

基于自相关与频谱叠层的超分辨成像*

李宗骏¹⁾ 张龙¹⁾ 龚文林^{1)2)3)†}¹⁾ (苏州大学光电科学与工程学院, 苏州 215006)²⁾ (江苏省先进光学制造技术重点实验室, 苏州 215006)³⁾ (空基信息感知与融合全国重点实验室, 洛阳 471099)

(2025 年 1 月 12 日收到; 2025 年 3 月 31 日收到修改稿)

基于 HBT(Hanbury Brown-Twiss) 的二阶自相关技术在非相干源照明和近场探测的条件下可以获得目标的傅里叶频谱信息, 然而获取高质量的频谱图像所需的测量次数较多, 且成像分辨率受到探测器的像素规模的限制. 为了解决上述问题, 本文结合多点并行关联重建算法和叠层成像的思想, 提出了一种基于自相关和频谱叠层的超分辨成像方法. 通过多点并行关联重建算法获取目标的不同频率信息, 在此基础上, 利用傅里叶变换的移频特性和叠层成像的思想实现频谱信息的扩展, 进而采用相位恢复算法重建目标的实空间图像. 理论分析和实验结果表明, 该方法在相同探测器像素规模的条件下可以实现 2 倍的超分辨率成像, 同时可以降低高质量频谱图像重建所需的测量次数. 该方法对于超分辨显微成像和高分辨运动目标成像具有重要的借鉴意义.

关键词: 超分辨率成像, 自相关, 频谱叠层, 相位恢复算法**PACS:** 42.30.Va, 42.30.Wb, 42.25.Kb, 42.30.Ms**DOI:** 10.7498/aps.74.20250043**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250043

1 引言

1956 年, Brown 和 Twiss^[1] 利用光场的二阶关联特性并通过计算两路探测器所记录光强信息的二阶自相关函数获得了星体的角直径, 开启了基于光场高阶关联特性获取目标信息的新篇章. 1963 年, Glauber^[2] 建立了光场的相干性理论, 阐述了光场一阶、二阶以及更高阶关联特性的差异, 为关联成像技术的诞生奠定了理论基础. 目前, 关联成像技术主要分为自相关和互相关两类探测系统, 前者以 HBT(Hanbury Brown-Twiss) 为代表性架构^[1,3], 后者以鬼成像 (ghost imaging, GI) 为代表性架构^[4-6]. 经过近年来的持续性深入研究, 关

联成像技术已经在遥感探测^[7,8]、三维成像^[9,10]、显微成像^[11,12] 以及医学成像^[13,14] 等方向取得了较为显著的研究进展.

与 GI 技术直接获取目标的实空间像不同, HBT 技术往往只能获取目标的傅里叶变换频谱信息, 需要通过相位恢复算法重建目标的实空间像, 对频谱信息的质量有较高的要求^[15,16]. 然而, 该技术在运动目标成像^[17,18]、散射介质成像^[19] 和 X 射线成像^[20,21] 具有更好的优势. 在实际过程中, 为了获取高质量的目标频谱信息, 关联成像技术往往需要大量的随机测量次数才能保证较高信噪比, 同时, 傅里叶变换频谱图像的频率带宽和成像分辨率通常也与探测器的像素规模相关^[22]. 目前, 为了减少高质量目标频谱信息获取所需的测量次数, 许多相关的数据

* 航空科学基金 (批准号: 202400010M3001)、国家自然科学基金 (批准号: 62471323) 和江苏省先进光学制造技术重点实验室 (批准号: ZZ2307) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wlgong@suda.edu.cn

处理方法和重建算法也相应地被提出, 比如: 基于探测信号的空域分割法^[23]、基于压缩感知和基于深度学习的频谱信息重建算法^[24,25]. 然而, 上述方法虽然能够提升目标频谱信息的信噪比, 但是图像重建所需的时间通常比较长且不能提升系统的成像分辨率. 近年来, 基于实空间像探测的傅里叶叠层成像技术证明了提升系统成像分辨率的可行性, 其核心是基于傅里叶变换的频移特性以及不同频谱图像信息之间存在部分重叠区域的特点, 通过频谱叠层和频率扩展可以获取待测目标更高空间分辨率的图像信息^[26,27]. 对于基于 HBT 架构的目标频谱信息获取方法, 面阵探测器上采样点的移动将会导致目标频谱信息的移动, 这一特性与傅里叶叠层成像技术类似. 因此, 本文借鉴于傅里叶叠层成像的思想, 将频谱叠层方法引入基于 HBT 架构的目标频谱信息获取过程, 提出了一种基于多点并行关联重建和频谱叠层的处理方法, 试图在较低测量次数下获取高质量目标频谱信息并实现超分辨率成像. 本文对该方法进行了相关的理论分析, 详细介绍了其图像重建过程, 并搭建了相应的实验系统对该方法的有效性进行了实验验证.

2 基本原理

2.1 理论分析

图 1 所示为基于自相关和频谱叠层的超分辨率成像装置结构图, 激光穿过直径为 D 的光阑照射于旋转毛玻璃 (rotating ground glass) 上形成赝热光源, 经过自由传播一段距离 z 后到达待测物体, 物体的透射信息经过一个 f 光学系统后由面阵探测器 (charge-coupled device, CCD) 进行探测与记录.

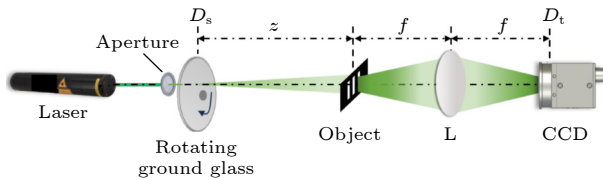


图 1 基于自相关和频谱叠层的超分辨率成像装置结构图
Fig. 1. The schematic of super-resolution imaging via auto-correlation and frequency ptychography.

根据光场的高阶相干性和关联成像理论^[2-5], 二阶关联函数 $\Delta G^{(2,2)}(x_t, x'_t)$ 可以表示为

$$\Delta G^{(2,2)}(x_t, x'_t) \propto \left| \int dx_1 dx_2 G^{(1,1)}(x_1, x_2) h_t^*(x_2, x'_t) h_t(x_1, x_t) \right|^2, \quad (1)$$

其中, $G^{(1,1)}(x_1, x_2)$ 表示毛玻璃平面处光场的一阶关联函数; $h_t(x_1, x_t)$ 表示毛玻璃平面到 CCD 平面的脉冲响应函数; $h_t^*(x_1, x_t)$ 表示该脉冲响应函数的复共轭. 假设激光发出的光束经旋转毛玻璃调制后产生的赝热光源是均匀且完全非相干的, 可得

$$G^{(1,1)}(x_1, x_2) = I_0 \delta(x_1 - x_2), \quad (2)$$

其中, I_0 为常数, $\delta(x)$ 为狄拉克 δ 函数. 对于图 1 所示的光学系统, 若透镜 L 的有效通光孔径足够大且满足旁轴近似的条件下, 则毛玻璃平面 D_s 到 CCD 平面 D_t 之间的脉冲响应函数可以表示为

$$h_t(x_1, x_t) \propto \int dx' \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda z} (x' - x_1)^2 \right\} t(x') \exp \left\{ \frac{-2j\pi}{\lambda f} x' x_t \right\}, \quad (3)$$

其中, $t(x)$ 为待测物体的透过率分布, 将 (2) 式和 (3) 式代入 (1) 式中, 则二阶关联函数为

$$\begin{aligned} \Delta G^{(2,2)}(x_t, x'_t) &\propto \left| \int dx_2 \int dx' \int dx'' \right. \\ &\times \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda z} (x'^2 - x''^2) \right\} t(x') t^*(x'') \\ &\times \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda z} (x'' - x') x_2 \right\} \exp \left\{ -\frac{2j\pi}{\lambda f} (x' x_t - x'' x'_t) \right\} \left. \right|^2. \end{aligned} \quad (4)$$

若照射在毛玻璃平面上的激光光斑大小足够大且 CCD 的横向尺寸大小为 R , 则 (4) 式可以化简为

$$\begin{aligned} \Delta G^{(2,2)}(x_t, x'_t) &\propto \left| \int dx' |t(x')|^2 \exp \left\{ -\frac{2j\pi}{\lambda f} (x_t - x'_t) x' \right\} \right|^2 \odot \text{rect} \left(\frac{x_t}{R} \right) \\ &= \left| \tilde{F} \left[|t(x')|^2 \right] \frac{2\pi}{\lambda f} (x_t - x'_t) \right|^2 \odot \text{rect} \left(\frac{x_t}{R} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\tilde{F}[f(x)]$ 表示对 $f(x)$ 进行傅里叶变换, $\text{rect}(x/R) = \begin{cases} 1, & |x| \leq R/2, \\ 0, & \text{else,} \end{cases}$, $\odot$ 表示哈达玛积. 从 (5) 式可以看出, 对于图 1 所示的光学系统, 关联运算的结果为物体透过率函数模平方的傅里叶变换. 对于以往的数据处理方法, 通常选取 $x'_t = 0$ 位置所对应的关联运算结果作为待测物体的信息提

取结果, 即 $\Delta G^{(2,2)}(x_t, x'_t = 0)$. 然而, 由于实际过程中 CCD 横向尺寸大小往往是有限的, 我们只能获得待测物体傅里叶谱的局部信息, 其对应的频谱带宽为 $B = 2\pi R/(\lambda f)$, 从而限制了系统的成像分辨率. 值得注意的是, 对于 (5) 式, 当 x'_t 取不同值时, 其对应的目标频谱图将以 $\Delta\omega = \frac{2\pi}{\lambda f}x'_t$ 进行平移, 随着 x'_t 偏离光轴距离的增加将会获得待测物体更高的频率信息, 从而拓展目标信息的频谱带宽, 并且当 x'_t 从 CCD 的中心位置平移到边缘时, 其频谱信息将增大 1 倍, 这将意味着在 CCD 横向尺寸相同的情况下能够实现 2 倍的超分辨成像 (即理论空间分辨率为 $0.61\lambda f/R$). 此外, 由于平移后的频谱之间存在相同的部分, 将不同平移量的频谱图进行对齐叠加可以提升图像重建的信噪比, 从而有利于降低图像重建所需的采样数, 这一点在文献 [23,28] 中得到了类似的验证.

2.2 图像重构

为了获取目标的超分辨图像信息, 图 2 给出了

基于多点并行关联重建和频谱叠层处理实现超分辨重构的基本框架, 主要分为多点并行关联重建、频谱叠层处理和基于相位恢复算法的实空间图像重建 3 个步骤. 其中, 多点并行关联重建主要是基于 (5) 式的物理机制获取不同探测点 x'_t 处所对应的目标傅里叶频谱图像, 频谱叠层处理则是将多点并行关联重建获得的具有频移特性的频谱图进行对齐处理, 而基于相位恢复算法的实空间图像重建对应于从频谱叠层处理得到的拓展频谱图中利用相位恢复算法获取目标的空间图像.

2.2.1 多点并行关联重建

如图 2(a) 所示, 设 CCD 的像素规模为 $m \times n$ (m, n 取奇数), 基于图 1 所示的光学系统, CCD 采集并记录了 N 张待测物体的散斑图信息. 其对应的第 k 张散斑图记为 $I^k(p, q)$, $k = 1, 2, \dots, N$, 其中, p 和 q 分别代表 CCD 所记录散斑图的横向和纵向像素位置. 以 CCD 中心像素点为零点建立 x - y 直角坐标系, 从零点出发分别以 Δs_x 和 Δs_y 为步长遍历整个 CCD 面, 则 CCD 面上对应的取点

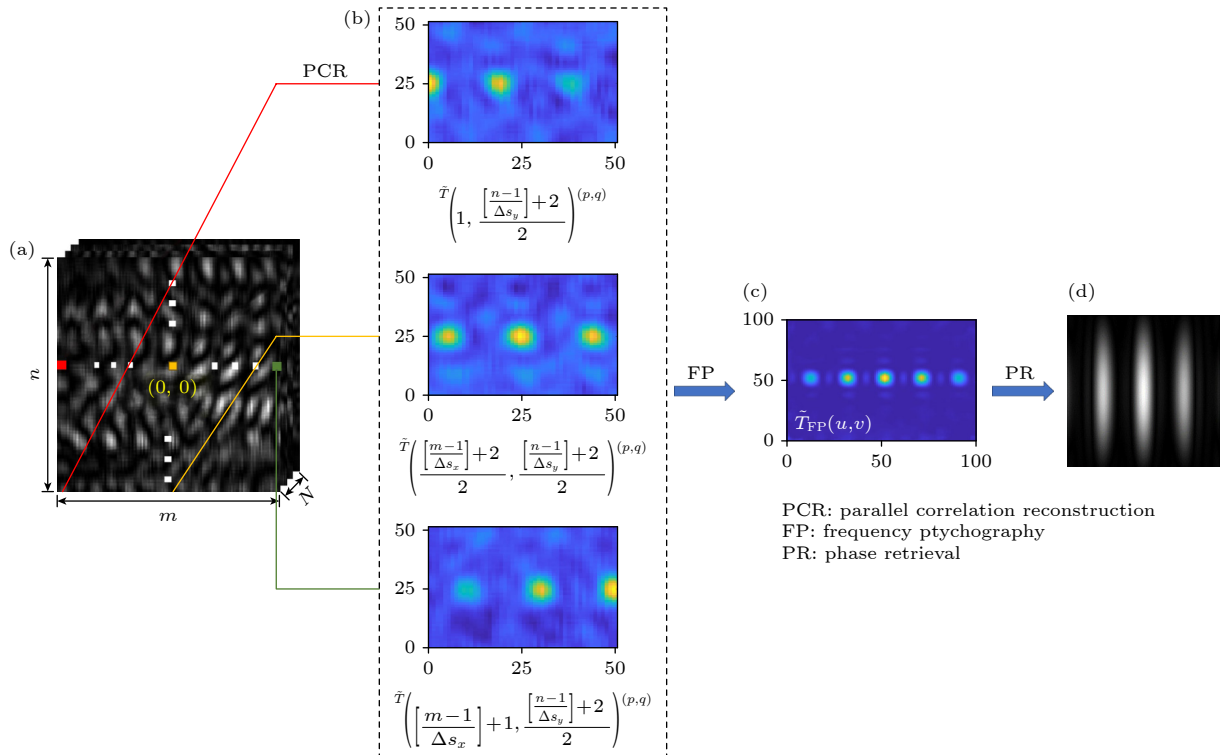


图 2 基于多点并行关联重建和频谱叠层处理实现超分辨重建的基本框架 (a) CCD 记录的图片; (b) 多点并行关联重建结果; (c) 频域叠层结果; (d) 基于相位恢复算法的实空间图像重建结果

Fig. 2. The framework of super-resolution image reconstruction based on multiple-point parallel correlation reconstruction and frequency ptychography: (a) The recorded images recorded by CCD; (b) the results of multi-point parallel correlation algorithm; (c) the results of frequency ptychography; (d) the image in the spatial domain reconstructed by phase-retrieval algorithm.

位置为:

$$x_t = \left\{ i - \frac{[(m-1)/\Delta s_x] + 2}{2} \right\} \cdot \Delta s_x,$$

$$y_t = \left\{ j - \frac{[(n-1)/\Delta s_y] + 2}{2} \right\} \cdot \Delta s_y,$$

此时 i 和 j 的取值范围为: $i = 1, 2, \dots, [(m-1)/\Delta s_x] + 1$; $j = 1, 2, \dots, [(n-1)/\Delta s_y] + 1$, $[\cdot]$ 表示取整操作. 在实际测量过程中, 考虑到光源辐照的非均匀性, 该因素往往对频谱叠层处理的结果影响较大, 采取以下的二阶关联运算公式进行图像重建, 即:

$$\tilde{T}_{(i,j)}(p, q) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [I^k(p, q) I^k(i, j)] - \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N I^k(p, q) \sum_{k=1}^N I^k(i, j)}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I^k(i, j)}. \quad (6)$$

将所有 i 和 j 的取值代入 (6) 式, 可以获得 $\{[(m-1)/\Delta s_x] + 1\} \times \{[(n-1)/\Delta s_y] + 1\}$ 张关联重构结果, 即为多点并行关联重建结果. 图 2(b) 所示为 CCD 上的 3 个像素点位置 (p, q) 分别取 $(-\frac{[(m-1)/\Delta s_x] + 2}{2} \Delta s_x, 0)$, $(0, 0)$, $(\frac{[(m-1)/\Delta s_x] + 2}{2} \Delta s_x, 0)$ 时所对应的关联重构结果, 即为 $\tilde{T}_{(1, \frac{[(n-1)/\Delta s_y] + 2}{2})}$, $\tilde{T}_{(\frac{[(m-1)/\Delta s_x] + 2}{2}, \frac{[(n-1)/\Delta s_y] + 2}{2})}$ 和 $\tilde{T}_{(\frac{[(m-1)/\Delta s_x] + 2}{2}, \frac{[(n-1)/\Delta s_y] + 2}{2})}$.

2.2.2 频谱叠层处理

正如图 2(b) 所示, 随着 CCD 上所取的 $I^k(p, q)$ 位置不同, 其重建的频谱图将发生平移, 可以将所获得的 $\{[(m-1)/\Delta s_x] + 1\} \times \{[(n-1)/\Delta s_y] + 1\}$ 张频谱图进行叠层处理, 从而获得一张具有更高带宽的频谱图. 频谱叠层处理的具体可分为两步: 第 1 步, 针对基于 (6) 式所重建的每一张 $m \times n$ 像素的关联重建结果 $\tilde{T}_{(i,j)}(p, q)$, 以 $\tilde{T}_{(\frac{[(m-1)/\Delta s_x] + 2}{2}, \frac{[(n-1)/\Delta s_y] + 2}{2})}(p, q)$ 作为基准图像, 在基准图像中, 目标频谱的零频位于该图像中心, 将 $\{[(m-1)/\Delta s_x] + 1\} \times \{[(n-1)/\Delta s_y] + 1\}$ 张频谱图按照计算出的平移量 $\Delta\omega = \frac{2\pi}{\lambda f} x'_t$ 与基准图像进行对齐, 使不同频谱图中的同一频率位置重合, 然后分别赋值于一个 $(2m-1) \times (2n-1)$ 的新矩阵中, 其对应的图像记为 $\tilde{T}_{\text{FP}}^{(i,j)}(u, v)$, u, v 为对齐后新矩阵的坐标索引; 第 2 步, 将上述 $\{[(m-1)/\Delta s_x] + 1\} \times \{[(n-1)/\Delta s_y] + 1\}$ 张图像对齐叠加后的频谱图 $\tilde{T}_{\text{FP}}^{(i,j)}(u, v)$ 按照以下方式进行处理, 即:

$$\tilde{T}_{\text{FP}}(u, v) = \frac{\sum_{i,j} \tilde{T}_{\text{FP}}^{(i,j)}(u, v)}{\gamma(u, v)},$$

$$\gamma(u, v) = ([[(m-1)/\Delta s_x] + 1 - \text{ceil}[(u-m)/\Delta s_x]])$$

$$\times ([[(n-1)/\Delta s_y] + 1 - \text{ceil}[(v-n)/\Delta s_y]]),$$

$$1 \leq u \leq 2m-1, \quad 1 \leq v \leq 2n-1, \quad (7)$$

其中, $\text{ceil}(\cdot)$ 表示向上取整操作, $\gamma(u, v)$ 为不同像素位置的重叠次数.

(7) 式所示的叠层操作实际上可以看作是在中心频谱图 $\tilde{T}_{(\frac{[(m-1)/\Delta s_x] + 2}{2}, \frac{[(n-1)/\Delta s_y] + 2}{2})}(p, q)$ 上进行多次平均和频谱扩展, 有利于提升频谱信噪比和成像分辨率. 同时, 可以看出: $\tilde{T}_{\text{FP}}$ 的最大带宽为 $(2m-1) \times (2n-1)$, 与 $\tilde{T}_{(\frac{[(m-1)/\Delta s_x] + 2}{2}, \frac{[(n-1)/\Delta s_y] + 2}{2})}(p, q)$ 相比, 其频谱拓展了 1 倍, 这将意味着可以实现 2 倍的超分辨成像.

此外, 类似于傅里叶叠层成像^[26,27], 相邻两张关联重构结果的重叠程度可以用重叠率来表示, 即: $\eta = \frac{(m - \Delta s_x) \times (n - \Delta s_y)}{mn} \times 100\%$, 表示了重叠区域面积占 CCD 面积的百分比. 一般来说, 较高的重叠率可以提高频谱叠层结果的信噪比, 有利于相位恢复算法的实空间图像重建.

2.2.3 基于相位恢复算法的实空间图像重建

对于所获得频谱图, 可以利用相位恢复算法获取其对应的实空间图像信息. 对于上文所述的并行关联重建结果和频谱叠层结果, 本文将采用差分映射 (difference map, DM) 相位恢复算法^[15,29] 重构实空间图像, 其重建模型可以表示为

$$g_{n+1} = g_n + P_F [(2P_O(g_n) - g_n)] - P_O(g_n), \quad (8)$$

其中, g_n 是第 n 次迭代时的实空间预测图像, P_F 和 P_O 分别代表频域投影操作和空域投影操作.

3 实验验证

为了验证基于自相关和频谱叠层的超分辨成像方法的有效性, 搭建如图 1 所示的光路系统进行实验验证. 所设置的参数如下: 激光器的输出波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 光阑的通光孔径 $D = 3 \text{ mm}$, 赝热光源面与待测物体之间的距离 $z = 400 \text{ mm}$, 透镜焦距 $f = 200 \text{ mm}$, 透镜的有效通光孔径 $L =$

50.8 mm , CCD 的像素大小为 $6.9 \mu\text{m} \times 6.9 \mu\text{m}$. 实验所用的待测物体为三缝, 缝宽为 $a = 200 \mu\text{m}$, 中心距 $d = 800 \mu\text{m}$, 缝高 $h = 1600 \mu\text{m}$, 其对应的傅里叶频谱见图 3 所示. 对于所采用的 DM 相位恢复算法, 根据自相关关联函数的特性, 由于关联函数不包含物体的相位信息, 因此在重建时利用物体相位分布, 设定为某一个常数且成像区间受到物体尺寸大小限制等相关先验信息, 这样有利于待测物体实空间像的精确重构.

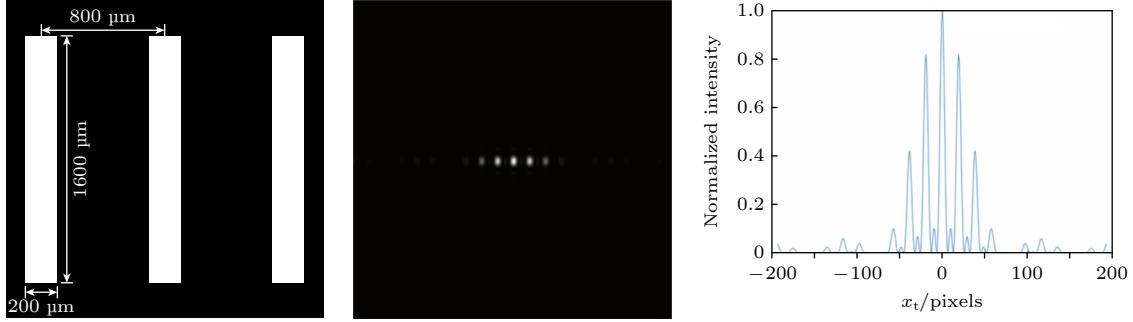


图 3 待测物体及其傅里叶变换频谱

Fig. 3. The testing object and its Fourier-transform spectrum.

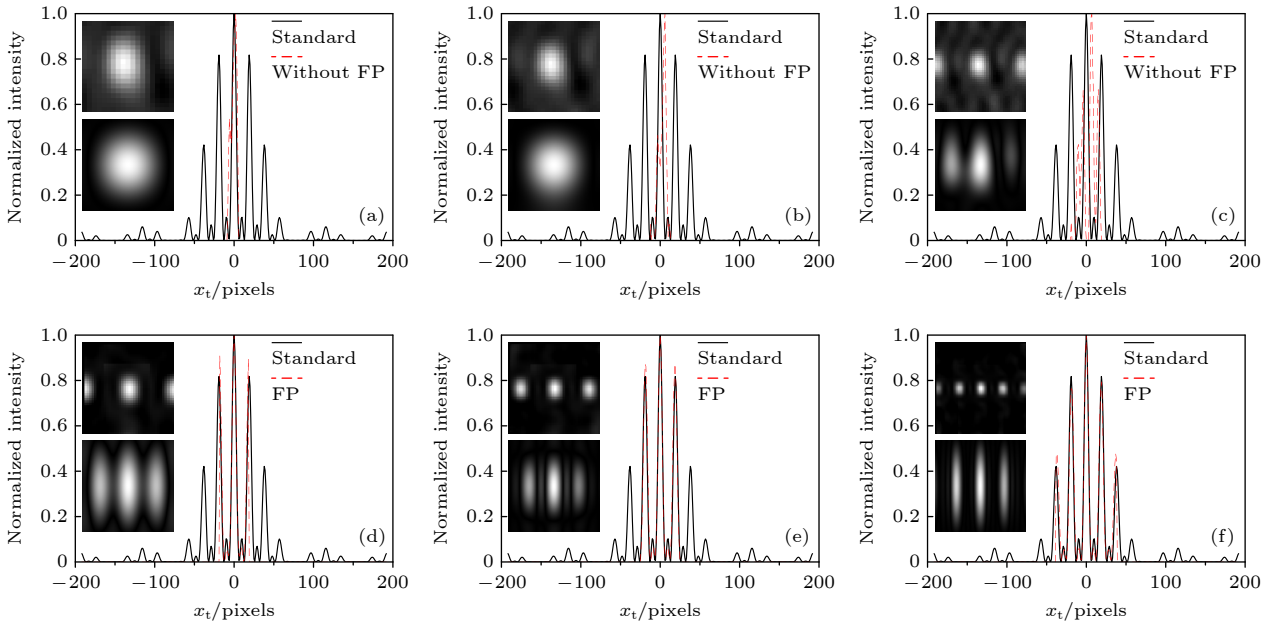


图 4 基于自相关和频谱叠层的超分辨成像实验验证结果 ($N = 500$) (a)–(c) CCD 像素规模大小分别为 19×19 , 25×25 , 39×39 像素不采用频谱叠层处理下的成像结果; (d)–(f) 采用多点并行关联重建和频谱叠层处理后对应的成像结果, 左上角依次为关联重构的频谱图和相位恢复算法重建的实空间图像, 黑色实线为待测物体傅里叶变换频谱横截面, 红色虚线为关联重构频谱图的横截面

Fig. 4. Experimental demonstration results of super-resolution imaging via autocorrelation and frequency ptychography ($N = 500$): (a)–(c) The imaging results without frequency ptychography when the pixel sizes of the CCD are 19×19 , 25×25 , and 39×39 pixels, respectively; (d)–(f) the corresponding results with multiple-point parallel correlation reconstruction and frequency ptychography. The upper left corner shows the frequency spectrums obtained by correlation reconstruction and the images in spatial domain reconstructed by phase-retrieval algorithm. The black solid line represents the cross-section of the testing object's Fourier-transform spectrum, and the red dashed line represents the cross-section of the frequency spectrums obtained by correlation reconstruction.

当测量次数 $N = 500$ 时, 图 4 给出了基于自相关和频谱叠层的超分辨成像实验验证结果. 在不采用频谱叠层处理的情况下, 图 4(a)—(c) 展示了 CCD 像素规模大小分别为 19×19 , 25×25 , 39×39 像素下的成像结果 (即 $\Delta G^{(2,2)}(x_i, x'_i = 0)$). 其中图 4(a) 左上方依次对应于关联重构获取的目标频谱图和基于 DM 相位恢复算法重建的实空间图像, 其对应的关联重构频谱图与物体傅里叶变换频谱的横截面见图中的红色虚线和黑色实线. 可以看出, 随着探测器像素规模的增大, 通过关联重构得到的目标频谱带宽增大, 其对应的空间分辨率也将得到提升. 然而, 在测量次数较少时, 其重建的频谱图和恢复的实空间图像均不佳 (图 4(c)). 当采用多点并行关联重建和频谱叠层处理时, 相邻两个像素点的距离为 5 个像素, 对应于相邻两张频谱图的重叠率分别为 $\eta = 54\%, 64\%, 76\%$, 此时与图 4(a)—(c) 所对应的重建结果见图 4(d)—(f). 可以清晰地看出, 采用多点并行关联重建和频谱叠层处理后, 所重构的目标频谱图的信噪比不但得到大幅提升 (图 4(c), (d)), 而且其频谱带宽拓展到了原来频谱图的 2 倍, 因此在使用相同的 CCD 像素规模条件下实现了 2 倍的超分辨成像, 该实验结果与上述的理论分析结果相符合. 另外, 为保证目标频谱信息测量的准确性, 要求 CCD 必须能不失真地记录目标频谱信息. 对于图 3 所示的三缝物体, 根据 (5) 式和光栅方程, 三缝物体的次极大条纹宽度为 $\lambda f / (3d)$.

为了能够准确地记录该级次的频谱信息 (如图 4 曲线部分所示), 结合奈奎斯特采样定理, 则要求 CCD 的横向像素不大于 $\Delta x = \lambda f / (6d) = 22.2 \mu\text{m}$ (对应为 3 个像素左右). 因此, 在实际工程中, 对于图 1 所示的系统, 在 CCD 像素规模相同的情况下, 可以通过选择合适的 CCD 像元大小或者透镜焦距 f 获得最佳的成像分辨率.

为了测试所提方法在较低的测量次数下仍然能够得到高质量的成像结果, 图 5 所示为 CCD 像素规模大小为 25×25 、测量次数 $N = 50, 100, 200, 500$ 下所重建的频谱图和实空间图像. 此时多点并行关联重建时所选择的两个测量点的间距仍然为 5 个像素, 所对应的相邻两张频谱图的重叠率为 $\eta = 64\%$. 为了定量评价图像重建质量的好坏, 使用均方误差函数 (MSE) 计算重建结果与参考图像之间的差异, 即

$$\text{MSE} = \frac{1}{N_{\text{pix}}} \sum_{i,j} [O_{\text{rec}}(x_i, y_j) - O(x_i, y_j)]^2,$$

其中, $O(x_i, y_j)$ 表示参考图像, $O_{\text{rec}}(x_i, y_j)$ 表示相位恢复重建图像, N_{pix} 为图像的总像素数. 实验验证时, 参考图像选用图 5 最右侧一列测量次数为 9000 次时所对应的重建结果. 可以看出, 当测量次数 $N < 200$ 时, 频谱图低频区域对比度较高, 但在频谱图的高频边缘区域有一些较为明显的噪声, 从而导致基于相位恢复算法重建的实空间图像有一定的失真. 这是因为在做多点并行关联重建和叠层

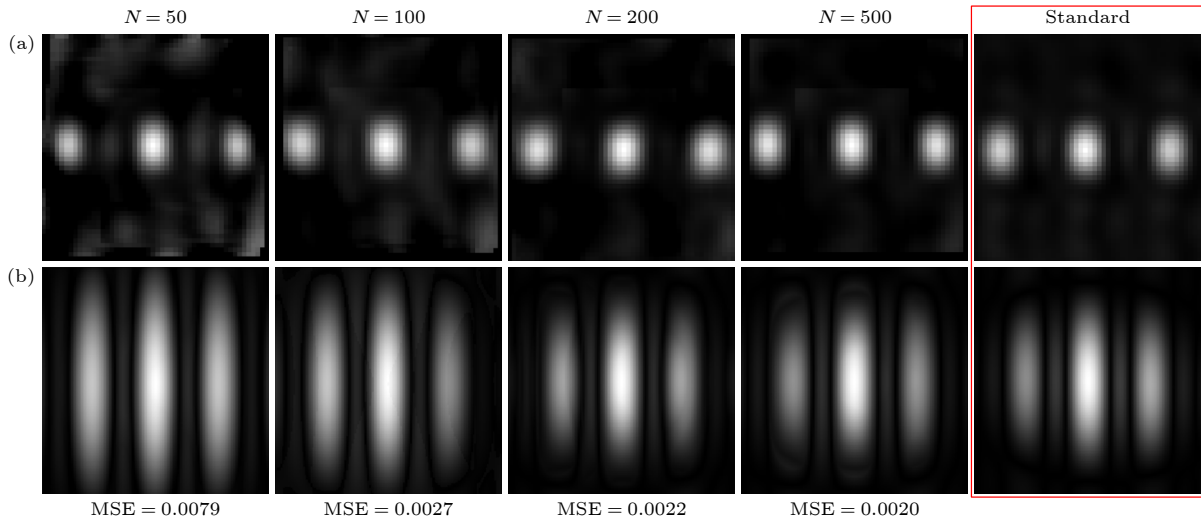


图 5 不同测量次数下基于自相关和频谱叠层的成像结果 (CCD 像素规模大小为 25×25 像素) (a) 多点并行关联重建和频谱叠层处理后的目标频谱图; (b) 基于相位恢复算法重建的实空间图像

Fig. 5. Imaging results based on autocorrelation and frequency ptychography in different measurements (with 25×25 pixels for the CCD): (a) The target's frequency spectrum with multiple-point parallel correlation reconstruction and frequency ptychography; (b) the images in the spatial domain reconstructed by phase-retrieval algorithm.

处理时,最外围的高频边缘区域参与系综平均的次数越少且高频信号自身也较弱,因此其重建的频谱图信噪比较低.此外,从MSE值也可看出,当测量次数 $N \geq 200$ 时,所重建的实空间图像质量与参考结果基本相当,从而验证了该方法在较低测量次数下仍然可以获取高质量的超分辨率图像信息.此外,值得说明的是,为了保证目标频谱和图像重构的质量,通常要求辐照于待测目标区域内的光强分布经过 N 次测量叠加后是均匀的,从而改善光源的非均匀性和散斑噪声对成像质量的影响.

4 结 论

针对现有HBT系统获取目标频谱图像信息存在测量次数多、成像分辨率受限于探测器像素规模的问题,结合HBT的关联特性和频谱叠层方法,本文提出了一种基于多点并行关联重建和频谱叠层处理提升HBT系统信噪比和空间分辨率的方法.理论和实验证明,随着探测器像素规模的增大,关联重构得到的目标频谱带宽增大,其对应的空间分辨率也将得到提升;同时为了保证较好的成像结果,频谱叠层处理过程中相邻两张频谱图的重叠率要求保证在50%以上.总体来说,与无频谱叠层处理的成像结果相比,所提方法不但可以减少获取高质量目标频谱图像信息所需的测量次数,而且在相同探测器像素规模的条件下可以实现频谱信息的扩展,得到2倍的超分辨率成像,该方法对于动目标成像和显微成像具有重要的借鉴意义.

参考文献

[1] Brown R H, Twiss R Q 1956 *Nature* **177** 27

- [2] Glauber R J 1963 *Phys. Rev.* **130** 2529
 [3] Zhang M H, Wei Q, Shen X, Liu Y F, Liu H L, Bai Y F, Han S S 2007 *Phys. Lett. A* **366** 569
 [4] Gatti A, Bache M, Magatti D, Brambilla E, Ferri F, Lugiato L A 2006 *J. Mod. Opt.* **53** 739
 [5] Shapiro J H, Boyd R W 2012 *Quantum Inf. Process.* **11** 949
 [6] Shih Y H 2024 *Chin. Opt. Lett.* **22** 060011
 [7] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, Li E R, Wang H, Xu W D, Han S S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 141123
 [8] Erkmén B I. 2012 *J. Opt. Soc. Am. A* **29** 782
 [9] Gong W L, Zhao C Q, Yu H, Chen M L, Xu W D, Han S S 2016 *Sci. Rep.* **6** 26133
 [10] Stellinga D, Phillips D B, Mekhail S P, Selyem A, Turtaev S, Čížnár T, Padgett M J 2021 *Science* **374** 1395
 [11] Sun Z, Tuitje F, Spielmann C 2019 *Opt. Express* **27** 33652
 [12] Peng J Z, Yao M H, Huang Z B, Zhong J G 2021 *APL Photonics* **6** 046102
 [13] Wu D X, Luo J W, Huang G Q, Feng Y H, Feng X H, Zhang R S, Shen Y C, Li Z H 2021 *Nat. Commun.* **12** 4712
 [14] Ota S, Horisaki R, Kawamura Y, et al. 2018 *Science* **360** 1246
 [15] Elser V 2003 *J. Opt. Soc. Am. A* **20** 40
 [16] Ying G R, Wei Q, Shen X, Han S S 2008 *Opt. Commun.* **281** 5130
 [17] Zhang C, Gong W L, Han S S 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 021111
 [18] Bo Z W, Gong W L, Han S S 2016 *Chin. Opt. Lett.* **14** 070301
 [19] Katz O, Small E, Silberberg Y 2012 *Nat. Photonics* **6** 549
 [20] Cheng J, Han S S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 093903
 [21] Yu H, Lu R H, Han S S, Xie H L, Du G H, Xiao T Q, Zhu D M 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 113901
 [22] Lin J, Cheng J 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 2912 (in Chinese) [林洁, 程静 2010 *光学学报* **30** 2912]
 [23] Lei Z, Wang C F, Zhang D W, Wang L X, Gong W L 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 1
 [24] Wang H, Han S S 2012 *Europhys. Lett.* **98** 24003
 [25] Zhu R G, Yu H, Tan Z J, Lu R H, Han S S, Huang Z F, Wang J 2020 *Opt. Express* **28** 17556
 [26] Zheng G A, Horstmeier R, Yang C H 2013 *Nat. Photonics* **7** 739
 [27] Sun J S, Zhang Y Z, Chen Q, Zuo C 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 1011005 (in Chinese) [孙佳嵩, 张玉珍, 陈钱, 左超 2016 *光学学报* **36** 1011005]
 [28] Liu H L, Cheng J, Han S S 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 103102
 [29] Loh N T D, Eisebitt S, Flewett S, Elser V 2010 *Phys. Rev. E* **82** 061128

Super-resolution imaging based on auto-correlation and frequency ptychography*

LI Zongjun¹⁾ ZHANG Long¹⁾ GONG Wenlin^{1)2)3)†}

¹⁾ (School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

²⁾ (Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou 215006, China)

³⁾ (National Key Laboratory of Air-based Information Perception and Fusion, Luoyang 471099, China)

(Received 12 January 2025; revised manuscript received 31 March 2025)

Abstract

The second-order auto-correlation technology based on Hanbury Brown-Twiss (HBT) can obtain the Fourier spectrum information of a target even under the conditions of incoherent source illumination and near-

field detection, which has better advantages in the fields of moving-target imaging, imaging in scattering medium, and X-ray imaging. However, a great number of measurements are required and the imaging resolution is also restricted by the pixel scale of the detector for high-quality Fourier spectrum image for HBT. At present, many relevant data processing methods and reconstruction algorithms can reduce the number of measurements required for the acquisition of high-quality spectral information, but the time of image reconstruction required by these methods is usually long and cannot improve the imaging resolution of the system. In recent years, Fourier ptychography based on real-space image detection has proven that higher-resolution imaging can be obtained through spectral ptychography and frequency extension. In this paper, by combining the idea of Fourier ptychography with HBT, a processing method based on multi-point parallel correlation reconstruction and spectral ptychography is proposed, which attempts to obtain high-quality spectral information of the target and achieve super-resolution imaging with few measurements. The proof-of-principle schematic of super-resolution imaging method based on autocorrelation and spectral ptychography is obtained. The corresponding super-resolution reconstruction framework is displayed, which mainly consists of three steps: multi-point parallel correlation reconstruction, spectral ptychography, and real-space image reconstruction based on phase-retrieval algorithm. Firstly, based on the physical mechanism, Fourier spectrum images of the target at different detection points are obtained through multi-point parallel correlation reconstruction. Secondly, according to the idea of spectrum ptychography, the frequency shifted spectrum obtained by multi-point parallel correlation reconstruction is aligned to form an extended spectrum. Finally, the target's real-space image is reconstructed by phase-retrieval algorithm.

The super-resolution imaging method based on auto-correlation and spectral ptychography is experimentally verified by using the setup. At the number of measurements $N = 500$, the experimental results are obtained on different pixel scales of the detector. The results indicate that the imaging resolution increases with the pixel scale of the detector increasing. However, when the number of measurements is small, both the Fourier spectrum and the real-space image obtained by single point detection are poor. When the multi-point parallel correlation reconstruction and spectral ptychography are adopted, the signal-to-noise ratio of the reconstructed Fourier spectrum can be significantly improved, and its spectral bandwidth can be expanded to twice that of the original spectrum at the same parameters. In addition, the experiments also show that for a 50×50 spectral image, even with 200 measurements (i.e. a sampling rate of 8%), high-quality super-resolution imaging can still be obtained.

All in all, the proposed method provides important insights into super-resolution microscopy imaging and high-resolution imaging of moving target.

Keywords: super-resolution imaging, auto-correlation, frequency ptychography, phase-retrieval algorithm

PACS: 42.30.Va, 42.30.Wb, 42.25.Kb, 42.30.Ms

DOI: [10.7498/aps.74.20250043](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250043)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250043](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250043)

* Project supported by the National Key Laboratory of Air-based Information Perception and Fusion (Grant No. 202400010M3001), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62471323), and the Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, China (Grant No. ZZ2307).

† Corresponding author. E-mail: wlgong@suda.edu.cn

基于自相关与频谱叠层的超分辨成像

李宗骏 张龙 龚文林

Super-resolution imaging based on auto-correlation and frequency ptychography

LI Zongjun ZHANG Long GONG Wenlin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 114203 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250043

CSTR: 32037.14.aps.74.20250043

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250043>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分孔径离轴同时偏振超分辨率成像光学系统像差校正

Aberration correction of aperture-divided off-axis simultaneous polarization super-resolution imaging optical system

物理学报. 2022, 71(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220946>

基于倏逝波照明的空间移频超分辨成像技术研究

Research on spatial frequency shift super-resolution imaging based on evanescent wave illumination

物理学报. 2023, 72(22): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230934>

计算偏振彩色傅里叶叠层成像: 散射光场偏振特性的复用技术

Computational polarized colorful Fourier ptychography imaging: a novel information reuse technique of polarization of scattering light field

物理学报. 2024, 73(12): 124202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240268>

平场复用多焦点结构光照明超分辨显微成像

Flat-field multiplexed multifocal structured illumination super-resolution microscopy

物理学报. 2022, 71(4): 048704 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211712>

基于数字微镜器件的快速超分辨晶格结构光照明显微研究

Digital micromirror device-based fast super-resolution lattice structured light illumination microscopy

物理学报. 2024, 73(9): 098702 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240216>

光盘上集成的液体微透镜阵列与可重构超分辨成像

Realization of reconfigurable super-resolution imaging by liquid microlens arrays integrated on light disk

物理学报. 2023, 72(9): 099501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222251>