

# 可预置强度关联激光三维成像雷达实验研究

梅笑冬<sup>1,2</sup> 龚文林<sup>2\*</sup> 严毅<sup>3</sup> 韩申生<sup>2</sup> 曹清<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海大学理学院, 上海 200444

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009

**摘要** 基于低速预先采集并记录调制散斑场、对毛玻璃高速高精度定位寻址的方式,提出一种方法解决了参考臂面阵 CCD 的图像采集速度对关联成像速度限制的问题。基于该方法搭建了可预置强度关联激光三维成像雷达实验系统。采用每次平移一个系统所决定的散斑大小就能保证两次采样独立的预置运行轨迹方案,以散斑场的相关性系统为评价函数,实验验证了该预置方案准确性高、重复性好。同时,完成了预置速度为 2 kHz 的强度关联激光三维成像演示实验,其成像结果与实时采样速度为 100 Hz 的强度关联激光三维成像结果相当,证明了该技术的有效性。

**关键词** 成像系统; 关联成像; 散斑场; 统计光学

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0710003

## Experimental Research on Prebuilt Three-Dimensional Imaging Lidar

Mei Xiaodong<sup>1,2</sup> Gong Wenlin<sup>2</sup> Yan Yi<sup>3</sup> Han Shensheng<sup>2</sup> Cao Qing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China

<sup>2</sup>Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>3</sup>China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China

**Abstract** A method by low speed pre-acquiring and high speed accurate addressing of reference speckle acquisition is proposed to solve the limit of the low acquisition speed of reference arm array CCD. According to the method, an experimental system of prebuilt three-dimensional ghost imaging lidar is established. In order to ensure the twice sampling independence of preset trajectory scheme using the speckle size decided by translating a system once. The correlation of the speckle field is used as the evaluation function. Experimental results show that the programming is precise and repeatable. Meantime, an experiment with prebuilt three-dimensional ghost imaging lidar in 2 kHz acquisition speed is performed, and the results are almost same as the real-time acquired three-dimensional ghost imaging lidar with the real-time sampling rate of 100 Hz, which demonstrates the effectiveness of this method.

**Key words** imaging systems; ghost imaging; speckle field; statistic optics

**OCIS codes** 110.2990; 280.3640; 030.6140; 030.6600

## 1 引 言

将调制后的空间光场辐照于探测目标,利用单像元探测器探测到的目标返回信号与调制光场的二阶关

收稿日期: 2016-01-29; 收到修改稿日期: 2016-03-20

基金项目: 国家 863 计划(2013AA122901)、国家自然科学基金面上项目(61571427)、中国科学院青年创新促进会(2013162)、中航产学研创新资助(cxy2014ZKY28)

作者简介: 梅笑冬(1989—),男,硕士研究生,主要从事关联成像方面的研究。E-mail: MichealSheldon@163.com

导师简介: 韩申生(1960—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事量子成像和压缩感知关联成像技术等方面的研究。

E-mail: sshan@mail.shcnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: gongwl@siom.cn

联处理获取目标图像信息的方法被称为强度关联成像<sup>[1-8]</sup>。由于关联成像具备较高的探测灵敏度,在遥感探测方面具有广阔的应用前景<sup>[7-13]</sup>。近年来,基于强度关联成像原理,发展了一种新型的三维(3D)凝视成像雷达体制,即强度关联激光三维成像雷达<sup>[12]</sup>。通过采用具备时间分辨率能力的单像元探测器记录目标的返回信号,然后将每个时间切片对应的强度信息与调制光场强度分布进行对应的关联运算,便可以获取不同距离上的二维(2D)空间分布信息,进而实现目标的三维重建。2013年,Gong等<sup>[12]</sup>率先完成了探测距离为1 km的自然场景目标高分辨强度关联激光三维成像演示实验。为了获取满足强度关联激光三维成像探测需求的调制光场强度分布,目前的主要方法有:1)采用主动可控的数字微镜器件(DMD)或者空间光调制器(SLM)调制,通过计算获取调制光场强度分布<sup>[14-17]</sup>;2)采用位相不可知的随机相位板(毛玻璃)对光场进行相位调制,通过加入一个参考臂并用面阵探测器同步采集获取调制光场强度分布<sup>[10-12]</sup>。对于前者,关联成像无需参考臂,其成像速度主要由DMD或者SLM的调制速度决定,但是由于DMD和SLM的损伤阈值(即对器件造成不可逆的物理损伤时所对应的最低激光能量)较低(DMD的损伤阈值为 $10\text{ MW/cm}^2@10\text{ ns}$ ,SLM为 $2\text{ W/cm}^2@10\text{ ns}$ ),往往只是用于关联成像的实验室台面原理验证实验,难以实现远距离的遥感探测。对于后者,由于毛玻璃具备较高损伤阈值( $800\text{ MW/cm}^2@10\text{ ns}$ ),目前已在激光关联遥感成像系统中得到了室外演示验证,因此基于毛玻璃调相式的激光强度关联成像雷达系统是当前的研究主流<sup>[10-13]</sup>。然而,此类雷达系统由于需要一个面阵探测器实时记录调制光场强度分布,在实际应用过程中成像速度往往受限于该面阵探测器的采样帧频。目前具备 $1024\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$ 的高速面阵探测器工作频率最高为 $500\text{ Hz}$ 且价格昂贵,若重构一幅 $200\text{ pixel}\times 200\text{ pixel}$ 的关联成像图像需要10000次采样,即使采用 $500\text{ Hz}$ 的面阵探测器进行调制光场强度分布的实时采集和记录,也需要 $20\text{ s}$ 的采样时间才能获取一幅三维关联成像图像,这对于存在相对运动、大气湍流等实际应用条件下的关联成像是极其不利的<sup>[18-23]</sup>。因此,去除参考臂面阵探测器的实时采集和记录,实现可预置的毛玻璃调相式强度关联激光三维成像是提升关联成像速度的关键。

本文研究了一种通过预先规划毛玻璃的运行轨迹,利用伺服电机高速控制毛玻璃重复定位寻址到预定位置的方式,以实现调制光场强度分布的高速预置,从而解决了参考臂面阵探测器的图像采集速度对关联成像速度的限制。在此基础上,搭建了一套可预置强度关联激光三维成像雷达实验系统,对预置方案的可靠性以及三维成像特性进行实验验证。

## 2 实验装置及控制方案

### 2.1 实验装置

可预置强度关联激光三维成像雷达实验装置如图1所示,激光器发出的激光辐照于高精度电机控制的毛玻璃上,通过一个 $1\sim 10\text{ mm}$ 可调光阑限孔后,经分束器(BS)后分成参考臂和物臂,参考臂通过 $2f-2f$ 成像系统将光阑面处对应的调制散斑场成像于具有高空间分辨率能力的电荷耦合器件(CCD)上,物臂经过一个焦距为 $f_1$ 的透镜将调制后的散斑场成像于远处的待测目标上,目标的反射光由接收望远镜会聚于一个具

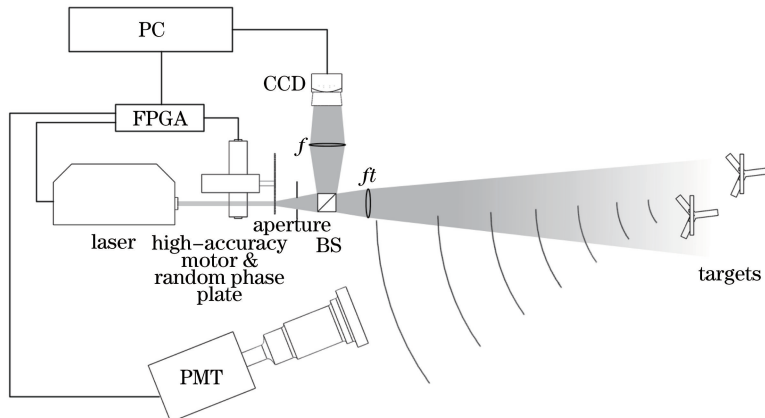


图1 可预置强度关联激光三维成像雷达实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for prebuilt three-dimensional ghost imaging lidar

备时间分辨能力的光电倍增管(PMT)上,由该 PMT 探测并记录目标的返回信号。

为了实现高精度的快速预置,采用高精度的旋转伺服电机和直线伺服电机对毛玻璃进行编码控制,使得毛玻璃的位置、状态等参量能够跟随输入指令的变化进行自动控制。按照毛玻璃预先设定的运行轨迹,首先在激光器发射频率较低的条件采用低帧频的 CCD 采集并记录每个对应位置处的散斑场强度分布;然后在激光器发射频率较高的条件下,利用旋转伺服电机和直线伺服电机控制毛玻璃,按照低速采集时对应的运行轨迹对毛玻璃进行定位寻址,便可以实现散斑场的高速预置和目标返回信号的高速采集,从而解决参考臂 CCD 的图像采集速度对关联成像速度的限制。因此,在激光器发射频率较高的条件下,有望实现视频级(图像刷新率不低于 25 Hz)的强度关联激光三维成像图像输出。

实验中采用脉冲作为指令,可以这样理解,伺服电机每接收到一个脉冲,就会旋转或平移一个脉冲对应的角度或位移,由于伺服电机本身具备发出脉冲的功能,可以实时地反馈电机的状态,这样就实现了位置、速度和力矩的闭环控制。实验装置采用具有 20 bit 增量式编码器的松下 MSMD012G1V 型旋转伺服电机和雅克贝思 SGL64-AUM2-S-S2 型直线伺服电机,直线伺服电机的编码器采用 RENISHAW 公司的 RGH22S30D61A 型号,定位寻址的控制分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$ 。激光的脉冲同步触发、旋转电机和直线电机的二维同步运动、CCD 的曝光时间、PMT 的数据采集等均由自主开发的同步控制器及现场可编程门阵列(FPGA)核心板进行控制,通过计算机(PC)发布指令给 FPGA 核心板,从而达到控制整个实验装置的目的。

### 2.2 控制方案

可预置强度关联激光三维成像雷达实验装置的控制方案如图 2 所示。采用脉冲作为指令,对激光器、高精度电机、CCD 以及 PMT 等器件进行控制;在脉冲触发模式下,各器件接收一个触发脉冲后则进行一次动作。整个工作模式如下:

1) 低速采集并记录调制散斑场。按照所规划的毛玻璃运行轨迹方案,控制毛玻璃以较慢的速度依次采集并记录各规划位置对应的调制散斑场。为了保证高精度的预置,该过程要求做到以下两点:① 激光光束到达毛玻璃表面时,毛玻璃已运行至所规划的位置;② 散斑场传播至 CCD 感光面时,CCD 应已经处于曝光状态。为确保上述两点,各器件控制脉冲应满足以下时序要求:如图 2 所示,FPGA 根据 CCD 的采样帧频产生一个相同频率的基准同步脉冲,接收到基准同步脉冲后,FPGA 控制毛玻璃移至下一相邻规划位置,同时发出控制脉冲触发 CCD 进入曝光状态,毛玻璃到达规划位置后发出脉冲,触发激光器出光,激光光束经过毛玻璃产生的散斑场到达 CCD 感光面,处于曝光状态的 CCD 采集此刻的调制散斑场,数据采集完后 CCD 停止曝光,至此则完成了一个规划位置调制散斑场的采集,持续重复上述步骤直至到达最后一个规划位置,从而保证了预置所需调制散斑场的采集。

2) 快速预置成像。当高速定位寻址的起始位置与低速采集调制散斑场起始位置一致后,按照所规划的毛玻璃运行轨迹方案,通过伺服电机控制毛玻璃以高速度依次重复规划位置,无需 CCD 实时采集和记录调

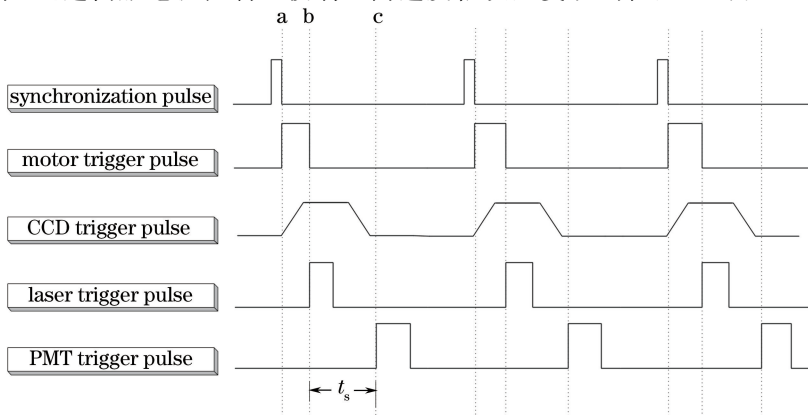


图 2 系统控制脉冲时序图。(a)毛玻璃开始运动、发出 CCD 触发脉冲;  
(b)毛玻璃到达规划位置、发出激光器触发;(c)发出 PMT 触发脉冲

Fig. 2 Timing diagram of control pulse. (a) Ground glass goes to next position, sends CCD trigger pulse;  
(b) ground glass approaches programmed position, laser pulse out; (c) sending PMT trigger pulse

制散斑场,并且采用同步触发脉冲控制激光器的出光和 PMT 对目标返回信号的采集。具体控制脉冲时序如下:通过 FPGA 产生一个远高于 CCD 工作频率的基准同步脉冲作为成像基准频率,接收到基准同步脉冲后,FPGA 控制毛玻璃移动至下一相邻规划位置,到达规划位置后发出脉冲,触发激光器出光,激光光束经过毛玻璃产生调制散斑场向远处目标辐照,同时 FPGA 开启内部计时器计时,当计时器时间达到时间  $t_s$  时,发出脉冲控制 PMT 采集目标返回信号,此处  $t_s$  为散斑场传至目标并到达 PMT 所用的时间,至此完成一次有效采样,重复上述步骤直到毛玻璃到达最后一个规划位置,则完成系统的数据采集,具体时序图如图 2 所示。依据所采集的数据,利用三维关联成像图像重建算法便可以获取目标的三维图像。

### 2.3 毛玻璃运行轨迹规划方案

所规划的毛玻璃运行轨迹应遵守以下两个原则:1) 保证任意两次调制产生的散斑场相互独立;2) 在毛玻璃尺寸有限的情况下,获取尽可能多的有效采样数。

如图 3 所示,为了获取尽可能多的有效采样数,毛玻璃一般采用涡旋线的运行轨迹,预先规划激光照射在毛玻璃上的位置  $P_1 \sim P_M$ 。实验结果表明,若毛玻璃的位置移动量超过系统所决定的一个散斑大小  $\Delta x$  时,则可以认为任意两次调制所产生的散斑场是相互独立的<sup>[24]</sup>。这样一来,与文献[25]中提到的每次采样毛玻璃的位置移动量需大于或者等于辐照于毛玻璃上的激光光斑大小相比,该运行轨迹方案一方面可以使得毛玻璃的旋转速度大幅度地下降,从而有利于提高强度关联激光三维成像雷达实验装置调制散斑场的预置精度;另一方面,在毛玻璃尺寸相同的条件下,可以获得更多的有效采样数,从而有利于光源系统的小型化。

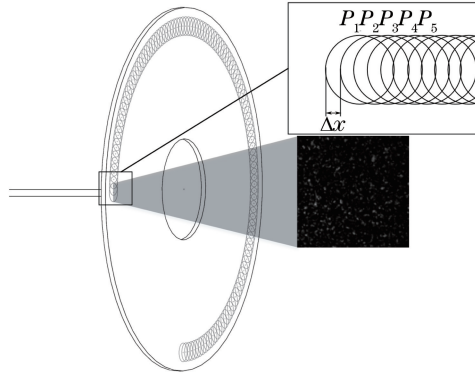


图 3 毛玻璃运行轨迹规划位置示意图

Fig. 3 Sketch map of ground glass motion trajectory

假设相邻两次采样毛玻璃上对应规划位置的中心间距为  $\Delta x$ ,由于径向位移  $\Delta x_r$  远小于旋转位移  $\Delta x_\theta$ ,所以可近似认为  $\Delta x = \Delta x_\theta$ 。利用上述近似以及涡旋线极坐标方程,以毛玻璃的轴心为极点建立极坐标系,可以得到毛玻璃上各规划采样点对应的中心位置满足以下极坐标方程

$$\begin{cases} r = \sqrt{r_0^2 + \frac{k \Delta x^2}{\pi}} \\ \theta = \sqrt{\frac{\pi^2 r_0^2}{\Delta x^2} + \pi k} - \frac{2\pi r_0}{\Delta x} \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $r, \theta$  分别指极径和极角,  $r_0$  为首个规划采样点中心位置与毛玻璃轴心之间的距离,  $\Delta x$  为系统所决定的散斑大小,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, M$ 。

## 3 评价函数及图像重建算法

### 3.1 评价函数

为了定量描述强度关联激光三维成像雷达实验装置调制散斑场的预置准确性和重复性,可以通过计算低速采集记录的调制散斑场与高速定位寻址采集得到的调制散斑场之间的相关性系数来评价。若激光器按照所规划的毛玻璃位置  $P_1, \dots, P_M$  进行辐照,在低速采集情况下得到的调制散斑场强度分布依次为  $I_1(x, y), \dots, I_M(x, y)$ ;之后通过快速定位寻址所规划的毛玻璃位置  $P_1 \sim P_M$ ,此时采集到的调制散斑场强



度分布依次为  $I'_1(x, y), \dots, I'_M(x, y)$ , 上述两种情况下所对应的任意两散斑场的相关性系数为

$$\varphi_i = \frac{\sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} [I_i(x, y) - \bar{I}_i(x, y)] [I'_i(x, y) - \bar{I}'_i(x, y)]}{\text{Max}\left\{\sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} [I_i(x, y) - \bar{I}_i(x, y)]^2, \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} [I'_i(x, y) - \bar{I}'_i(x, y)]^2\right\}}, \quad (2)$$

式中  $\bar{I}_i = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} I_i(x, y)$ ,  $\bar{I}'_i = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} I'_i(x, y)$ ,  $N_x, N_y$  分别为  $I_i(x, y)$  在  $x, y$  方向上的总像元数。 $\varphi_i$  为  $P_i$  位置处的相关性系数,  $\varphi$  为 0~1 之间的值。 $\varphi_i$  值越接近 1, 则说明对应两散斑场的重合性越好, 从而预置准确性越高。

### 3.2 图像重建算法

对于二维强度关联成像, 差分鬼成像是一种较好的关联成像图像重建算法, 具备图像重建信噪比高、重构时间短的特点<sup>[26]</sup>。为了获取目标的三维关联成像结果, 将 PMT 采集得到的返回信号分割成不同的时间(距离)切片信号, 采用差分鬼成像算法分别对各切片信号进行二维关联成像图像重构, 得到目标在不同距离上的切片关联成像图像  $T_{2D}^s(x, y)$ ;  $\forall_s = 1, \dots, N_t$ , 即:

$$T_{2D}^s(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (B_i^s - \gamma^s B'_i) I_i(x, y), \quad \forall_s = 1, \dots, N_t, \quad (3)$$

式中  $B'_i = \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} I_i(x, y)$ ,  $\gamma^s = \frac{\sum_{i=1}^M B_i^s}{\sum_{i=1}^M B'_i}$ ,  $I_i(x, y)$  为参考臂 CCD 第  $i$  次测量所记录的调制散斑场强度分布,  $B_i^s$  为 PMT 采集到的第  $i$  次测量第  $s$  个时间切片对应的强度值,  $M$  为总的采样次数。

结合 PMT 采集得到的目标返回信号和不同距离上的切片关联成像图像  $T_{2D}^s(x, y)$ , 三维强度关联成像结果  $T_{3D}$  可以表示为

$$T_{3D} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^M B_i^s \cdot T_{2D}^s}{M \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} T_{2D}^s}, & \text{if } T_{2D}^s \neq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad \forall_s = 1, \dots, N_t. \quad (4)$$

将各个时间切片还原出的二维图像根据其空间距离赋予不同伪彩色, 再将这些不同颜色二维图像叠加进一幅图像就得到了目标的三维图像, 颜色的不同体现了距离维度的不同。

## 4 实 验

为了测试可预置强度关联激光三维成像雷达实验装置的系统性能, 图 1 所示实验装置参数如下: 采用波长  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  的单横模脉冲激光器, 脉冲宽度为 6 ns, 重复频率为 100~2000 Hz 可调; 激光辐照在毛玻璃表面上的光斑直径为 1.5 mm, 可调光阑大小设为 8 mm, 可调光阑与毛玻璃的距离为 59 mm; 参考臂透镜的有效通光口径和焦距分别为 25 mm 和 70 mm, CCD 的像元大小为  $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ , 发射透镜的有效通光口径和焦距分别为 34 mm 和 180 mm; 接收望远镜的有效通光口径和焦距分别为 50 mm 和 300 mm。

### 4.1 预置散斑场可靠性测试实验

为了验证预置散斑场的准确性, 按照每次采样时毛玻璃移动量为图 1 所示光阑面处所对应的一个散斑大小的运行轨迹方案进行运动, 经计算, 此时对应的  $\Delta x \simeq \frac{59\lambda}{1.5} \mu\text{m} = 42 \mu\text{m}$ 。同时, 此时所形成的散斑场强度分布满足负指数统计特性分布, 经二阶相干度测试<sup>[8]</sup>, 对应的二阶相干度  $g^{(2)} = 1.8$ 。首先, 按照所规划的运行轨迹, 以 100 Hz 的频率低速实时采集并记录调制散斑场 ( $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ ), 即基准散斑场, 共计有效采样数目  $M = 40000$ 。随后以 2 kHz 的频率快速重复上述规划位置进行调制散斑场的实时采集, 即预置

散斑场。利用(2)式,图4给出了所有规划位置预置散斑场与对应基准散斑场之间的相关性系数。从图4的结果可以看出,两者之间的相关性系数均在0.92以上,表明了所研制的强度关联激光三维成像雷达实验装置调制散斑场的预置精度较高。

为了进一步验证预置散斑场的重复性,以同一基准散斑场为参照,每间隔1h重复预置散斑场的采集,计算对应的相关性系数分布及其平均相关性系数(为相关性系数分布的算术平均值)。6次重复性预置的平均相关性系数如图5所示,最小平均相关性系数大于0.97,变化幅度在±0.015以内。基于上述实验测试,证明了强度关联激光三维成像雷达实验装置的预置散斑场可靠性较高。

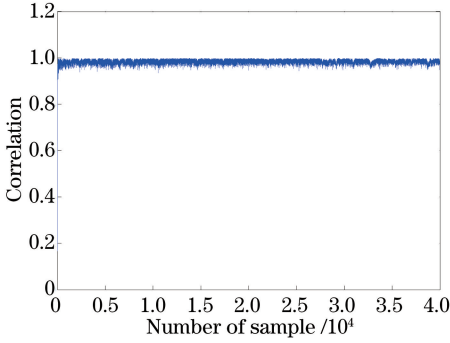


图4 各规划位置的预置散斑场与对应基准散斑场的相关性系数分布

Fig. 4 Distribution of correlation coefficient among prebuilt speckle and corresponding benchmark speckle at each location

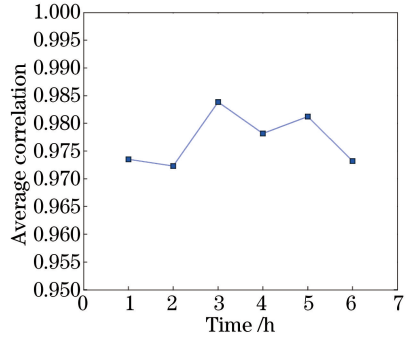


图5 不同时间对应的平均相关性数值

Fig. 5 Corresponding mean correlation coefficients at different time

#### 4.2 三维关联成像实验

为了测试可预置强度关联激光三维成像雷达实验装置的成像性能,实验过程中设置了如图6所示的三维靶标,前端目标与实验装置的距离为60m。前端靶标为木质小人模型,身高为20cm,四肢直径为1.2cm;后端靶标为塑料材质汽车模型,大小为46cm×25cm×11cm,车轮直径为5cm。此外,前端靶标与后端靶标之间的距离为6m。当目标离实验装置60m处,实验装置的分辨率为15mm,按景深公式计算<sup>[27]</sup>,此处景深为200m。因此,即使采用同一预先采集的散斑场与前端目标和后端目标进行关联重构,并不影响关联成像质量<sup>[12]</sup>。

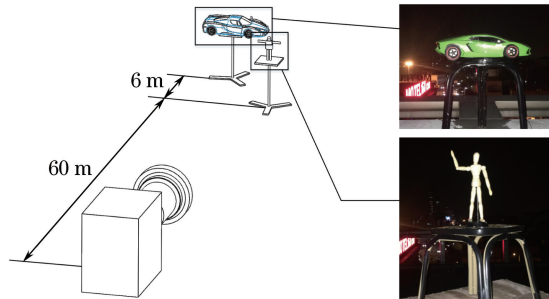


图6 目标设置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of target setup

图7给出了采样速度为2kHz的可预置强度关联激光三维成像实验结果(图像分辨率为200pixel×200pixel,采样数M=40000)。其中,图7(a)为PMT记录的靶标返回信号,可以清楚地看到两个峰值信号α峰与β峰,即前后两个靶标的返回信号。根据α峰与β峰的半峰全宽测试,半峰全宽为9ns,故系统的距离分辨率为1.35m。注意到前端靶标(小人模型)的反射面积明显小于后端靶标(汽车模型),故α峰的强度要明显小于β峰的强度。利用(3)式,图7(c)和(d)分别给出了利用α峰信号和β峰信号进行关联成像获得的小人模型图像和汽车模型图像。利用(5)式所述的三维重建模型,图7(b)给出了对应的三维关联成像重建结果。从上述结果可以看出,前、后端靶标清晰可分,小人四肢、汽车门窗、车轮等细节清晰可

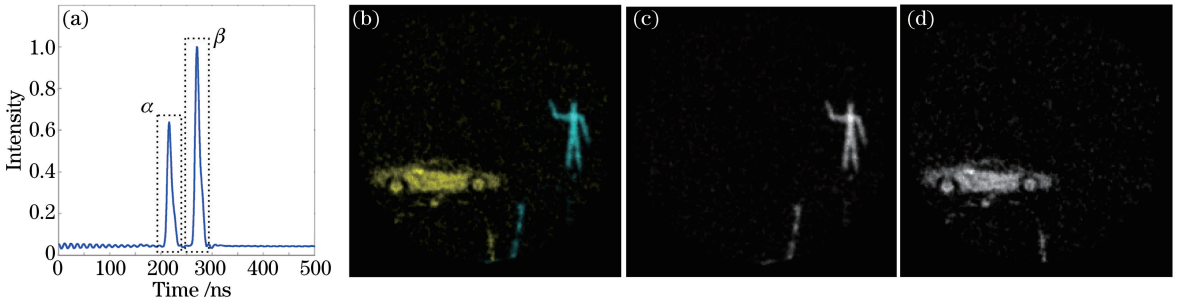


图 7 采样速度为 2 kHz 的预置强度关联激光三维成像实验结果

Fig. 7 Experimental results of intensity correlation laser 3D imaging under 2 kHz sampling rate

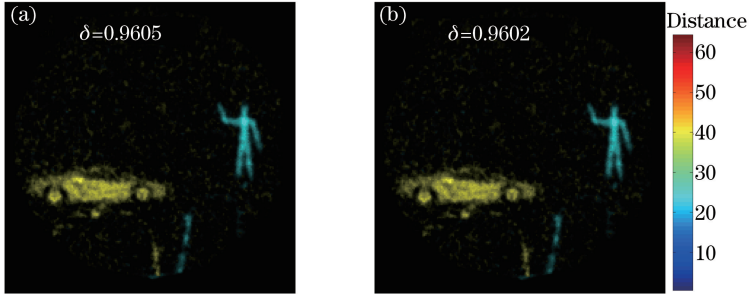


图 8 高速预置和低速不预置条件下对应的强度关联激光三维成像实验结果

Fig. 8 Experimental results of corresponding intensity correlation laser 3D imaging with prebuilt at high speed and without prebuilt at low speed

辨,实现了较高质量的三维关联成像。

根据图 7 的实验数据,图 9(a)~(f)分别给出了采样数  $M$  为 1000, 2000, 5000, 10000, 20000, 40000 下的预置强度关联激光三维成像结果。在采样数  $M=5000$  时,反射截面较小的小人模型已经基本分辨出目标具体细节,而此时反射截面较大的汽车模型典型细节(如车轮)仍无法分辨,说明了关联成像质量与目标的有效反射截面大小有关,这与透视式关联成像系统中目标透射面积与成像质量的关系相同<sup>[28]</sup>。当采样数目增加到 20000 时,汽车模型的典型细节也基本得到恢复,而随着采样数目的增加,图像信噪比有进一步地提升。

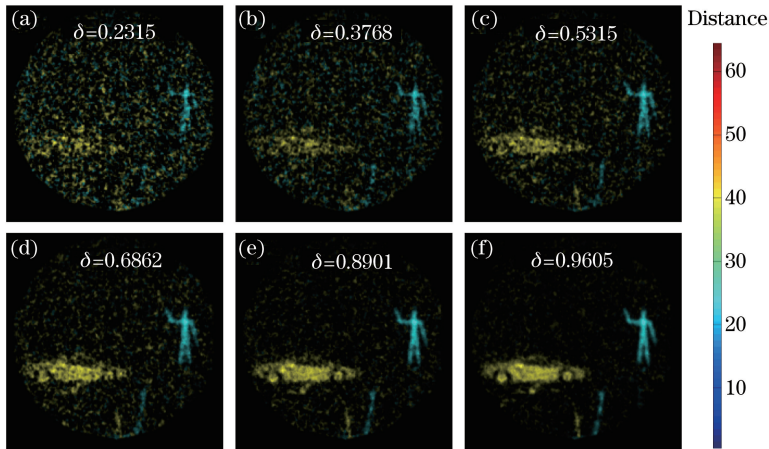


图 9 不同采样数目下的预置强度关联激光三维成像实验结果

Fig. 9 Experimental results of intensity correlation laser 3D imaging with prebuilt at different sampling numbers

## 5 结 论

提出并搭建了一套可预置强度关联激光三维成像雷达实验装置,打破了关联成像系统调制散斑场必须实时采集记录对成像速度的限制。所定义的散斑场相关性系数能够有效评价系统的预置性能,并且实验证

明了所提出的系统预置方案准确性高、重复性好。实现了预置速度为 2 kHz 的强度关联激光三维成像演示实验,验证了该实验装置在高速预置和低速不预置条件下的三维成像结果相当,该技术为视频级的强度关联激光三维成像图像输出奠定了良好的基础。

## 参 考 文 献

- 1 Gatti A, Bache M, Magatti D, *et al.*. Coherent imaging with pseudo-thermal incoherent light[J]. *Journal of Modern Optics*, 2006, 53(5): 739-760.
- 2 Zhang D, Zhai Y H, Wu L A, *et al.*. Correlated two-photon imaging with true thermal light[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2354-2356.
- 3 Wang Kaige, Cao Dezhong, Xiong Jun. Progress in correlated optics[J]. *Physics*, 2008, 37(4): 223-232.  
汪凯戈, 曹德忠, 熊俊. 关联光学新进展[J]. *物理*, 2008, 37(4): 223-232.
- 4 Tang Wenzhe, Cao Zhengwen, Shi Jianhong, *et al.*. Back-side correlation imaging with digital micro mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0511004.  
唐文哲, 曹正文, 石剑虹, 等. 基于数字微镜器件的“后视”关联成像[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0511004.
- 5 Li Dong, Cang Ji, Xia Xinxing, *et al.*. Investigation on back-modulation long distance three-dimensional imaging based on compressed sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0111002.  
李东, 仓吉, 夏新星, 等. 基于压缩感知的后调制远距离三维成像研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0111002.
- 6 Xiang Qing, Yang Kecheng, Yu Long, *et al.*. Reflective underwater ghost imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711002.  
项青, 杨克成, 于龙, 等. 反射式水下量子成像[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711002.
- 7 Gong W, Zhang P, Shen X, *et al.*. Ghost "pinhole" imaging in fraunhofer region[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(7): 071110.
- 8 Gong W, Han S. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(17): 1519-1522.
- 9 Erkmén B I. Computational ghost imaging for remote sensing[J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(5): 782-789.
- 10 Zhao C, Gong W, Chen M, *et al.*. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- 11 Chen M, Li E, Gong W, *et al.*. Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2): 83-85.
- 12 Gong W L, Zhao C Q, Jiao J, *et al.*. Three-dimensional ghost imaging lidar[J]. *arXiv preprint arXiv: 1301.5767*, 2013.
- 13 Hardy N D, Shapiro J H. Computational ghost imaging versus imaging laser radar for three-dimensional imaging[J]. *Physical Review A*, 2013, 87(2): 023820.
- 14 Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- 15 Bo Z, Gong W, Li E, *et al.*. Multiple-input ghost imaging via sparsity constraints with thermal light[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(10): 102501.
- 16 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711002.  
陆明海, 沈夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0711002.
- 17 Qin Jiexin, Liu Shichao, Huang Genghua, *et al.*. Research on the pseudo-thermal light made by liquid crystal spatial light modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0102008.  
秦洁心, 刘世超, 黄庚华, 等. 基于液晶光阀调制的赝热光源制备技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0102008.
- 18 Cheng J. Ghost imaging through turbulent atmosphere[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 7916-7921.
- 19 Zhang P, Gong W, Shen X, *et al.*. Correlated imaging through atmospheric turbulence[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033817.
- 20 Shi D, Fan C, Zhang P, *et al.*. Adaptive optical ghost imaging through atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 27992-27998.
- 21 Li H, Xiong J, Zeng G. Lensless ghost imaging for moving objects[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 127005.
- 22 Zhang Cong, Gong Wenlin, Han Shensheng. Ghost imaging for moving targets and its application in remote sensing[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1214003.  
张聪, 龚文林, 韩申生. 运动目标强度关联成像及在遥感探测中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214003.



- 23 Li X, Deng C, Chen M, *et al.*. Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 153-157.
- 24 Wu Nan, Gong Wenlin, Han Shensheng. Experimental research on pseudo-thermal light ghost imaging with random phase plate based on variable motion trail[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711005.  
吴楠, 龚文林, 韩申生. 基于运动轨迹可调式随机相位板的赝热光鬼成像实验研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711005.
- 25 Jiao Jia, Zhao Chengqiang, Cui Lijun, *et al.*. Research on the repeatable pseudo-thermal light based on random phase plate scanning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0911002.  
焦佳, 赵成强, 崔丽君, 等. 基于随机相位板扫描的可重复赝热光源研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0911002.
- 26 Gong W, Han S. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light[J]. *Physics Letters A*, 2010, 374(8): 1005-1008.
- 27 Gong W, Han S. The influence of axial correlation depth of light field on lensless ghost imaging[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(4): 675-678.
- 28 Shen X, Bai Y F, Qin T, *et al.*. Experimental investigation of quality of lensless ghost imaging with pseudo-thermal light [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(11): 3968-3971.