

基于快速采样的剪切光束成像图像重构算法*

陈明徠¹⁾²⁾³⁾ 马彩文¹⁾²⁾³⁾ 刘辉¹⁾²⁾³⁾† 罗秀娟¹⁾²⁾³⁾冯旭斌¹⁾²⁾ 岳泽霖¹⁾³⁾ 赵晶¹⁾³⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2) (中国科学院空间精密测量技术重点实验室, 西安 710119)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2023年8月2日收到; 2023年9月26日收到修改稿)

剪切光束成像是一种非传统地基光学成像技术, 在对位姿快速变化的目标成像时, 为重构目标高分辨率清晰图像, 其成像系统的回波数据采样速率仍不够快. 本文提出一种五光束快速采样的图像重构方法, 通过改变成像系统编码和解码方法, 采用中心对称结构呈“十”字形排布的发射光束阵型, 利用所提的快速图像重构算法, 单次采样的回波数据所能重构的目标图像从1幅增加到8幅, 快速抑制了重构图像的散斑效应. 仿真结果表明, 与传统三光束图像重构方法相比, 获得相同质量图像所需的回波数据采样次数从20次减少至5次, 大幅减少了回波数据采样次数, 提高了回波数据采样速率.

关键词: 剪切光束成像, 快速采样, 图像重构, 采样速率**PACS:** 42.25.Fx, 42.25.Kb, 42.30.Rx, 42.30.Kq**DOI:** 10.7498/aps.73.20231254

1 引言

目前对空间目标的成像探测和识别的需求日益增大, 对地基光电成像探测设备的探测和识别能力提出了越来越高的要求, 非传统地基光学成像技术受到了广泛的关注^[1-5]. 其中, 剪切光束成像 (sheared-beam imaging, SBI)^[4-11] 是一种采用激光主动照明和回波相干接收的非传统成像技术, 它利用三束频率调制的双向剪切激光束照明目标, 再利用探测器阵列接收从目标表面返回的散斑场的干涉信号进行计算成像, 无需自适应光学和成像透镜就能透过大气湍流获得远程目标接近衍射极限的图像^[1-10]. 通过增加探测器数目、扩大探测器阵列基线长度能够灵活提高系统的成像分辨率, 突破了分辨率受光学接收口径制约的瓶颈, 具有准实时成像优点. 此技术在远程运动目标观测、医学诊断、天文观测等领域有广泛的应用前景^[6].

自剪切光束成像技术于1993年提出以来, 得到了长足的发展, 其研究成果主要集中在图像重构算法^[12-18]、大气湍流对成像的影响^[9,19,20]、相位差测量^[21,22]、复杂环境下的数学模型^[23]和系统优化设计与实验验证^[24]等方面. 在图像重构算法方面, 文献^[12]研究了一种新的图像重构算法, 利用 Gauss-Seidel 数值迭代方法求解相位, 解决了由于缺少目标先验信息很难重构图像的问题. 文献^[13]对两种波前重构算法进行了比较, 由于指数重构算法不需要迭代运算, 其处理速度比迭代的最小二乘重构算法快. 文献^[14]提出基于全相位谱分析的图像重构算法, 有效抑制了频率漂移对成像质量的影响, 提高了实际成像环境的系统成像能力. 文献^[15]提出四光束 SBI 图像重构算法, 使得数据采样速率提高了1倍, 同时也减少了光束切换次数. 近年来, SBI 系统探测器阵列的空域稀疏出现了一些研究成果, 文献^[16]提出一种五光束一维空域稀疏重构算法, 在重构图像质量几乎相同的情况

* 陕西省自然科学基金研究计划 (批准号: 2020JQ-438) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuhui1@opt.ac.cn

下,所提算法所需的探测器阵列的阵元数量可减少至传统三光束方法的1/2.文献[17]提出了一种二维空域稀疏重构算法,当发射光束数目为 $M \times N$ 时,在重构图像质量几乎相同的情况下,所提算法所需的探测器阵列的阵元数量可减少至传统三光束方法的 $1/[(M-1)(N-1)]$.文献[18]提出了一种四光束稀疏相位恢复算法,与传统三光束方法相比,探测器阵元数量减少了1/2,与五光束一维空域稀疏重构算法相比,减少了激光束数目.

SBI系统在对远程运动目标成像时,为适应目标姿态快速变化的成像场景,要求数据采集效率高、速率快,以最快速率获取目标最多频谱信息.然而,SBI系统为重构目标清晰图像,需多次采集回波信号,数据采集速率仍不够快,制约了SBI技术对远程运动目标成像的应用.因此,减少数据采集次数,提高数据采集速率是需要解决的问题.为此,通过优化发射光束阵型,提出了“十”字形五光束快速采样的图像重构方法,提高了回波数据采集速率,提升了SBI系统的实际应用效果.

2 基于快速采样的剪切光束成像原理

传统SBI系统的示意图如图1所示.传统SBI技术利用三束经频率调制的激光照射目标,在目标粗糙表面上产生散斑信号,利用探测器阵列接收从目标散射回来的散斑干涉信号,是目标的空间频率信息在时域上的编码过程.对调制的回波信号进行解调,得到目标的散斑强度场和相位差信息,利用图像重构算法复原目标频谱,通过傅里叶逆变换重构目标图像,是成像系统的解码过程.

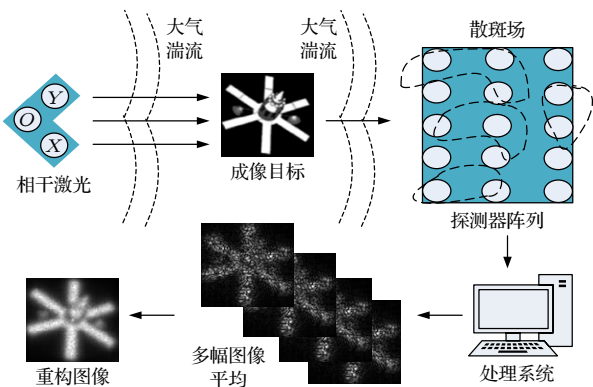


图1 SBI系统示意图
Fig. 1. Schematic diagram of SBI system.

传统SBI系统利用散斑回波信号进行成像,单次曝光只重构1幅图像,重构图像存在散斑,需

要多次曝光抑制图像散斑效应,最终得到清晰图像.多次曝光增加了数据采样次数和时长,尚不能完全满足姿态快速变化的成像场景.因此,需要减少采样次数,以满足快速成像需求.

本文通过改变成像系统编码和解码方法,提出基于“十”字形五光束快速采样的成像方法,SBI系统的发射光束具有中心对称结构,呈“十”字形排布.发射平面与目标平面的几何关系如图2所示,其中 $O-X'Y'$ 是发射平面,在单次曝光中,分别利用光束(2,3,4),(1,2,4),(1,2,5),(2,3,5),(1,3,4),(1,3,5),(1,4,5),(3,4,5)的干涉回波信息,可以重构目标8幅图像,大大减少了数据采集次数,提高了数据采集速率.

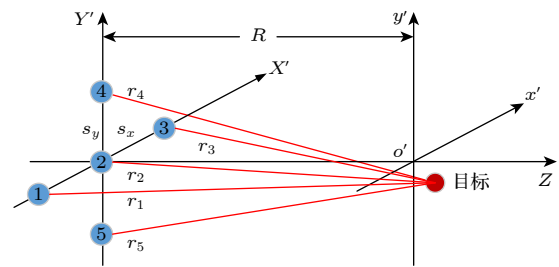


图2 发射平面与目标平面的几何关系

Fig. 2. Geometric relations between emission plane and target plane.

呈“十”字形排布的5个光束是相干光束,可通过连续激光源分束得到,利用声光调制器调制每束光的频率,使得每束光具有一定的频差,继而光束经“十”字形排布的发射孔径照射到目标.所用激光源需满足窄线宽要求,以此保证足够的相干长度.成像过程中,只要5个光束的重叠区域能够覆盖目标即可成像,5个光束的角度精度影响回波信号的信噪比,对重构图像对比度有影响,不会影响成像分辨率.

对基于快速采样的成像原理进行理论推导,提出基于“十”字形五光束快速采样的图像重构算法,简称为快速图像重构算法,并利用仿真验证所提算法.

通过发射平面与目标平面的几何关系,可得五束光在目标表面任意一点 (x', y') 的光场表达式:

$$U(x', y', t) = \sum_{i=1}^5 E_i \exp [i(\mathbf{k}_i \mathbf{r}_i - \omega_i t + \varphi_i)], \quad (1)$$

其中,第1束激光是主光束,第2,3,4,5束激光是参考光束. E_i , ω_i 分别为第*i*束光的振幅、角频率, i 为虚数单位, \mathbf{k}_i 是波数, φ_i 为第*i*束光的初始相位, \mathbf{r}_i 是激光发射孔径与目标表面的位移矢量,其标量值分别为

$$r_1 = \sqrt{R^2 + (x' + s_x)^2 + (y')^2}, \quad r_2 = \sqrt{R^2 + (x')^2 + (y')^2}, \quad r_3 = \sqrt{R^2 + (x' - s_x)^2 + (y')^2},$$

$$r_4 = \sqrt{R^2 + (x')^2 + (y' - s_y)^2}, \quad r_5 = \sqrt{R^2 + (x')^2 + (y' + s_y)^2},$$

其中, R 为成像距离, s_x 和 s_y 是发射剪切量, 且 $s_x = s_y$.

因为 $R^2 \gg x'^2 + y'^2, R^2 \gg s_x^2 + s_y^2$, 所以:

$$r_1 \approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R) + s_x x'/R, \quad r_2 \approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R), \quad r_3 \approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R) - s_x x'/R,$$

$$r_4 \approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R) - s_y y'/R, \quad r_5 \approx R + (x'^2 + y'^2)/(2R) + s_y y'/R. \quad (2)$$

因此, 五束光在目标平面的叠加可近似为

$$U(x', y', t) = E_1 \exp[i(2\pi s_x x'/(\lambda R) - \omega_1 t + \varphi_1)] + E_2 \exp[i(-\omega_2 t + \varphi_2)] + E_3 \exp[i(-2\pi s_x x'/(\lambda R) - \omega_3 t + \varphi_3)]$$

$$+ E_4 \exp[i(-2\pi s_y y'/(\lambda R) - \omega_4 t + \varphi_4)] + E_5 \exp[i(2\pi s_y y'/(\lambda R) - \omega_5 t + \varphi_5)]. \quad (3)$$

令 $\Gamma(x', y')$ 为目标反射率函数, 根据夫琅禾费衍射原理, 从目标表面返回的光场为

$$A(x, y, t) = \iint \Gamma(x', y') U(x', y', t) \exp(-i2\pi u x') \exp(-i2\pi v y') dx' dy'$$

$$= E_1 \exp(-i\omega_1 t + i\varphi_1) \iint \Gamma(x', y') \exp[-i2\pi(u - s_x/(\lambda R))x'] \exp(-i2\pi v y') dx' dy'$$

$$+ E_2 \exp(-i\omega_2 t + i\varphi_2) \iint \Gamma(x', y') \exp(-i2\pi u x') \exp(-i2\pi v y') dx' dy'$$

$$+ E_3 \exp(-i\omega_3 t + i\varphi_3) \iint \Gamma(x', y') \exp[-i2\pi(u + s_x/(\lambda R))x'] \exp(-i2\pi v y') dx' dy'$$

$$+ E_4 \exp(-i\omega_4 t + i\varphi_4) \iint \Gamma(x', y') \exp(-i2\pi u x') \exp[-i2\pi(v + s_y/(\lambda R))y'] dx' dy'$$

$$+ E_5 \exp(-i\omega_5 t + i\varphi_5) \iint \Gamma(x', y') \exp(-i2\pi u x') \exp[-i2\pi(v - s_y/(\lambda R))y'] dx' dy', \quad (4)$$

其中, $u = x/(\lambda R)$, $v = y/(\lambda R)$.

为了方便, 对 5 束光携带的目标傅里叶频谱进行简化表示:

$$\iint \Gamma(x', y') \exp[-i2\pi(u - s_x/(\lambda R))x'] \exp(-i2\pi v y') dx' dy'$$

$$= A_0(u - s_x/(\lambda R), v) \exp(i\phi(u - s_x/(\lambda R), v)),$$

$$\iint \Gamma(x', y') \exp(-i2\pi u x') \exp(-i2\pi v y') dx' dy' = A_0(u, v) \exp(i\phi(u, v)),$$

$$\iint \Gamma(x', y') \exp[-i2\pi(u + s_x/(\lambda R))x'] \exp(-i2\pi v y') dx' dy'$$

$$= A_0(u + s_x/(\lambda R), v) \exp(i\phi(u + s_x/(\lambda R), v)),$$

$$\iint \Gamma(x', y') \exp(-i2\pi u x') \exp[-i2\pi(v + s_y/(\lambda R))y'] dx' dy'$$

$$= A_0(u, v + s_y/(\lambda R)) \exp[i\phi(u, v + s_y/(\lambda R))],$$

$$\iint \Gamma(x', y') \exp(-i2\pi u x') \exp[-i2\pi(v - s_y/(\lambda R))y'] dx' dy'$$

$$= A_0(u, v - s_y/(\lambda R)) \exp[i\phi(u, v - s_y/(\lambda R))], \quad (5)$$

其中 $A_0(u, v)$ 为波前幅值, $\phi(u, v)$ 为波前相位, $A_0(u, v) \exp[i\phi(u, v)]$ 为目标傅里叶频谱.

散斑场发生干涉产生的拍频信号强度分布为

$$I(x, y, t) = |A(x, y, t)|^2 = \sum_{i=1}^5 E_i^2 A_i^2 + 2 \sum_{i=1}^4 \sum_{j>i}^5 E_i E_j A_i A_j \cos(\Delta\omega_{ij}t + \Delta\phi_{ij} + \Delta\varphi_{ij}), \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 \Delta\omega_{ij} &= \omega_j - \omega_i, \quad \Delta\varphi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j, \\
 A_1 &= A_0(u - s_x/(\lambda R), v), \quad A_2 = A_0(u, v), \\
 A_3 &= A_0(u + s_x/(\lambda R), v), \\
 A_4 &= A_0(u, v + s_y/(\lambda R)), \\
 A_5 &= A_0(u, v - s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\phi_{12} &= \phi(u - s_x/(\lambda R), v) - \phi(u, v), \\
 \Delta\phi_{23} &= \phi(u, v) - \phi(u + s_x/(\lambda R), v), \\
 \Delta\phi_{13} &= \phi(u - s_x/(\lambda R), v) - \phi(u + s_x/(\lambda R), v), \\
 \Delta\phi_{14} &= \phi(u - s_x/(\lambda R), v) - \phi(u, v + s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\phi_{15} &= \phi(u - s_x/(\lambda R), v) - \phi(u, v - s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\phi_{23} &= \phi(u, v) - \phi(u + s_x/(\lambda R), v), \\
 \Delta\phi_{24} &= \phi(u, v) - \phi(u, v + s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\phi_{25} &= \phi(u, v) - \phi(u, v - s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\phi_{34} &= \phi(u + s_x/(\lambda R), v) - \phi(u, v + s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\phi_{35} &= \phi(u + s_x/(\lambda R), v) - \phi(u, v - s_y/(\lambda R)), \\
 \Delta\phi_{45} &= \phi(u, v + s_y/(\lambda R)) - \phi(u, v - s_y/(\lambda R)). \quad (7)
 \end{aligned}$$

由 (6) 式可知, 五光束成像系统携带了目标丰富的相位差信息, 通过合理匹配, 一次曝光可重构目标 8 幅图像.

假设探测器阵列规模为 $m \times n$, 则探测器阵元

相对坐标为

$$x_i = (i - m) s_x, \quad y_j = (j - n) s_y, \quad (8)$$

其中, i, j 表示探测器阵元序号, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$, 则位于 (x_i, y_j) 的探测器阵元的时域信号为

$$\begin{aligned}
 I(x_i, y_j, t) &= \sum_{i=1}^5 E_i^2 A_i^2 + 2 \sum_{i=1}^4 \sum_{j>i}^5 E_i E_j A_i A_j \\
 &\quad \times \cos(\Delta\omega_{ij}t + \Delta\phi_{ij} + \Delta\varphi_{ij}). \quad (9)
 \end{aligned}$$

3 快速图像重构算法

与传统三光束成像系统不同, 五光束成像系统所采集的回波信号中蕴含了 8 组可用于重构目标图像的散斑相位差信息, 而且相位复原计算方法也各不相同. 首先对回波信号进行频谱分析^[25], 在回波信号拍频处提取 8 组散斑相位差, 复原目标相位. 然后, 通过目标振幅乘积解调目标振幅. 最后, 基于恢复的目标频谱, 通过傅里叶逆变换重构目标图像^[26,27], 经多幅图像平均处理后得到高质量图像. 下文是快速图像重构算法中的相位恢复和振幅解调过程.

3.1 相位恢复

令 $\phi(u, v) \triangleq \phi_{i,j}$, $\phi(u - s_x/(\lambda R), v) \triangleq \phi_{i-1,j}$, $\phi(u + s_x/(\lambda R), v) \triangleq \phi_{i+1,j}$, $\phi(u, v - s_y/(\lambda R)) \triangleq \phi_{i,j-1}$, $\phi(u, v + s_y/(\lambda R)) \triangleq \phi_{i,j+1}$.

利用光束 (2, 3, 4) 的干涉信息重构目标图像, 目标相位频谱面内点的相位计算公式为^[28]

$$\begin{aligned}
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j} + \Delta\phi_x^{ij})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j} - \Delta\phi_x^{i-1,j})] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j+1} + \Delta\phi_y^{ij})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j-1} - \Delta\phi_y^{i,j-1})] \right\}, \quad 1 < i < m, 1 < j < n, \quad (10)
 \end{aligned}$$

其中, $\Delta\phi_x^{ij}$ 为 $\Delta\phi_{23}$, $\Delta\phi_y^{ij}$ 为 $\Delta\phi_{24}$.

利用光束 (1, 2, 4) 的干涉信息重构目标图像, 目标相位频谱面内点的相位计算公式为

$$\begin{aligned}
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j} + \Delta\phi_x^{i+1,j})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j} - \Delta\phi_x^{i,j})] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j+1} + \Delta\phi_y^{ij})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j-1} - \Delta\phi_y^{i,j-1})] \right\}, \quad 1 < i < m, 1 < j < n, \quad (11)
 \end{aligned}$$

其中, $\Delta\phi_x^{ij}$ 为 $\Delta\phi_{12}$, $\Delta\phi_y^{ij}$ 为 $\Delta\phi_{24}$.

利用光束 (1, 2, 5) 的干涉信息重构目标图像, 目标相位频谱面内点的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi_{ij} = \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j} + \Delta\phi_x^{i+1,j})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j} - \Delta\phi_x^{i,j})] \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j+1} - \Delta\phi_y^{i,j+1})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j-1} + \Delta\phi_y^{i,j})] \right\}, \quad 1 < i < m, 1 < j < n, \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\Delta\phi_x^{ij}$ 为 $\Delta\phi_{12}$, $\Delta\phi_y^{ij}$ 为 $\Delta\phi_{52}$.

利用光束 (2, 3, 5) 的干涉信息重构目标图像, 目标相位频谱面内点的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi_{ij} = \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j} + \Delta\phi_x^{ij})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j} - \Delta\phi_x^{i-1,j})] \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j+1} - \Delta\phi_y^{i,j+1})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i,j-1} + \Delta\phi_y^{i,j})] \right\}, \quad 1 < i < m, 1 < j < n, \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\Delta\phi_x^{ij}$ 为 $\Delta\phi_{23}$, $\Delta\phi_y^{ij}$ 为 $\Delta\phi_{52}$.

利用光束 (1, 3, 4) 的干涉信息重构目标图像, 目标相位频谱面内点的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi_{ij} = \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j-1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j+1} + \Delta\phi_{x'}^{i+1,j+1})] \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j-1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j+1} + \Delta\phi_{y'}^{i-1,j+1})] \right\}, \quad 1 < i < m, 1 < j < n, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\Delta\phi_{x'}^{i,j}$ 为 $\Delta\phi_{14}$, $\Delta\phi_{y'}^{i,j}$ 为 $\Delta\phi_{34}$.

目标相位频谱面四个角点的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp [i (\phi_{i+1,j+1} + \Delta\phi_{x'}^{i+1,j+1})] \right\}, \quad i = 1, j = 1, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp [i (\phi_{i+1,j-1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j})] \right\}, \quad i = 1, j = n, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp [i (\phi_{i-1,j+1} + \Delta\phi_{y'}^{i-1,j+1})] \right\}, \quad i = m, j = 1, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp [i (\phi_{i-1,j-1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j})] \right\}, \quad i = m, j = n. \end{aligned} \quad (15)$$

目标相位频谱面边缘点的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp [i (\phi_{i+1,j+1} + \Delta\phi_{x'}^{i+1,j+1})] + \frac{1}{2} \exp [i (\phi_{i+1,j-1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j})] \right\}, \quad i = 1, 1 < j < n, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp [i (\phi_{i-1,j-1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j})] + \frac{1}{2} \exp [i (\phi_{i-1,j+1} + \Delta\phi_{y'}^{i-1,j+1})] \right\}, \quad i = m, 1 < j < n, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp [i (\phi_{i+1,j+1} + \Delta\phi_{x'}^{i+1,j+1})] + \frac{1}{2} \exp [i (\phi_{i-1,j+1} + \Delta\phi_{y'}^{i-1,j+1})] \right\}, \quad 1 < i < m, j = 1, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp [i (\phi_{i-1,j-1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j})] + \frac{1}{2} \exp [i (\phi_{i+1,j-1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j})] \right\}, \quad 1 < i < m, j = n. \end{aligned} \quad (16)$$

利用光束 (1, 3, 5) 的干涉信息重构目标图像, 目标相位频谱面内点的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi_{ij} = \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j-1} + \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j+1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j})] \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i+1,j-1})] + \frac{1}{4} \exp [i (\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j})] \right\}, \quad 1 < i < m, 1 < j < n, \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $\Delta\phi_{x'}^{i,j}$ 为 $\Delta\phi_{35}$, $\Delta\phi_{y'}^{i,j}$ 为 $\Delta\phi_{15}$.

目标相位频谱面 4 个角点的相位计算公式为

$$\begin{aligned}
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, j = 1, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i+1,j-1} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, j = n, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = m, j = 1, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} + \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] \right\}, \quad i = m, j = n.
 \end{aligned} \tag{18}$$

目标相位频谱面边缘点的相位计算公式为

$$\begin{aligned}
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i+1,j-1} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, 1 < j < n, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} + \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = m, 1 < j < n, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad 1 < i < m, j = 1, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} + \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i+1,j-1} \right) \right] \right\}, \quad 1 < i < m, j = n.
 \end{aligned} \tag{19}$$

利用光束 (1, 4, 5) 的干涉信息重构目标图像, 目标相位频谱面内点的相位计算公式为

$$\begin{aligned}
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} - \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] + \frac{1}{4} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} + \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{4} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] + \frac{1}{4} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i-1,j+1} \right) \right] \right\}, \quad 1 < i < m, 1 < j < n.
 \end{aligned} \tag{20}$$

其中, $\Delta\phi_{x'}^{i,j}$ 为 $\Delta\phi_{14}$, $\Delta\phi_{y'}^{i,j}$ 为 $\Delta\phi_{15}$.

目标相位频谱面 4 个角点的相位计算公式为

$$\begin{aligned}
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} + \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, j = 1, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, j = n, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i-1,j+1} \right) \right] \right\}, \quad i = m, j = 1, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} - \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] \right\}, \quad i = m, j = n.
 \end{aligned} \tag{21}$$

目标相位频谱面边缘点的相位计算公式为

$$\begin{aligned}
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} + \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, 1 < j < n, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} - \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i-1,j+1} \right) \right] \right\}, \quad i = m, 1 < j < n, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} + \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i-1,j+1} \right) \right] \right\}, \quad 1 < i < m, j = 1, \\
 \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} - \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad 1 < i < m, j = n.
 \end{aligned} \tag{22}$$

利用光束 (3, 4, 5) 的干涉信息重构目标图像, 目标相位频谱面内点的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi_{ij} = \arg \left\{ \frac{1}{4} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} + \Delta\phi_{x'}^{ij} \right) \right] + \frac{1}{4} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} - \Delta\phi_{x'}^{i+1,j+1} \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} - \Delta\phi_{y'}^{i+1,j-1} \right) \right] + \frac{1}{4} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} + \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad 1 < i < m, \quad 1 < j < n. \quad (23) \end{aligned}$$

其中, $\Delta\phi_{x'}^{i,j}$ 为 $\Delta\phi_{35}$, $\Delta\phi_{y'}^{i,j}$ 为 $\Delta\phi_{34}$.

目标相位频谱面四个角点的相位计算公式为

$$\begin{aligned} \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} - \Delta\phi_{x'}^{i+1,j+1} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, \quad j = 1, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} - \Delta\phi_{y'}^{i+1,j-1} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, \quad j = n, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} + \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = m, \quad j = 1, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} + \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = m, \quad j = n. \quad (24) \end{aligned}$$

目标相位频谱面边缘点的相位计算公式为:

$$\begin{aligned} \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i+1,j-1} \right) \right] \right\}, \quad i = 1, \quad 1 < j < n, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} + \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad i = m, \quad 1 < j < n, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j+1} - \Delta\phi_{x'}^{i,j} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j+1} - \Delta\phi_{y'}^{i,j} \right) \right] \right\}, \quad 1 < i < m, \quad j = 1, \\ \phi_{ij} &= \arg \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i-1,j-1} + \Delta\phi_{x'}^{i-1,j-1} \right) \right] + \frac{1}{2} \exp \left[i \left(\phi_{i+1,j-1} + \Delta\phi_{y'}^{i+1,j-1} \right) \right] \right\}, \quad 1 < i < m, \quad j = n. \quad (25) \end{aligned}$$

依据上述相位计算公式, 利用高斯-赛德尔 (Gauss-Seidel) 数值迭代方法可求解目标相位频谱面.

3.2 振幅解调

利用光束 (2, 3, 4) 的干涉信息解调振幅时, 令

$$M_1^{ij} = E_2 E_3 A_2 A_3, \quad (26)$$

$$M_2^{ij} = E_2 E_4 A_2 A_4, \quad (27)$$

$$M_3^{ij} = E_3 E_4 A_3 A_4. \quad (28)$$

由 M_1^{ij} , M_2^{ij} , M_3^{ij} 可得目标振幅 $A_0(u, v)$ 为

$$A_0(u, v) = \sqrt{M_1^{ij} M_2^{ij} / (M_3^{ij} E_2^2)}. \quad (29)$$

同理, 利用光束 (1, 2, 4)(1, 2, 5)(2, 3, 5)(1, 3, 4)(1, 3, 5)(1, 4, 5)(3, 4, 5) 的干涉信息解调振幅时, 将 (26) 式的 M_1^{ij} 分别替换为 $M_1^{ij} = E_1 E_2 A_1 A_2$, $M_1^{ij} = E_1 E_2 A_1 A_2$, $M_1^{ij} = E_2 E_3 A_2 A_3$, $M_1^{ij} = E_1 E_4 A_1 A_4$, $M_1^{ij} = E_3 E_5 A_3 A_5$, $M_1^{ij} = E_1 E_4 A_1 A_4$, $M_1^{ij} = E_3 E_5 A_3 A_5$; 将 (27) 式的 M_2^{ij} 替换为 $M_2^{ij} = E_2 E_4 A_2 A_4$, $M_2^{ij} = E_2 E_5 A_2 A_5$, $M_2^{ij} = E_2 E_5 A_2 A_5$, $M_2^{ij} = E_3 E_4 A_3 A_4$, $M_2^{ij} = E_1 E_5 A_1 A_5$, $M_2^{ij} = E_1 E_5 A_1 A_5$, $M_2^{ij} = E_3 E_4 A_3 A_4$; 将 (28) 式中 M_3^{ij} 替换为 $M_3^{ij} = E_1 E_4 A_1 A_4$, $M_3^{ij} = E_1 E_5 A_1 A_5$, $M_3^{ij} = E_3 E_5 A_3 A_5$, $M_3^{ij} = E_1 E_3 A_1 A_3$, $M_3^{ij} = E_1 E_3 A_1 A_3$, $M_3^{ij} = E_4 E_5 A_4 A_5$, $M_3^{ij} = E_4 E_5 A_4 A_5$; 将 (29) 式中 E_2^2 替换为 E_2^2 , E_2^2 , E_2^2 , E_4^2 , E_5^2 , E_1^2 , E_3^2 .

4 仿真实验

4.1 图像质量评价标准

重构图像质量采用 Strehl 比 (Strehl ratios)^[11,18] 进行评价, 其定义如下式所示:

$$SR = \frac{\left| \iint O_T(x, y) O_R(x, y) dx dy \right|^2}{\iint O_T(x, y) O_T^*(x, y) dx dy \iint O_R(x, y) O_R^*(x, y) dx dy},$$

其中, $O_T(x, y)$ 为无误差重建图像的强度分布, $O_R(x, y)$ 为有误差重建图像的强度分布, “*”表示求共轭. Strehl 比越趋近于 1, 表明成像质量越好.

4.2 仿真结果

为验证所提快速图像重构算法, 选择传统三光束图像重构算法作为参考算法 [6,7,14], 仿真参数设置如表 1 所示.

表 1 成像系统的仿真参数

Table 1. Simulation parameters for imaging system.

仿真参数	取值
激光波长/nm	532
目标尺寸	3 m × 3 m
采样频率/Hz	1200
采样点数量	9600
第1光束频移量/MHz	80
第2光束频移量	80 MHz+20 Hz
第3光束频移量	80 MHz+80 Hz
第4光束频移量	80 MHz+180 Hz
第5光束频移量	80 MHz+220 Hz
剪切量 s_x /m	0.09
剪切量 s_y /m	0.09
探测器阵列规模	100 × 100

仿真目标如图 3(a) 所示, 对于 50 次采样的回波数据, 分别利用所提快速图像重构算法和传统三光束图像重构算法重构目标图像, 每次采样数据可重构 1 幅图像, 利用多幅图像平均抑制散斑效应. 当采样次数为 50 时, 两种算法的重构图像分别如图 3(b), (c) 所示, 对应的图像 Strehl 分别为 0.8399 和 0.8197. 因此, 快速图像重构算法的图像质量优于传统三光束图像重构算法.

随着采样次数的增加, 两种算法的重构图像的 Strehl 比如图 4 所示. 可知, 在平均次数相同情况下, 快速图像重构算法的图像 Strehl 比一直大于传统三光束图像重构算法, 在平均次数不超过 50 次的情况下, 快速图像重构算法的图像 Strehl 比至少比传统三光束图像重构算法大 2.3%. 因此, 在数据采样次数相同时, 快速图像重构算法的成像质量优于传统三光束图像重构算法.

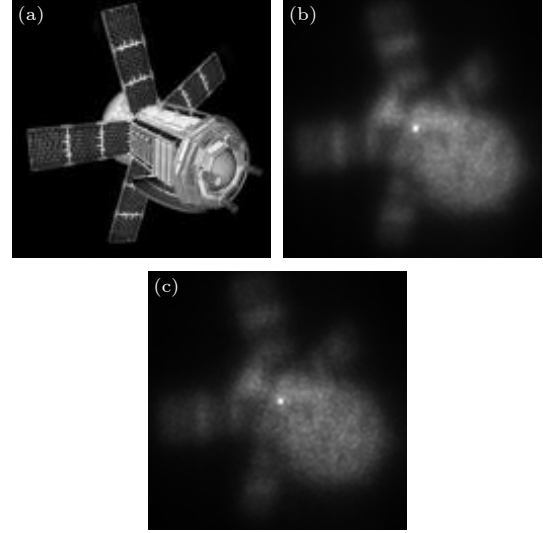


图 3 50 次平均后的重构图像 (a) 原始图像; (b) 快速图像重构算法; (c) 传统三光束图像重构算法

Fig. 3. Reconstructed images after 50 averages: (a) Original target image; (b) fast image reconstruction algorithm; (c) traditional three-beam image reconstruction algorithm.

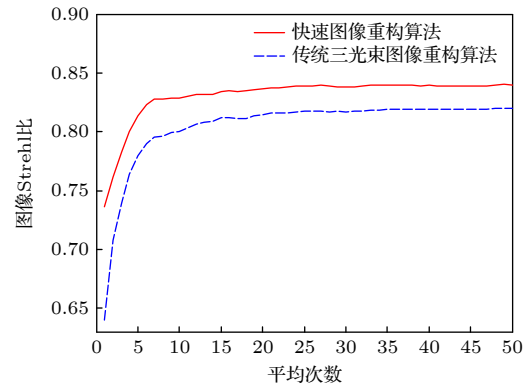


图 4 两种算法的图像 Strehl 比

Fig. 4. Strehl ratios of reconstructed images with both algorithms.

为重构相同质量的目标图像, 对快速图像重构算法与传统三光束图像重构算法所需的数据采样次数进行比较, 如表 2 所示, 当重构图像的 Strehl 比为 0.8133 时, 快速图像重构算法所需的采样次数为 5 次, 而传统三光束图像重构算法所需的采集次数为 20 次. 当重构图像的 Strehl 比为 0.8230 时, 快速图像重构算法所需的采样次数为 6 次, 从图 4 可知, 传统三光束图像重构算法在平均次数

表 2 两种算法所需的数据采样次数
Table 2. The number of data sampling times required for both algorithms.

Strehl比	0.7360	0.7612	0.7823	0.8001	0.8133	0.8230
快速图像重构算法的采样次数	1	2	3	4	5	6
传统三光束图像重构算法的采样次数	4	5	7	11	20	无法达到

为 49 次时, 其图像 Strehl 比达到最大值为 0.8200. 所以传统三光束图像重构算法的重构图像经 50 次平均也达不到与快速图像重构算法相同的图像质量. 因此, 为达到相同的重构图像质量, 采用快速图像重构算法, 所需的回波数据采样次数从 20 次减少至 5 次, 所需的采样次数是传统三光束图像重构算法的 1/4, 将回波数据采样速率提高至传统三光束图像重构算法的 4 倍, 采集的数据量也降至传统三光束图像重构算法的 1/4.

综上, 快速图像重构算法的数据采样速率和成像质量均优于传统三光束图像重构算法. 虽然快速图像重构方法的硬件成本略高, 比传统三光束图像重构方法多了两路小孔径激光发射装置, 但是, 其数据采集速率却快得多, 对远程运动目标的成像识别有显著优势, 便于在短时间内正确反映目标姿态的变化.

4.3 分析与讨论

4.3.1 回波数据采集速率比较

在文献 [15] 中, 四光束图像重构算法将采样速率提高至传统三光束图像重构算法的 2 倍, 本文所提的快速图像重构算法可将采样速率提高至传统三光束图像重构算法的 4 倍. 因此, 与现有 SBI 图像重构算法相比, 快速图像重构算法在数据采样速率方面具有优势.

4.3.2 回波数据处理的计算复杂度

根据 4.2 节仿真结果可知, 快速图像重构算法 5 次平均的图像质量与传统三光束图像重构算法 20 次平均的图像质量一样. 因此, 比较算法的计算复杂度, 即分析快速图像重构算法处理 5 次采样的回波数据和传统三光束图像重构算法处理 20 次采样的回波数据所需要的时间. 在利用采样的回波数据进行图像重构时, 图像重构算法的计算步骤包括回波信号频谱分析、目标相位差与振幅乘积提取、相位恢复、振幅解调、通过傅里叶逆变换重构目标图像, 其中相位恢复的计算量占比最大. 两种算法在其他计算步骤的耗时差异很小, 在相位恢复步骤

的耗时差异大. 快速图像重构算法每次处理回波数据需执行 8 次相位恢复步骤, 处理 5 次回波数据则需执行 40 次相位恢复步骤, 而传统三光束图像重构算法每次处理回波数据需执行 1 次相位恢复步骤, 处理 20 次回波数据则需执行 20 次相位恢复步骤. 因此, 为达到相同的成像质量, 快速图像重构算法在回波数据处理的耗时为传统三光束图像重构算法的 2 倍.

4.3.3 视场角

光束的初始相位对传统三光束图像重构方法和快速图像重构方法的成像质量均没有影响, 目标图像仅发生了整体的偏移, 通过周期延拓可重构完整目标图像. 仍采用如图 3(a) 所示的仿真目标, 当目标尺寸为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 时, 利用光束 (1, 3, 4), (1, 3, 5), (1, 4, 5), (3, 4, 5) 的干涉信息复原图像, 快速图像重构方法影响了成像视场角, 在仿真参数相同的情况下, 快速图像重构方法的重构图像如图 5(a) 所示, 传统三光束图像重构方法的重构图像如图 5(b) 所示, 均为 1 次采样的回波数据所重构且经周期延拓后的图像. 从图 5 可知, 对同一目标成像, 重构结果经周期延拓后, 图 5(a) 中的目标之间的间距更小, 呈交错分布, 而图 5(b) 中的目标之间间距更大, 若目标尺寸变大, 则图 5(a) 中的目标会先发生混叠. 在目标不发生混叠的前提下, 传统三光束图像重构方法能对更大尺寸的目标成像.

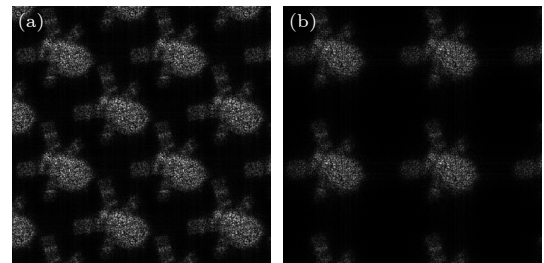


图 5 两种方法的重构图像 (a) 快速图像重构算法; (b) 传统三光束图像重构算法

Fig. 5. Reconstructed images with both methods: (a) Fast image reconstruction algorithm; (b) traditional three-beam image reconstruction algorithm.

仿真结果表明,快速图像重构方法的成像视场角比传统三光束图像重构方法小.如何解决快速图像重构方法对成像视场角的影响是后续可研究的问题.

5 结 论

本文针对 SBI 成像系统采样速率不够快的问题,提出快速图像重构方法.利用中心对称结构且呈“十”字形排布的发射光束阵型,一次曝光,回波信号可携带目标更多的频谱信息,以此减少回波数据采样次数,从而提高采样速率.利用所提相位复原和振幅解调方法,一次曝光可重构 8 幅目标图像,大大减少了获得清晰图像所需的数据采样次数.与传统三光束图像重构方法相比,在采样次数相同的情况下,该方法的重构图像 Strehl 比值至少提高了 2.3%,成像质量更好;为重构相同质量的目标图像,该方法所需的回波数据采样次数从 20 次降低至 5 次,将数据采样速率提高至传统三光束图像重构方法的 4 倍,对位姿快速变化的目标的成像识别有显著优势.

参考文献

- [1] Gao X, Feng L J, Li X Y 2016 *Opt. Commun.* **380** 452
- [2] Dong L, Lu Z W, Liu X Y 2019 *Chin. Opt.* **12** 138 (in Chinese) [董磊, 卢振武, 刘欣悦 2019 *中国光学* **12** 138]
- [3] Cao B, Luo X J, Chen M L, Zhang Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124205 (in Chinese) [曹蓓, 罗秀娟, 陈明徕, 张羽 2015 *物理学报* **64** 124205]
- [4] Luo X J, Liu H, Zhang Y, Chen M L, Lan F Y 2019 *Chin. Opt.* **12** 753 (in Chinese) [罗秀娟, 刘辉, 张羽, 陈明徕, 兰富洋 2019 *中国光学* **12** 753]
- [5] Voelz D G 1995 *Proc. SPIE* **2566** 74
- [6] Hutchin R A 1993 *Proc. SPIE* **2029** 161
- [7] Voelz D G, Gonglewski J D, Idell P S 1993 *Proc. SPIE* **2029** 169
- [8] Landesman B T, Kindilien P, Pierson R E, Matson C L, Mosley D 1997 *Opt. Express* **1** 312
- [9] Sica L 1996 *Appl. Opt.* **35** 264
- [10] Lan F Y, Luo X J, Chen M L, Zhang Y, Liu H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 204202 (in Chinese) [兰富洋, 罗秀娟, 陈明徕, 张羽, 刘辉 2017 *物理学报* **66** 204202]
- [11] Lan F Y, Luo X J, Fan X W, Zhang Y, Chen M L, Liu H, Jia H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 204201 (in Chinese) [兰富洋, 罗秀娟, 樊学武, 张羽, 陈明徕, 刘辉, 贾辉 2018 *物理学报* **67** 204201]
- [12] Stahl S M, Kremer R, Fairchild P, Hughes K, Spivey B 1996 *Proc. SPIE* **2847** 150
- [13] Olson D F, Long S M, Ulibarri L J 2000 *Proc. SPIE* **4091** 323
- [14] Chen M L, Luo X J, Zhang Y, Lan F Y, Liu H, Cao B, Xia A L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 024203 (in Chinese) [陈明徕, 罗秀娟, 张羽, 兰富洋, 刘辉, 曹蓓, 夏爱利 2017 *物理学报* **66** 024203]
- [15] Lu C M, Chen M L, Luo X J, Zhang Y, Liu L, Lan F Y, Cao B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 114201 (in Chinese) [陆长明, 陈明徕, 罗秀娟, 张羽, 刘辉, 兰富洋, 曹蓓 2017 *物理学报* **66** 114201]
- [16] Chen M L, Liu H, Zhang Y, Luo X J, Ma C W, Yue Z L, Zhao J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 194201 (in Chinese) [陈明徕, 刘辉, 张羽, 罗秀娟, 马彩文, 岳泽霖, 赵晶 2022 *物理学报* **71** 194201]
- [17] Chen M L, Ma C W, Luo X J, Liu H, Zhang Y, Yue Z L, Zhao J 2023 *Proc. SPIE* **12601** 126010M-1
- [18] Chen M L, Ma C W, Zhang Y, Liu H, Luo X J, Yue Z L, Zhao J, Sun C 2023 *Opt. Eng.* **62** 073102
- [19] Landesman B T, Olson D F 1994 *Proc. SPIE* **2302** 14
- [20] Bush K A, Barnard C C, Voelz D G 1996 *Proc. SPIE* **2828** 362
- [21] Rider D B, Voelz D G, Bush K A, Magee E 1993 *Proc. SPIE* **2029** 150
- [22] Fienup J R 2003 *US Patent* 006597304B2 [2003-7-22]
- [23] Gamiz V L 1994 *Proc. SPIE* **2302** 2
- [24] Speckle-Based Imaging, Optical Physics Company <http://www.opci.com/technologies/speckle-based-imaging> [2017-1-9]
- [25] Goodman J W 1985 *Statistical Optics* (New York: John Wiley) p495
- [26] Goodman J W 1996 *Introduction to Fourier Optics* (2nd Ed.) (New York: Mc Graw Hill)
- [27] Xiang M, Pan A, Zhao Y Y, Fan X W, Zhao H, Li C, Yao B L 2021 *Opt. Lett.* **46** 29
- [28] Idell P S, Gonglewski J D 1990 *Opt. Lett.* **15** 1309

Fast sampling based image reconstruction algorithm for sheared-beam imaging*

Chen Ming-Lai¹⁾²⁾³⁾ Ma Cai-Wen¹⁾²⁾³⁾ Liu Hui^{1)2)3)†}

Luo Xiu-Juan¹⁾²⁾³⁾ Feng Xu-Bin¹⁾²⁾ Yue Ze-Lin¹⁾³⁾ Zhao Jing¹⁾³⁾

1) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

2) (*Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 2 August 2023; revised manuscript received 26 September 2023)

Abstract

Sheared-beam imaging (SBI) is an unconventional ground-based optical imaging technique. It breaks through the traditional optical imaging concept by using three coherent laser beams, which are laterally displaced at the transmit plane, to illuminate the target, reconstructing the target image from echo signals. However, the echo data sampling of the imaging system is still not fast enough to reconstruct the high resolution and clear image of the target when imaging the target that is at rapidly changing position and attitude. In order to solve this problem, in this work an image reconstruction method is proposed based on five-beam fast sampling. An emitted beam array arranged in the cross shape with a central symmetrical structure is proposed, and the encoding and decoding method of the imaging system are changed. With a single exposure, the echo signals carry more spectrum information of the target, and the number of reconstructed images can be increased from 1 to 8, which quickly suppresses the speckle effect of the reconstructed image. Firstly, the principle of the imaging technique based on fast sampling is presented. Then, an image reconstruction algorithm based on fast sampling is studied. Eight groups of phase differences and amplitude information of the target can be extracted from echo signals. The wavefront phases are solved by the least-squares method, and wavefront amplitude can be obtained by the algebraic operation of speckle amplitude. The target image is reconstructed by the inverse Fourier transform. The simulation results show that comparing with the traditional three-beam image reconstruction method, the sampling times of echo data needed to obtain the same quality image are reduced from 20 to 5, which greatly reduces the sampling times of echo data and improves the sampling rate of echo data.

Keywords: sheared-beam imaging, fast sampling, image reconstruction, sampling rate

PACS: 42.25.Fx, 42.25.Kb, 42.30.Rx, 42.30.Kq

DOI: [10.7498/aps.73.20231254](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231254)

* Project supported by the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2020JQ-438).

† Corresponding author. E-mail: liuhui1@opt.ac.cn



基于快速采样的剪切光束成像图像重构算法

陈明徕 马彩文 刘辉 罗秀娟 冯旭斌 岳泽霖 赵晶

Fast sampling based image reconstruction algorithm for sheared-beam imaging

Chen Ming-Lai Ma Cai-Wen Liu Hui Luo Xiu-Juan Feng Xu-Bin Yue Ze-Lin Zhao Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 024202 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231254

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231254>

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

剪切光束成像技术稀疏重构算法

Spatial domain sparse reconstruction algorithm of sheared beam imaging

物理学报. 2022, 71(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220494>

上行链路大气波前畸变对剪切光束成像技术的影响

Effect of uplink atmospheric wavefront distortion on image quality of sheared-beam imaging

物理学报. 2018, 67(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181144>

频域稀疏采样和激光成像方法

Sparse sampling in frequency domain and laser imaging

物理学报. 2022, 71(5): 058705 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211408>

基于自适应阈值方法实现迭代降噪鬼成像

Iterative denoising of ghost imaging based on adaptive threshold method

物理学报. 2018, 67(24): 244201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181240>

三种降采样成像策略的性能优化以及与传统傅里叶望远镜的比较

Performance optimization of three down-sampling imaging strategies and their comparison with the conventional Fourier telescope

物理学报. 2019, 68(7): 074203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181801>

基于迭代重构算法改进晶体衍射分光X射线鬼成像的图像质量研究

Improving quality of crystal diffraction based X-ray ghost imaging through iterative reconstruction algorithm

物理学报. 2022, 71(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211978>