

基于随机相位板扫描的可重复赝热光源研究

焦 佳^{1,2} 赵成强^{1*} 崔丽君^{1,2} 徐文东¹
(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 针对强度关联成像遥感探测中存在的成像速度受到参考臂图像采集速度限制的问题, 研究了一种基于随机相位板扫描的可重复赝热光源。通过产生可重复使用的散斑, 省去成像过程中参考臂的实时采集。建立了散斑重复性评价函数, 并数值模拟分析了使用可重复散斑对关联成像质量的影响, 给出了在不影响成像质量的情况下所允许的激光强度抖动和扫描定位精度。实验分析了此可重复赝热光源的性能指标。实验结果表明, 在发射速率为 4000 frames/s 时, 赝热光源的激光强度抖动及扫描定位精度均满足要求, 散斑相关系数可达到 0.97 以上, 成像分辨率可达到衍射极限, 证实了此可重复赝热光源的可行性。

关键词 成像系统; 强度关联成像; 赝热光源; 相位板

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0911002

Research on the Repeatable Pseudo-Thermal Light Based on Random Phase Plate Scanning

Jiao Jia^{1,2} Zhao Chengqiang¹ Cui Lijun^{1,2} Xu Wendong¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To solve the problem that the imaging speed is limited by the reference arm acquisition in remote sensing experiment based on correlated imaging, a repeatable pseudo-thermal light based on random phase plate scanning is proposed. The repeatable laser speckles are produced so that reference arm acquisition is not necessary in imaging process. Repeatability evaluation function is established and the influence of repeatability on image quality are numerically analyzed. Laser intensity jitter and positioning accuracy are pointed out to make sure that the image quality is not affected. The performance of the repeatable pseudo-thermal light is verified, and at the emission velocity of 4000 frames/s, the correlation coefficient can reach more than 0.97 with intensity jitter and positioning accuracy satisfying. The feasibility of the repeatability of pseudo-thermal light is approved and imaging resolution can reach the diffraction limit.

Key words image systems; intensity correlated imaging; pseudo-thermal light; phase plate

OCIS codes 110.1650; 030.6140; 160.2750

1 引 言

强度关联成像, 是利用光场的涨落对目标进行编码^[1-5], 通过计算物光场与参考光场的二阶关联就可得到目标清晰的像。由于真实热光场相干时间

极短、亮度低^[6], 难以被现有探测器准确捕捉。为克服上述缺陷, 模拟真实热光场统计性质的赝热光源被引入到关联成像中。赝热光源可由旋转随机相位板^[7]、数字微镜器件(DMD)^[8]或液晶空间激光调制

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-05-06

基金项目: 国家 863 计划(2011AA120101)

作者简介: 焦 佳(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事强度关联成像方面的研究。E-mail: shinyjiao@sina.com

导师简介: 徐文东(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计、强度关联成像等方面的研究。

E-mail: xuwendong@mail.siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: chqzhao@siom.ac.cn

器^[9-10]对激光调制产生。利用 DMD、液晶空间激光调制器等器件可对激光作特定调制,其光强涨落的分布可以预置,但 DMD 和液晶光损伤阈值较低,不宜用在需要高激光能量的遥感探测中。使用随机相位板(如毛玻璃)产生的赝热光源,由于其随机调制作用,产生的光场涨落不可预知,所以在实际成像过程中,需要加入参考臂并用阵列探测器同步采集光场的涨落^[11-13]。但是现有阵列探测器如 CCD、CMOS 相机,连续获取高分辨率图像时,传输速度受到数据总线带宽限制,很大程度上限制了关联成像的成像速度。

将强度关联成像应用于遥感探测,若按现有的赝热光源强度关联成像装置^[14],形成一幅目标图像,需要同时对参考臂和物臂多次采样。假定成一幅遥感图像需要 1000 次采样,参考臂单次采样是分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel} \times 8 \text{ bits}$ 的图像,物臂单次采样是单点数据 8 bits,则一次成像需要约 1 Gb 的数据量。若达到动态成像的效果,1 s 内成像 30 frames,则 1 s 内需要采集、传输、存储、计算调用 30 Gb 的数据量,这样极端苛刻的要求是一般硬件难以达到的。若能实现参考光场的重复使用,参考光场只需预先采集一次并存储下来,成像过程中便可省去参考光场的采集,只采集物臂点探测器数据,数据量将大幅减小,成像速度可提高十倍甚至百倍以上,如此将使动态成像成为可能。

脉冲式赝热光源的研究表明^[15],若激光脉冲宽度达到纳秒量级,随机相位板对激光的调制作用仅由其照射区域决定。基于上述思想,提出了一种基于随机相位板扫描的可重复赝热光源,在对随机相位板预编码的基础上,通过高精度的扫描控制,使激光脉冲每次都照射在预定区域,实现对激光的预定调制,从而实现发射散斑具有可重复性,在成像过程中可省去参考光场的采集。基于相位板扫描的可重复赝热光源应用于关联成像中,预先按既定路径低速扫描,采集散斑序列并存储。成像过程中按同样路径高速扫描,将预定的散斑序列高速发出,无需采集参考光场,只需采集物臂点探测器的光强,与预存的散斑关联即可得到目标图像。此种工作方式下,成像速度决定于扫描速度和点探测器采集速度,成像速度可显著提高。

2 评价函数及数值模拟

2.1 评价函数

基于随机相位板扫描的可重复赝热光源,其技

术思想如图 1 所示。首先对随机相位板预编码并规划出 N 个预定扫描区域($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$),然后通过扫描控制,按预先规划的路径对随机相位板进行扫描,使激光脉冲按次序照射到预定的扫描区域,则发射散斑是激光脉冲受到 N 个预定区域相位调制后的散斑序列($K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$),散斑与预定扫描区域一一对应。

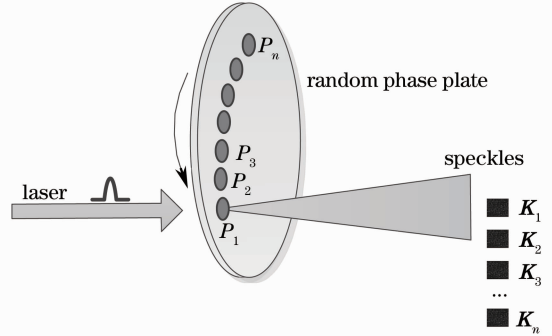


图 1 随机相位板扫描及对应散斑生成
Fig. 1 Diagram of random phase plate scanning and speckles produced

赝热光源的可重复性是指在既定的扫描路径下,以不同速率扫描随机相位板发出的 N 个散斑序列具有良好的相似性。也就是说,重复性良好的情况下,低速扫描时记录的散斑序列可以代表高速扫描时发出的散斑序列。因此,散斑序列的重复性受如下因素的影响:1)激光光源的变化,如强度抖动、模式变化等;2)照射区域与预定区域的偏移,主要是扫描过程的重复精度定位;3)其他外界因素,如机械振动、温度等。由于第三种因素无法预知,且影响较小,主要考虑前两类影响,并且对于激光光源的变化,只考虑激光强度抖动的影响(假定激光模式稳定)。

为量化分析可重复赝热光源的优劣,建立评价函数,以散斑的相关系数表征散斑的重复性。假定低速扫描下,采集的 N 个预定扫描区域对应的散斑强度分布(离散化矩阵)分别为 K_1, K_2, \dots, K_N ;高速扫描下, N 个预定扫描区域对应的散斑光场(离散化矩阵)分别为 K'_1, K'_2, \dots, K'_N ,相关系数

$$\varphi_i = \frac{\sum (K_i - \bar{K}_i)(K'_i - \bar{K}'_i)}{\sum (K_i - \bar{K}_i)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中 \bar{K}_i, \bar{K}'_i 分别为 K_i, K'_i 的平均值, φ_i 为第 i 预定扫描区域对应的散斑的相关系数,其值在 $0 \sim 1$ 之间, φ 越接近 1 表示相关度越高,散斑重复性越好。可重复赝热光源的散斑重复性 φ 通常以 φ_i 的最小值表示。

2.2 数值模拟

通过数值模拟可重复热光源关联成像过程,量化分析激光强度抖动、扫描重复定位精度对散斑重复性及成像质量的影响,进而在保证关联成像质

量不受影响的情况下,获得可重复性热光源所需的具体技术指标。

如图 1 所示,根据惠更斯-菲涅耳原理^[16],可重复热光源发射的 N 个激光散斑光场:

$$U(x, y, i) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \iint U(\xi, \eta, i) \exp[jkP(\xi, \eta, i)] \exp\left\{jk \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z}\right\} d\xi d\eta, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

式中 $U(x, y, i)$ 为距离相位板 z 的第 i 个激光散斑光场, $U(\xi, \eta, i)$ 为第 i 个激光脉冲到达相位板表面的光场, $P(\xi, \eta, i)$ 为第 i 个预定区域随机相位, 其值在 $(-\pi, \pi)$ 区间服从均匀分布。

数值模拟关联成像过程^[12], 将上述 N 个散斑序列 $U(x, y, i)$ 作为参考光场对目标进行空间编码, 假定目标 T , 成像计算表达式为

$$I_w(N) = \iint I_r(x, y, N) \times h(x, y) dx dy, \quad (3)$$

$$T(x, y) = \langle I_r(x, y, N), I_w(N) \rangle, \quad (4)$$

式中 $T(x, y)$ 为 $I_r(x, y, N)$ 和 $I_w(N)$ 通过二阶关联运算重构所得目标的像, $I_r(x, y, N)$ 为 N 个散斑序列 $U(x, y, i)$ 的光场强度, $I_w(N)$ 为目标对 N 个散斑序列的能量响应, $h(x, y)$ 为反射系数(或透射系数)。数值模拟生成的热光源散斑图样及仿真使用目标如图 2 所示。

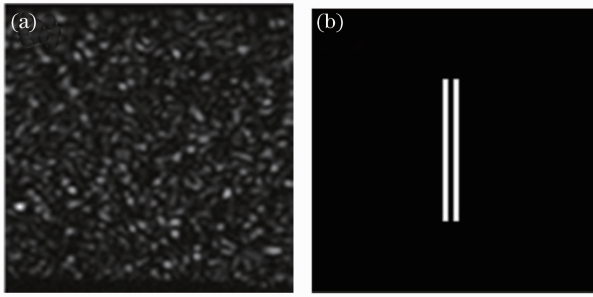


图 2 数值模拟图样。(a)散斑图样;(b)目标样本

Fig. 2 Patterns in numerical simulation. (a) Speckle pattern; (b) target sample

目标双缝中心间距为 $64 \mu\text{m}$, 与散斑横向相干长度 L 相等, 散斑横向相干长度是散斑颗粒尺寸的统计平均值, 决定了关联成像分辨率。数值模拟参数: 光斑尺寸 $D=1.6 \text{ mm}$, 目标距离 $Z_T=15 \text{ cm}$, 激光波长 $\lambda=532 \text{ nm}$ 。

对于上述特征尺寸达到衍射极限的双缝目标, 其关联成像重构质量可从以下两方面评价: 1) 以均方根误差(MSE, E_{MS})表征引入噪声的多少; 2) 以双

缝的对比度 V 的变化描述分辨率的变化, 具体定义为

$$\begin{cases} E_{MS} = \frac{\sum (T' - T)^2}{\sum T^2}, \\ V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \end{cases} \quad (5)$$

式中 T' 为使用可重复散斑关联重构出的目标图像, T 为理想的重构目标图像, I_{max} 为重构图像中双缝灰度极大值, I_{min} 为极小值。可重复热光源进行关联成像, 成像质量难免有所下降。可根据经验设定相对原始的成像结果。当 $E_{MS} < 0.1$, 双缝对比度 $V > 0.11$ (对应瑞利判据下刚好可以分辨时, 极小值是极大值的 80%), 可以认为成像质量不受影响, 可模拟实验的指标。分别进行存在激光抖动、定位精度下的可重复热光源关联成像数值模拟实验, 结果如图 3 所示, 图中 J 为抖动。

由图 3 可知, 不同激光强度抖动下, 双缝均可以清晰分辨 ($V > 0.2$), 激光强度抖动对分辨率无影响, 但噪声会同步增加。这是由于激光强度抖动对散斑强度涨落的空间分布不会产生影响, 而只会造成散斑序列在时间上呈现微弱的明暗变化, 本质上是在成像过程中引入了噪声; 根据成像质量不受影响的指标, 为使 $E_{MS} < 0.1$, 初步确定激光强度抖动需满足 $J < 10\%$ 。

图 4 中 δ 为定位精度与横向相干长度的比值。由图 4 可知, 双缝对比度会随着定位误差的增大而变差。定位的偏差可以看作是成像过程中出现的微小“湍流”, 这种随机的偏差造成散斑序列在空间上错位, 使散斑颗粒尺寸的统计平均值略微增加, 当增加幅度接近量化误差(散斑矩阵像素大小)时, 分辨率将下降。图 4(m) 中, 在 $0\% < \delta < 20\%$ 区间, 对比度下降不明显 (V 由 0.24 下降到 0.20), 认定此区间分辨率不受影响, 且满足 $E_{MS} < 0.1$, 初步确定 δ 需满足 $\delta < 20\%$ 。

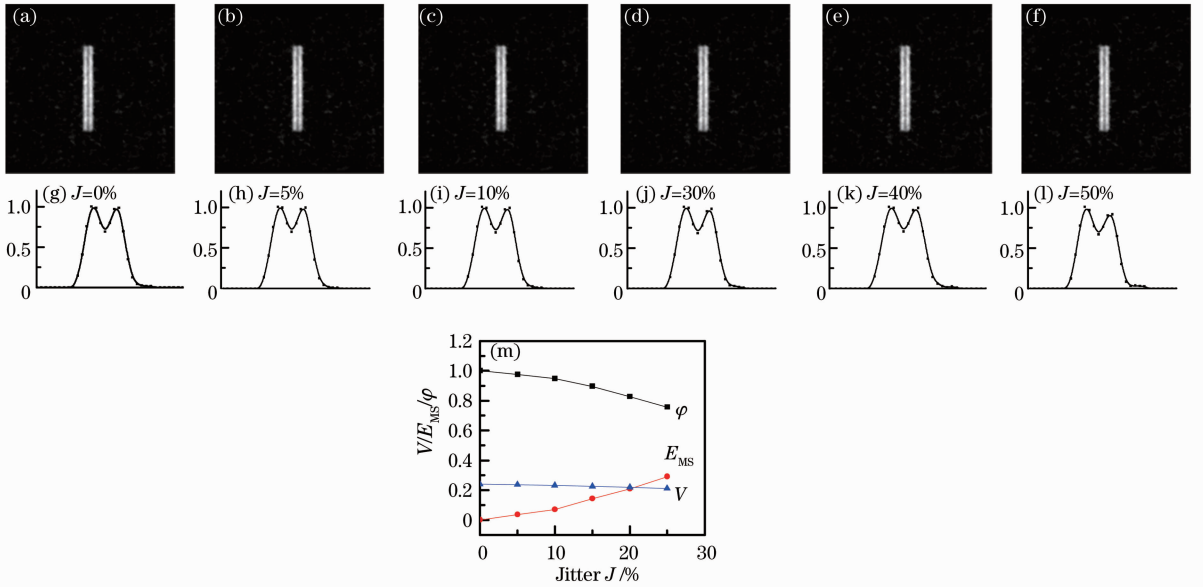


图 3 不同激光强度抖动情况下关联重构实验。(a)~(f) $J=0\% \sim 25\%$ 时的关联重构结果；(g)~(l) 分别为 (a)~(f) 的归一化投影曲线；(m) ϕ, E_{MS} 与 V 随 J 变化曲线

Fig. 3 Correlated imaging experiment with different intensity jitters. (a)~(f) imaging results with $J=0\% \sim 25\%$; (g)~(l) normalized projective curves of (a)~(f), respectively; (m) ϕ, E_{MS} and V versus J

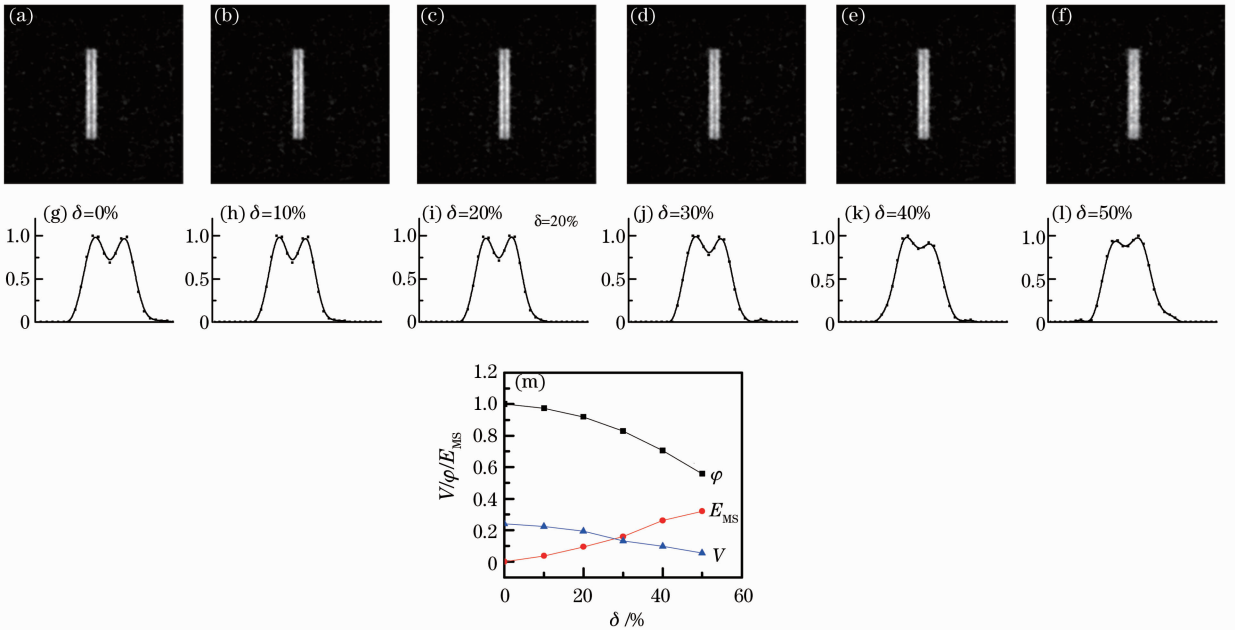


图 4 不同重复定位精度情况下关联成像实验。(a)~(f) $\delta=0\% \sim 50\%$ 关联重构结果；(g)~(l) 分别为 (a)~(f) 的归一化投影曲线；(m) ϕ, E_{MS} 和 V 与 δ 的关系曲线

Fig. 4 Correlated imaging experiment with different position accuracies. (a)~(f) image results with $\delta=0\% \sim 50\%$; (g)~(l) normalized projective curve of (a)~(f), respectively; (m) ϕ, R_{MS} and V versus δ

综合考虑激光强度、横向与纵向定位精度对关联重构的影响,在上述初步确定的区间 $J < 10\%$, $\delta < 20\%$ 范围内,以更小的步长间距进行数值模拟,搜索不影响成像质量的最低参数要求,最终得到如下结

论:为使重构质量不受影响,必须满足:激光强度抖动 $J < 5\%$,横向及纵向定位精度与横向相干尺度的比值均满足 $\delta < 12\%$,此时对应的散斑相关系数 $\phi > 0.95$ 。以此作为设计可重复热光源的技术指标。

3 可重复赝热光源结构与控制

3.1 系统结构

图 5 为基于相位板扫描的可重复赝热光源装置结构图,脉冲激光器(波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 脉冲宽度 $\Delta t = 20 \text{ ns}$)发出的激光束经过扩束镜后照射到随机相位板上,出现在随机相位板后方空间的散斑被 CCD 接收。随机相位板平面与光轴垂直,且其中心

与光轴在同一高度,随机相位板固定在二维扫描台上。二维扫描台由电控旋转台和电控平移台构成,旋转平面、平移方向均与光轴垂直。激光器、光束变换器及 CCD 中心均位于光轴上。激光器、扫描运动和 CCD 触发采集由控制板同步控制,控制板通过 USB 与 PC 通信。

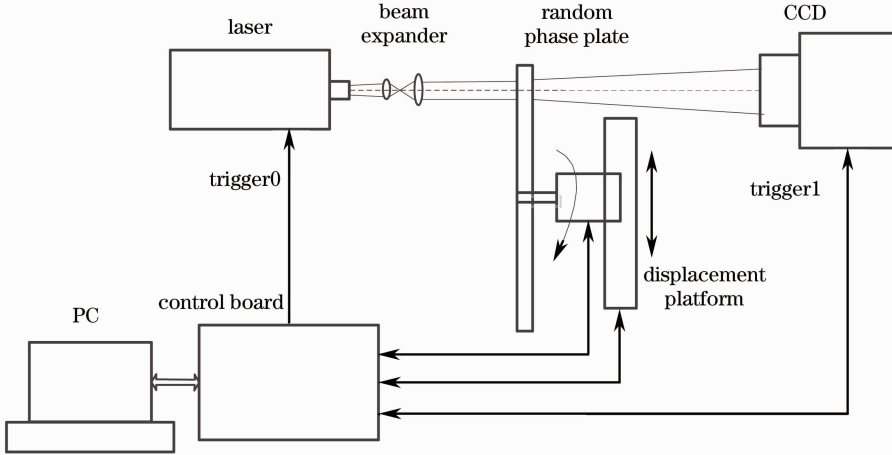


图 5 基于随机相位板扫描的可重复赝热光源结构图

Fig. 5 Structure of repeatable pseudo-thermal light based on random phase plate scanning

激光器采用脉冲式单横模激光器,可由外部触发,外触发频率 $f = 100 \sim 20000 \text{ Hz}$ 。激光经过扩束镜后光斑直径为 1.6 mm 。随机相位板采用 K9 磨砂的毛玻璃,外径为 120 mm ,内径为 60 mm 。二维扫描台内置光栅尺及编码器,可对旋转角度及平移距离进行编码,光栅尺绝对定位精度为 $1 \mu\text{m}$ (四细分精度达到 $0.25 \mu\text{m}$),编码器为单圈绝对式 17 位编码器(对应最小分辨率为 $9.89''$),光栅尺与编码器可对激光照射在毛玻璃上位置进行精密的二维编码;二维扫描台带大负载(质量大于 0.5 kg)情况下,最高旋转速度为 1500 r/min ,平移速度为 50 mm/s 。CCD 采用 AVT 工业相机,分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,像元大小为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$,采集速度最高为 150 Hz 。CCD 探测面距离毛玻璃为 15 cm ,采样计算得到散斑横向相干长度 $L = 64 \mu\text{m}$ 。

3.2 系统电控

随机相位板平面规划有 N 个预定扫描区域,由于随机相位板以旋转加径向平移的模式扫描,因此设计预定扫描区域以等距螺旋线方式排列。从激光入射方向看,以随机相位板中心为原点建立极坐标系,预定区域中心坐标及速度为

$$\begin{cases} R_n = -R_0 + nr, \theta_n = \pi + n\theta, \\ v = \frac{r}{T}, \omega = \frac{\theta}{T}, \end{cases} \quad (6)$$

式中 (R_n, θ_n) ($n = 0, \dots, N-1$) 为预定扫描定位点的极坐标, $(-R_0, \pi)$ 为起始扫描点坐标, r 为预定扫描点的径向间隔, θ 为角向间隔, v 和 ω 分别为平移速度和旋转角速度, T 为激光周期。扫描过程中,每隔一个激光周期 T , 平移和旋转同步运动一定间隔,使得激光脉冲每次到照射下一预定扫描点上。

同步控制是可重复赝热光源的关键,由于激光是以脉冲形式发出的,需要保证如下时序关系,一是激光脉冲发出的时刻,二维扫描运动刚好到达预定的扫描点;二是激光脉冲处于 CCD 曝光片的中心。具体时序关系如图 6 所示。

可重复性赝热光源可以工作在两种模式:1) 参考散斑库采集模式,激光触发频率与 CCD 触发频率相等 ($T_p = 10 \text{ ms}$),随机相位板低速扫描,每隔一个周期 T_p 从当前预定点扫描到下一个预定扫描点,扫描完成,即可采集完整的散斑场,预存作为参考散斑库;2) 高速成像模式,激光触发周期 T 可设定,成像过程中,相位板高速扫描,扫描路径与低速时保持一致,将预定的散斑按次序高速发射出去,供后续关联成像设备使用。

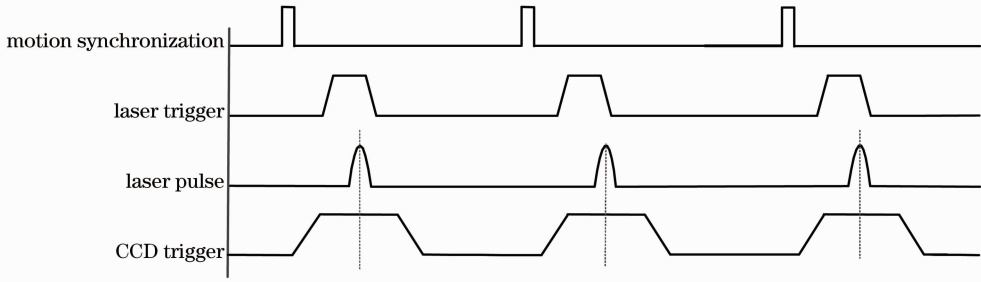


图 6 时序控制图

Fig. 6 Timing control

4 实 验

4.1 可重复赝热光源性能验证

可重复赝热光源在上述介绍的两种工作模式（参考散斑库采集模式与高速成像模式）下分别采集发射的散斑序列，并在激光发出的同时，同步采集激光强度以及二维扫描台光栅尺和编码器的编码坐标。高速模式散斑发射速率为 4 kHz，由于高于

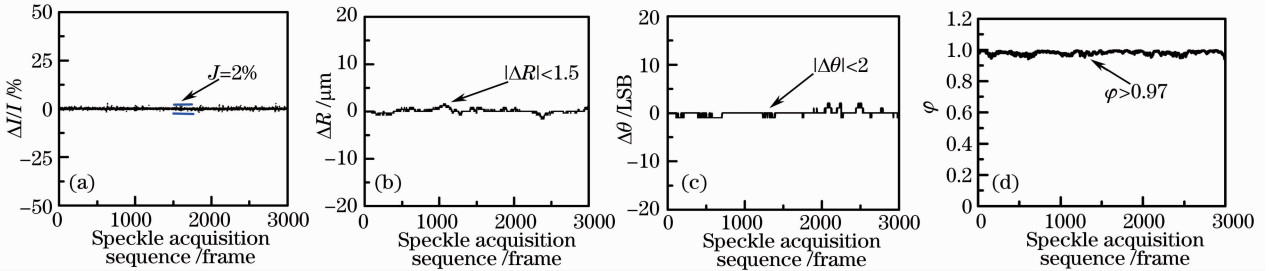


图 7 可重复性赝热光源性能。(a) 激光强度抖动 J ；(b) 径向定位偏差 ΔR ；(c) 角向定位偏差 $\Delta\theta$ ；(d) 散斑的相关系数 φ

Fig. 7 Performance of repeatable pseudo-thermal light. (a) Laser intensity jitter J ；(b) radial deviation ΔR ；

(c) angular deviation $\Delta\theta$ ；(d) correlation coefficient φ

图 7(a)中， ΔI 为两种模式下激光强度差值， I 为参考散斑库对应激光强度，图中两者比值在 $\pm 1\%$ 范围抖动，则强度抖动幅度 $J=2\%$ ；图 7(b)中，径向定位偏差 ΔR 在 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 间变化，则径向定位精度为 $3 \mu\text{m}$ ，径向定位精度与横向相干长度 ($L=64 \mu\text{m}$) 小于 5% ；图 7(c)中，角向定位偏差 $\Delta\theta$ 在 $-1\sim 2$ LSB 范围内变化，LSB 是编码器最小分辨精度 $9.88''$ ，由 $R \times |\Delta\theta|$ 计算切向定位偏差，其中 R 为 $30\sim 60 \text{ mm}$ ，最终得到切向定位精度为 $6 \mu\text{m}$ ，与横向相干长度的比值小于 10% ；上述参数均满足数值模拟所设定的技术指标 ($J < 5\%$ ， $\delta < 12\%$)。图 7(d)反映了发射散斑的重复性，发射散斑相关系数 $\varphi > 0.97$ 优于模拟仿真的散斑相关度指标 $\varphi > 0.95$ 。

4.2 关联成像遥感成像实验

将可重复赝热光源移植到关联成像遥感成像实验中，验证其成像质量。图 8 为关联成像遥感探测

CCD 相机最高采集速度，因此散斑采集采取间隔采集方式，即每隔一定数量的激光脉冲采集一次散斑，分多次采集完整的散斑图样。以低速采集的散斑库作为参考，计算成像模式下激光强度抖动 J 、径向定位偏差 ΔR 、角向偏差 $\Delta\theta$ 以及发射散斑的相关度 φ ，结果如图 7 所示。

实验样机，由赝热光源、发射系统、接受系统及主控机柜组成。

图 9 为 70 m 极限分辨率实验结果，靶标是中心间距为 5 mm，宽度为 2.5 mm 的双缝，双缝距离与样机发射系统的 70 m 衍射极限相等（对应角分辨率为 $15''$ ）。为方便对比，实验中加入参考光路，分别进行可重复赝热光源的高速成像以及传统的同时采集参考臂与物臂的低速成像。低速成像，是以预定的扫描路径低速扫描，散斑发射速率为 100 frames/s，并同时采集参考臂和物臂，物臂与参考臂关联得到成像结果；高速成像，是按同样的预定路径高速扫描，散斑发射速率为 4000 frames/s，只采集物臂信号，将物臂在低速时采集参考臂散斑关联得到成像结果。由于数据量相同，两者成像计算时间相等，但通过提高散斑的发射速率，高速成像速度比低速成像速度提高接近 40 倍。由图 9(c) 横向投影曲线可知，高

速成像结果和低速成像结果都反映出上方双缝反射率比下方反射率略高(可能是由于双缝条纹局部的反射率不同造成的),由于高速扫描定位存在微小误差,高速成像下双缝的对比度从低速成像的 $V =$

0.25微降到高速成像的 $V = 0.23$,衍射极限的双缝仍可以清晰分辨,由此从实验上证明了可重复赝热光源应用于强度关联高速成像的可行性。

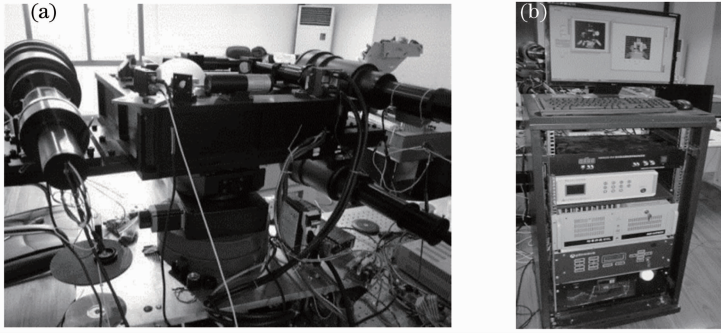


图 8 关联成像遥感探测样机。(a)赝热光源、发射系统及接受系统;(b)主控机柜

Fig. 8 Machine for remote sensing based on correlated imaging. (a) Pseudo-thermal light, transmission system and receive system; (b) master control cabinet

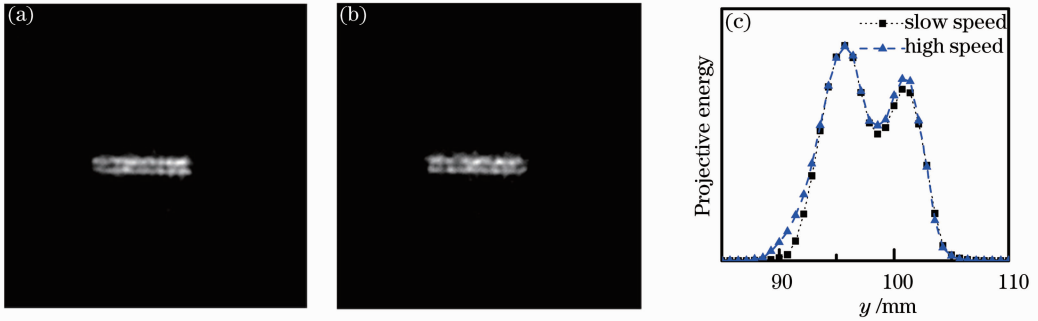


图 9 极限分辨率实验结果比较。(a)低速成像 $f = 100$ Hz; (b)高速成像 $f = 4$ kHz; (c)横向投影曲线

Fig. 9 Comparison of imaging results of limit resolution. (a) Slow-speed imaging $f = 100$ Hz; (b) high-speed imaging $f = 4$ kHz; (c) transverse projective curves

图 10 为 2140 m 遥感成像实验结果,目标为高压线塔。图 10(a)为激光闪光照相成像结果,图 10(b)为利用可重复赝热光源的高速成像结果。

由实验结果可知,闪光照相对比度较差,铁塔只是隐约可见,铁塔细节被淹没在“雾霾”中,而强度关联成像结果则没有受“雾霾”的影响,对比度极高,塔的钢

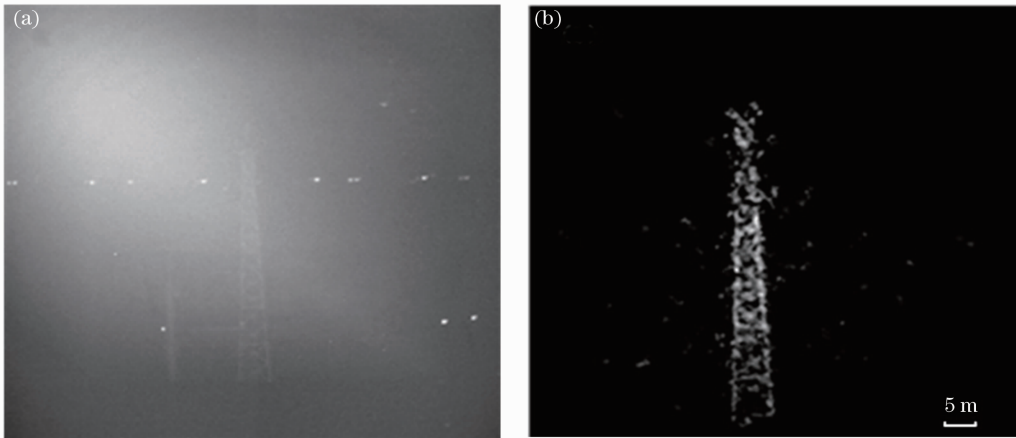


图 10 2140 m 外高压线塔闪光照相与关联成像对比。(a)闪光照相;(b)关联成像

Fig. 10 Comparison of imaging results of correlated imaging and flash radiography for the high-voltage wire tower 2140 m far away. (a) Flash radiography; (b) correlated imaging

梁结构清晰可见,成像质量明显优于闪光照相。

5 结 论

研究了一种基于随机相位板扫描的可重复赝热光源,通过产生可重复使用的激光散斑,省去了关联成像过程中参考臂的实时采集,突破了热光关联成像速度受到参考臂图像采集速度限制的缺陷。实验表明,赝热光源激光散斑序列重复性良好,激光强度抖动幅度与扫描定位精度均满足要求,相关系数可达到 0.97 以上。遥感成像实验结果表明,相比于传统的参考臂与物臂同时采集的成像模式,采用可重复赝热光源成像速度可提高数十倍,而且关联成像图像重构质量良好,分辨率可达到衍射极限。

参 考 文 献

- 1 T B Pitman, Y H Shih, D V Strekalov, *et al.*. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Phys Rev A*, 1995, 52(5): 3429—3432.
- 2 R S Bennink, S J Bentley, R W Boyd. “Two-photon” coincidence imaging with a classical source[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(11): 113601.
- 3 A Valencia, G Scarcelli, M D’Angelo, *et al.*. Two-photon imaging with thermal light[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(6): 063601.
- 4 A Gatti, E Brambilla, M Bache, *et al.*. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(9): 3602—3606.
- 5 F Ferri, D Magatti, A Gatti, *et al.*. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(18): 183602.
- 6 Qi Kangnan, Qin Kecheng, Cheng Lu. Introduction to Statistical Optics [M]. Tianjin: Nankai University Press, 1987. 69—82.
- 7 W Martienssen, E Spiller. Coherence and fluctuations in light beams [J]. *Am J Phys*, 1964, 32(12): 919—926.
- 8 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711002.
- 9 Y Bromberg, O Katz, Y Silberberg. Ghost imaging with a single detector[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(5): 3840—3844.
- 10 J H Shapiro. Computational ghost imaging[J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 1802—1806.
- 11 M H Zhang, Q Wei, X Shen, *et al.*. Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light [J]. *Phys Rev A*, 2007, 75(3): 021803.
- 12 Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia, *et al.*. Statical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1858—1866.
- 13 张明辉,魏青,沈夏,等.基于统计光学的无透镜鬼成像数值模拟与实验验证[J].*光学学报*, 2007, 27(10): 1858—1866.
- 14 X Shen, Y F Bai, T Qin, *et al.*. Experimental investigation of quality of lensless ghost imaging with pseudo-thermal light [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 25(11): 3968—3971.
- 15 C Q Zhao, W L Gong, M L Chen, *et al.*. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(14): 141123.
- 16 Shen Xia, Zhang Minghui, Liu Honglin, *et al.*. Research on the pulsed pseudo-thermal light [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2893—2898.
- 17 沈夏,张明辉,刘洪林,等.脉冲式赝热光源的实验研究[J].*中国激光*, 2009, 36(11): 2893—2898.
- 18 J W Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Qin Kecheng, Liu Desen, Chen Jiabi, *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- 19 古德曼.傅里叶光学导论[M].秦克诚,刘德森,陈家璧,等译.北京:电子工业出版社,2006.

栏目编辑:张腾