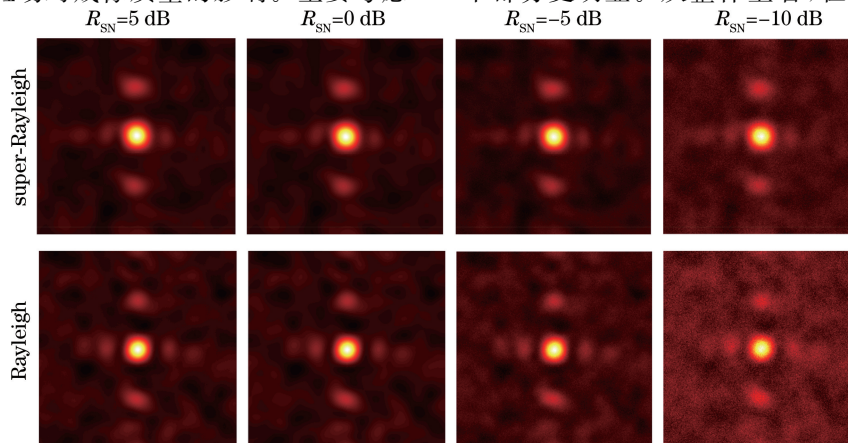


图 7 不同信噪比下的超瑞利散斑场和瑞利散斑场 FGI 结果

Fig. 7 FGI results of super-Rayleigh speckle fields and Rayleigh speckle fields under different signal-to-noise ratios

超瑞利散斑场的背景噪声要小于瑞利散斑场的背景噪声,具有更强的抗噪性。

对不同信噪比下超瑞利散斑场和瑞利散斑场的关联结果进行相位恢复,得到 FGI 的重建图像及对应的均方误差,如图 8 所示。从图中可以看出,当信噪比减小时,瑞利散斑场成像的图像质量下降明显,

而超瑞利散斑场在 -10 dB 时重建图像仍可分辨。从 f_{MSE} 来看,超瑞利散斑场的重建图像 f_{MSE} 变化也更为缓慢,信噪比为 5 dB 时两者相差不大,降低到 0 dB 后超瑞利散斑场的 f_{MSE} 低于瑞利散斑场,说明在低信噪比的情况下,超瑞利散斑场的重建图像质量好于瑞利散斑场。

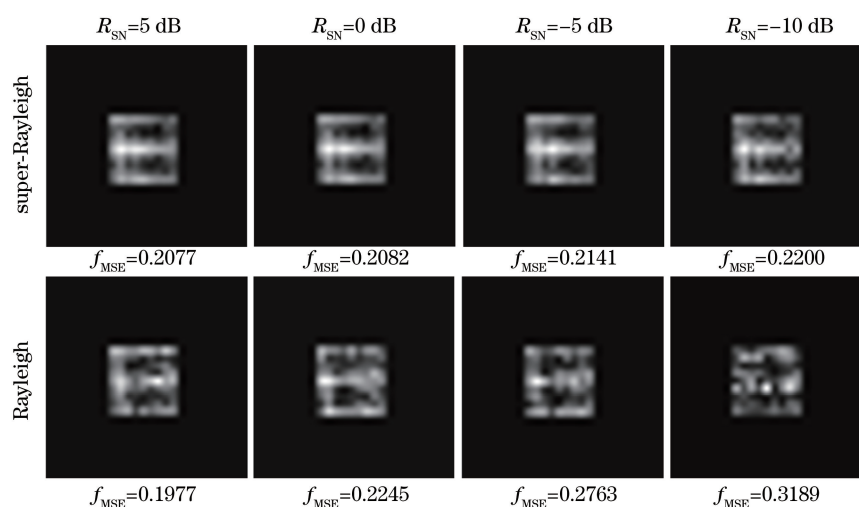


图 8 不同信噪比下的超瑞利散斑场和瑞利散斑场重建图像

Fig. 8 Reconstructed images of super-Rayleigh speckle fields and Rayleigh speckle fields under different signal-to-noise ratios

4 结 论

本文结合已有的 FGI 理论,针对 X 光 FGI 成像系统特点,建立了二元调制屏调控 X 光 FGI 散斑场的理论模型,提出利用 NSGA-II 算法设计二元调制屏孔分布来提高 X 光散斑场对比度,从而提高成像质量。将散斑场对比度和局部对比度之差作为目标函数,利用 NSGA-II 算法对二元调制屏孔分布进行优化,给出了优化后得到的 X 光超瑞利散斑场,与常规的瑞利散斑场相比,其对比度显著提高。并且模拟验证了将设计的 X 光超瑞利散斑场用于 FGI,可以提高成像可见度,尤其是在低信噪比的情况下可以提高重建图像质量。以上结果为设计 X 光超瑞利散斑场 FGI 系统提供了参考,有利于在低信噪比或者光通量较低的情况下实现高质量 X 光关联成像,对实现 X 光关联成像显微应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Shi Y G. A glimpse of structural biology through X-ray crystallography [J]. *Cell*, 2014, 159(5): 995-1014.
- [2] Fleury B, Cortes-Huerto R, Taché O, et al. Gold nanoparticle internal structure and symmetry probed by unified small-angle X-ray scattering and X-ray diffraction coupled with molecular dynamics analysis [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 6088-6094.
- [3] Kosynkin D V, Higginbotham A L, Sinitskii A, et al. Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons [J]. *Nature*, 2009, 458(7240): 872-876.
- [4] Davis T J, Gao D, Gureyev T E, et al. Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays [J]. *Nature*, 1995, 373(6515): 595-598.
- [5] Yao S K, Fan J D, Zong Y B, et al. Equally sloped X-ray microtomography of living insects with low radiation dose and improved resolution capability [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(12): 123702.
- [6] Miao J W, Charalambous P, Kirz J, et al. Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens [J]. *Nature*, 1999, 400(6742): 342-344.
- [7] Fan J D, Sun Z B, Zhang J, et al. Quantitative imaging of single unstained magnetotactic bacteria by coherent X-ray diffraction microscopy [J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(12): 5849-5853.
- [8] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9): 093903.
- [9] Yu H, Lu R H, Han S S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X rays [J]. *Physical Review*

- Letters, 2016, 117(11): 113901.
- [10] Tan Z J, Yu H, Lu R H, et al. Study on fourier-transform ghost imaging with partially coherent X-ray [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0411001.
谈志杰, 喻虹, 陆荣华, 等. 部分相干 X 光傅里叶变换鬼成像研究 [J]. 光学学报, 2017, 37 (4): 0411001.
- [11] Zhu R G, Yu H, Lu R H, et al. Spatial multiplexing reconstruction for Fourier-transform ghost imaging via sparsity constraints [J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2181-2190.
- [12] Yang S C, Yu H, Lu R H, et al. Simulation of Fourier-transform ghost imaging using polychromatic X-ray sources [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0511003.
杨善初, 喻虹, 陆荣华, 等. 非单色 X 光傅里叶变换鬼成像模拟 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0511003.
- [13] Tan Z J, Yu H, Lu R H, et al. Non-locally coded Fourier-transform ghost imaging [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2937-2948.
- [14] Zhu R G, Yu H, Tan Z J, et al. Ghost imaging based on Y-net: a dynamic coding and decoding approach [J]. Optics Express, 2020, 28(12): 17556-17569.
- [15] Tan Z J, Yu H, Yang S C, et al. Fourier-transform ghost imaging with polychromatic light [J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(14): 1247-1253.
- [16] Bromberg Y, Cao H. Generating non-Rayleigh speckles with tailored intensity statistics [J]. Physical Review Letters, 2014, 112(21): 213904.
- [17] Liu S Y, Liu Z T, Hu C Y, et al. Spectral ghost imaging camera with super-Rayleigh modulator [J]. Optics Communications, 2020, 472: 126017.
- [18] Chen M L, Li E R, Han S S. Application of multi-correlation-scale measurement matrices in ghost imaging via sparsity constraints [J]. Applied Optics, 2014, 53(13): 2924-2928.
- [19] Ma S, Hu C Y, Wang C L, et al. Multi-scale ghost imaging LiDAR via sparsity constraints using push-broom scanning [J]. Optics Communications, 2019, 448: 89-92.
- [20] Olivas S J, Rachlin Y, Gu L, et al. Characterization of a compressive imaging system using laboratory and natural light scenes [J]. Applied Optics, 2013, 52 (19): 4515-4526.
- [21] Phillips D B, Sun M J, Taylor J M, et al. Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling [J]. Science Advances, 2017, 3(4): e1601782.
- [22] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, et al. A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging [J]. Scientific Reports, 2017, 7 (1): 3464.
- [23] Khamoushi S M M, Nosrati Y, Tavassoli S H. Sinusoidal ghost imaging [J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3452-3455.
- [24] Zhang Z B, Ma X, Zhong J G. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. Nature Communications, 2015, 6: 6225.
- [25] Huang J, Shi D F, Yuan K E, et al. Computational-weighted Fourier single-pixel imaging via binary illumination [J]. Optics Express, 2018, 26 (13): 16547-16559.
- [26] Wu Z W, Qiu X D, Chen L X. Current status and prospect for correlated imaging technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (6): 060001.
吴自文, 邱晓东, 陈理想. 关联成像技术研究现状及展望 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57 (6): 060001.
- [27] Mei X D, Gong W L, Han S S. Laser ghost imaging based on time-over-threshold technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0410003.
梅笑冬, 龚文林, 韩申生. 基于超阈值时间技术的激光关联成像 [J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0410003.
- [28] Zhou D, Cao J, Jiang Y H, et al. Speckle design method based on principal component analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (20): 201104.
周栋, 曹杰, 姜雅慧, 等. 基于主成分分析的散斑设计方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201104.
- [29] Zhao X, Yu H, Lu R H, et al. Research on pseudo-thermal source of X-ray Fourier-transform ghost imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (5): 0511001.
赵鑫, 喻虹, 陆荣华, 等. X 光傅里叶变换关联成像赝热光源研究 [J]. 光学学报, 2017, 37 (5): 0511001.
- [30] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications [M]. Colorado: Roberts and Company Publishers, 2007, 3: 27-30.
- [31] Duncan D D, Kirkpatrick S J, Wang R K. Statistics of local speckle contrast [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 25(1): 9-15.
- [32] Xie T, Chen H W. Evolutionary algorithms for multi-objective optimization and decision-making problems [J]. Engineering Science, 2002, 4(2): 59-68.
谢涛, 陈火旺. 多目标优化与决策问题的演化算法 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(2): 59-68.
- [33] Ma X S, Li Y L, Yan L. Comparison review of

- traditional multi-objective optimization methods and multi-objective genetic algorithm [J]. *Electric Drive Automation*, 2010, 32(3): 48-50, 53.
- 马小妹, 李宇龙, 严浪. 传统多目标优化方法和多目标遗传算法的比较综述[J]. *电气传动自动化*, 2010, 32(3): 48-50, 53.
- [34] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [35] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(3): 221-248.
- [36] Glauber R J. The quantum theory of optical coherence [J]. *Physical Review*, 1963, 130(6): 2529.
- [37] Candès E J, Li X D, Soltanolkotabi M. Phase retrieval from coded diffraction patterns[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2015, 39(2): 277-299.