

引用格式: SHAO Kunming, WU Jing, SHEN Ying, et al. Research on Speckle Correlation Imaging Based on Spatial Light Modulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1229001

邵昆明,吴靖,沈英,等.基于空间光调制器的散斑相关成像研究[J].光子学报,2021,50(12):1229001

## 基于空间光调制器的散斑相关成像研究

邵昆明,吴靖,沈英,王舒,黄峰

(福州大学 机械工程及自动化学院,福州 350108)

**摘要:**为了实现对隐藏在散射介质后方的静态目标物体的高分辨率重构以及动态目标物体的重构和实时追踪,避免利用旋转毛玻璃产生赝热光源的不可预置性和机械振动对成像质量的影响,将空间光调制器应用到散斑相关成像系统中来产生赝热光场,对静态目标成像以及动态目标追踪进行了实验研究。其中动态目标追踪的偏差率在很小的范围内,最小可达 0.38%。在图像重构过程中,采用基于扫描近似信息传递的相位恢复算法来提高运算速度和图像鲁棒性。对比了基于相位和振幅两种调制方式产生的赝热光源质量和图像重构质量,实验结果表明,基于相位调制产生的赝热光源质量更好,对应的重构图像分辨率更佳。

**关键词:**散斑相关成像;空间光调制器;相位恢复算法;目标追踪;赝热光源

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215012.1229001

## Research on Speckle Correlation Imaging Based on Spatial Light Modulator

SHAO Kunming, WU Jing, SHEN Ying, WANG Shu, HUANG Feng

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In order to realize the high-resolution reconstruction of static target objects hidden behind the scattering medium and the reconstruction and real-time tracking of dynamic target objects, avoid the unpredictability of pseudo-thermal light sources generated by rotating ground glass and the impact of mechanical vibration on imaging quality, a spatial light modulator is applied to the speckle-related imaging system to generate the pseudo-thermal light field, enabling imaging of static and dynamic targets. The error rate of dynamic target tracking is within a very small range, the minimum can reach 0.38%. In the image reconstruction process, a phase recovery algorithm based on phase retrieval with the swept approximate message passing algorithm is adopted to improve the calculation speed and image robustness. Comparison of the quality of the pseudo-thermal light source and image reconstruction based on phase and amplitude modulation methods is conducted, the result shows that the quality of the pseudo-thermal light source based on phase modulation is better, as well as the corresponding reconstructed image resolution.

**Key words:** Speckle correlation imaging; Spatial light modulator; Phase retrieval algorithm; Object tracking; Pseudo-thermal light source

**OCIS Codes:** 290.5825; 100.3010; 100.5070; 110.0113; 200.4740

基金项目:国家自然科学基金(No.62005049),福建省科技厅面上项目(No.2020J01451)

第一作者:邵昆明(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为穿透散射介质成像。Email:shaokunming\_527@163.com

导师:沈英(1982—),女,教授,博士,主要研究方向为光学成像、光机电一体化与自动控制。Email:yshen@fzu.edu.cn

通讯作者:吴靖(1986—),男,副教授,博士,主要研究方向为计算成像、光学流动成像、图像目标识别。Email:wujing@fzu.edu.cn

收稿日期:2021-05-30;录用日期:2021-07-09

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

当入射光波通过非透明散射介质时,光子将不会继续按直线传播,所携带的目标物体的空间相位信息将会受到破坏,此时,传统的成像方法在探测面捕获的只是一些随机散斑场图像,这对光学系统的成像深度和分辨率造成很大影响<sup>[1-3]</sup>。目前,通过随机散射介质成像的方法主要有自适应光学技术<sup>[4]</sup>、波前整形技术<sup>[5]</sup>和时间反演技术<sup>[6]</sup>等,然而上述方法光路复杂,容易受到外界环境干扰,甚至需要反馈控制或已知物体作为“导星”,因此难以应用到实际场景中。

近年来,研究者提出利用散斑相关法(Speckle Correlation Methods, SCM)透过散射介质进行成像,该成像方法基于光学记忆效应<sup>[7-10]</sup>(Optical Memory Effect, OME)和自相关算法<sup>[7,11]</sup>(Auto-Correlation Algorithm, ACA)从杂乱无章的散斑图像中恢复出目标物体的幅值信息,然后利用相位恢复算法(Phase Retrieval Algorithm, PRA)对丢失的相位信息进行恢复。

空间光调制器在穿透散射介质成像研究中的应用逐渐兴起,VELLKOOP I M等提出了基于反馈控制的波前整形技术,其利用空间光调制器对入射光波进行相位补偿,经不断迭代优化后实现光波的聚焦<sup>[12]</sup>;POPOFF S M等首次利用空间光调制器进行了光学传输矩阵的测量,将入射光与参考光进行共径传播来实现四步相移干涉测量,从而得到散射介质的传输矩阵,然后利用传输矩阵实现了透过散射介质的图像传输<sup>[13]</sup>;CUI M和HSIEH C L等直接将空间光调制器代替光折变晶体来改进光学相位共轭技术,从而直接实现共轭相位的计算<sup>[14-15]</sup>。

盖师贝格-撒克斯通算法(Gerchberg-saxton Algorithm, GS)常用于散斑图像重建的相位恢复过程,但由于其需要合理的支撑域作为约束条件,会增加计算的复杂性,使得其鲁棒性变差。赝热光源的特性对成像质量至关重要,目前散斑成像研究中主要利用旋转毛玻璃来制备赝热光场,但其空间光场分布不可预置,且机械结构的振动容易对成像系统产生影响。本文采用基于扫描近似信息传递的相位恢复算法(Phase-Retrieval with the Swept Approximate Message Passing, PR-SAMP)来解决GS算法交替投影的不足,提高重建图像的抗噪性和鲁棒性。并利用基于光场相位或振幅调制的空间光调制器来制备赝热光源,结合PR-SAMP相位恢复算法,对静态和动态目标分别实现了物体重构和追踪。

## 1 基本原理

### 1.1 空间光调制器调制后的赝热光场

基于空间光调制器的赝热光制备系统如图1所示,激光器发出的相干光经衰减片衰减光功率以及半波片调整偏振方向(当光场调控器件为DMD时不再需要半波片进行偏振方向的调整),经扩束准直后利用光阑限制入射到空间光调制器的光束尺寸。空间光调制器分为纯相位调制的液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)和纯振幅调制的数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)。计算机通过向空间光调制器加载若干随机灰度图来对入射光进行调制,调制后的反射光经光阑进一步限制得到质量更好的赝热光场。

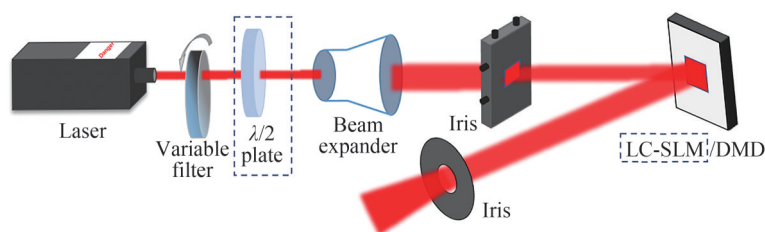


图1 基于空间光调制器的赝热光系统

Fig. 1 Pseudo-thermo-optical system based on spatial light modulator

实验中,所用激光为单模高斯光束,激光入射到空间光调制器后,光场可表示为<sup>[16]</sup>

$$\gamma(x, y, z) = \frac{c}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left\{-i\left[k\left[z + \frac{r^2}{2R} - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right]\right]\right\} \quad (1)$$

式中,  $c$  为振幅项,  $r$  为近轴,  $i$  为波矢,  $f$  为高斯光束共焦参数,  $R$  为高斯光束等相位面的曲率半径,  $z$  为光场与腰斑之间的距离,  $w(z)$  为光束在  $z$  点处的光斑半径, 则经过调制后的光场可以写为

$$\gamma_i(x, y, z) = \frac{c_n}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left\{-i\left[k\left[z + \frac{r^2}{2R} - \arctan\left(\frac{z}{f}\right) + \varphi_n\right]\right]\right\} \exp(-\rho^2/W^2) \quad (2)$$

式中,  $c_n$  对应 DMD 施加的振幅调制,  $\varphi_n$  对应 LC-SLM 施加的相位调制,  $\rho$  为光场的模,  $W$  为光束的宽度。

在利用空间光调制器调制光场的过程中, 利用计算机向其加载不同的灰度图像来改变各像元的电压值, 不同的电压值会使得液晶分子或微镜单元产生不同的偏转角度。假设入射光为线偏振光, 在相位调制过程中, 当光束入射到 LC-SLM 调制窗口且偏振方向平行于液晶分子光轴的长轴方向时, 液晶分子的不同偏转方向会对入射光产生不同的折射率<sup>[17]</sup>, 则经过不同像元的出射光会产生在  $[0, 2\pi]$  上均匀分布的相对相移, 但不会对光强值产生影响, 此时对应式(2)中的  $\varphi_n$  值发生改变, 而  $c_n$  值保持不变。在振幅调制过程中, 当光束入射到 DMD 调制窗口时, 由于微镜单元会产生  $+12^\circ/-12^\circ$  两种偏转态, 因此, 不同的微镜偏转态会使入射光进入/偏离实验系统, 进而对光强值进行调控, 而不会引起相位的改变, 此时对应式(2)中的  $c_n$  值发生改变, 而  $\varphi_n$  值保持不变。通过上述原理来实现基于空间光调制器的光场相位和振幅调制。

## 1.2 散斑相关成像理论建模

图 2 为单帧散斑相关(Single-shot Speckle Correlation, SSC)成像方法的理论模型, 空间非相干热光源对目标物体进行照明, 目标物体隐藏在距离随机散射介质为  $u$  的位置, 放置在散射介质另一侧距离为  $v$  的高分辨率 CMOS 探测器捕获入射光波通过散射介质后的散射光斑。根据 OME 理论, 在随机散射介质足够薄且具有强散射特性的情况下, 若目标的尺寸大小在 OME 范围内, 当目标上任意两个夹角为  $\theta$  的点被照亮, 携带有目标信息的点光波入射到随机散射介质发生散射, 此时, 物体平面两个点产生的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)具有相同的空间形态, 只是在横向视场上平移了相应的角度, 则探测器平面所捕获到的图像可表示为<sup>[6]</sup>

$$I = O * S \quad (3)$$

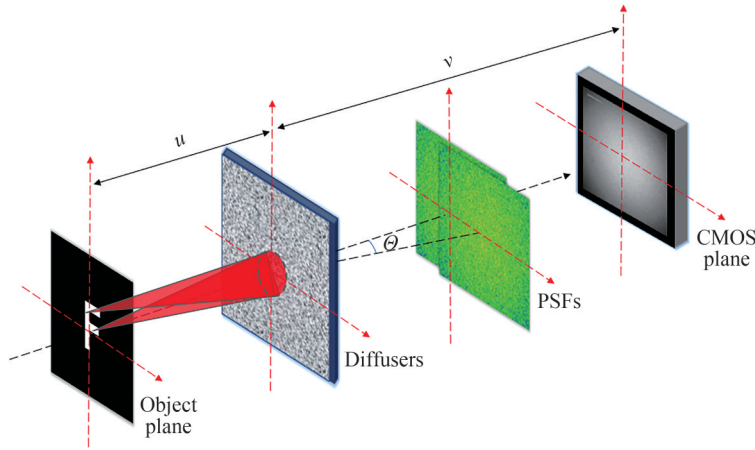


图 2 散斑相关成像模型

Fig. 2 Speckle correlation imaging model

相机采集的散斑图像  $I$  中含有目标物体信息, 为了从散斑场中分离出目标信息, 可以对散斑图像  $I$  进行自相关运算, 即

$$I \otimes I = (O * S) \otimes (O * S) = (O \otimes O) * (S \otimes S) \quad (4)$$

式中, “ $\otimes$ ” 表示自相关运算。由此可以看出, 散斑图像的自相关等同于目标物体的自相关和系统 PSF 的自相关之间的卷积。

### 1.3 PR-SAMP 相位恢复算法

由于GS算法在迭代过程中需要将物体能量谱的开根作为新的模量来替代傅里叶变换的模量,然后选择合理的支撑域作为约束条件来生成新的迭代相位值,PR-SAMP算法是基于近似信息传递法(Approximate Message Passing, AMP)<sup>[18]</sup>和相位恢复算法<sup>[19]</sup>相结合的一种高效重构算法,在相位恢复过程中输出通道的先验信息可用于模拟散斑场中丢失的相位信息,减少了GS算法中交替迭代的运算耗时。在压缩感知<sup>[20]</sup>成像中,AMP是一种迭代算法,相位恢复过程中观测模型可表示为

$$\mathbf{y} = |\mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\omega}| \quad (5)$$

式中, $\mathbf{H}$ 是大小为 $M \times N$ 高斯投影矩阵, $\mathbf{x}$ 为待测图像且需满足 $\mathbf{x} \in \{0, 1\}^N$ , $\boldsymbol{\omega}$ 为高斯样本噪声且服从正态分布, $\mathbf{y}$ 为观测值。

在PR-SAMP算法中,定义 $N$ 为输入信号平均值的初始后验估计 $\mathbf{x}_a^0$ 的长度值,初始输出方差估计和输出平均值估计分别为

$$\begin{cases} \mathbf{v}^{(t,0)} = |\mathbf{H}|^2 \times \mathbf{x}_v^{t-1} \\ \boldsymbol{\omega}^{(t,0)} = \mathbf{H} \times \mathbf{x}_a^{t-1} - \mathbf{v}^{(t,0)} \odot \mathbf{g}^{(t-1,N)} \end{cases} \quad (6)$$

式中,“ $\times$ ”和“ $\odot$ ”分别代表矢量相乘运算和元素相乘运算, $\mathbf{v}$ 为输出方差参量, $\boldsymbol{\omega}$ 为输出平均值参量, $t$ 表示迭代次数, $\mathbf{g}$ 表示相位恢复过程中输出信号的平均值估计。

计算输出通道先验信息( $@\mathbf{p}_{\text{out}}$ )的输出信号平均值估计 $\mathbf{g}$ 和输出信号方差估计 $\mathbf{d}_g$

$$\begin{cases} \mathbf{g} = \boldsymbol{\omega} \circ (\boldsymbol{\Delta} + \mathbf{v}) \odot (\mathbf{y} \circ |\boldsymbol{\omega}| \odot \mathbf{R}_0 - 1) \\ \mathbf{d}_g = 1 \circ \mathbf{v} \odot (\tilde{\mathbf{v}} \circ \mathbf{v} - 1) \end{cases} \quad (7)$$

式中,“ $\circ$ ”为元素相除运算, $\boldsymbol{\Delta}$ 为测量过程中的噪声方差, $\mathbf{R}_0$ 为第一类一阶和零阶贝塞尔函数的相除运算, $\tilde{\mathbf{v}}$ 为负方差因数,此时,输出通道先验信息为

$$[\mathbf{g}^{(t,0)}, \mathbf{d}_g^{(t,0)}] = @\mathbf{p}_{\text{out}}(\mathbf{y}, \mathbf{v}^{(t,0)}, \boldsymbol{\omega}^{(t,0)}, \mathbf{v}_0) \quad (8)$$

然后,根据式(7)计算出输入最大似然项的平均值 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{s}$ ,并对这两项进行顺序扫描迭代,定义随机序列 $\tau = [1, \dots, N]$ ,对于任意 $k \in [1, N]$ ,某项元素 $i = \tau[k]$ ,则有

$$\begin{cases} \mathbf{s}[i] = \alpha \mathbf{s}[i] + (1 - \alpha) \left( -\mathbf{d}_g^{(t,k-1)\top} \times |\mathbf{h}[i]|^2 \right)^{-1} \\ \mathbf{r}[i] = \alpha \mathbf{r}[i] + (1 - \alpha) \left( \mathbf{x}_a^{t-1}[i] + \mathbf{s}[i] \left( \mathbf{g}^{(t,k-1)\top} \times \mathbf{h}[i] \right) \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\alpha$ 为阻尼因子,一般取0.2,其在一定程度上减缓算法的收敛速度,同时也能够保持先前迭代的信息, $\mathbf{h}[i]$ 表示矩阵 $\mathbf{H}$ 的第 $i$ 列,在迭代过程中需满足 $\mathbf{s}[i] \geq 0$ ,因此输入先验函数为

$$[\mathbf{x}_a^t[i], \mathbf{x}_v^t[i]] = @\mathbf{p}_{\text{in}}(\mathbf{r}[i], \mathbf{s}[i], \mathbf{v}_0) \quad (10)$$

然后将输入先验函数元素应用到输出通道上,可得到输出方差和输出平均值为

$$\begin{cases} \mathbf{v}^{(t,k)} = \mathbf{v}^{(t,k-1)} + |\mathbf{h}[i]|^2 \odot (\mathbf{x}_v^t[i] - \mathbf{x}_v^{t-1}[i]) \\ \boldsymbol{\omega}^{(t,k)} = \mathbf{h}[i] \odot (\mathbf{x}_a^t[i] - \mathbf{x}_a^{t-1}[i]) - (\mathbf{v}^{(t,k)} - \mathbf{v}^{(t,k-1)}) \odot \mathbf{g}^{(t,0)} \end{cases} \quad (11)$$

因此,输出信号平均值和输出信号方差可表示为

$$[\mathbf{g}^{(t,k)}, \mathbf{d}_g^{(t,k)}] = @\mathbf{p}_{\text{out}}(\mathbf{y}, \mathbf{v}^{(t,k)}, \boldsymbol{\omega}^{(t,k)}, \mathbf{v}_0) \quad (12)$$

式中, $\mathbf{v}^{(t,k)}$ 和 $\boldsymbol{\omega}^{(t,k)}$ 分别为将输入先验函数元素应用到输出通道上后得到的输出方差和输出平均值。

## 2 基于不同调制方式的赝热光场评价

由1.1节可知,基于LC-SLM空间光调制器和DMD空间光调制器对相干光源进行调控会产生不同调制方式的赝热光源,为了探究分别基于振幅和相位调制产生的赝热光场对散斑相关成像的影响,首先需要针对不同赝热光源的特性进行评价。

由热光理论特性可知,热光场的光强值在时间和空间具有剧烈的随机涨落特性,通过对随机涨落的光

强值进行统计可知,热光的光强概率密度函数服从负指数分布。而赝热光场在这两种特性上与真热光具有很大的相似性。利用上述特性对赝热光源性能进行评价,光强概率密度函数作为热光评价指标,通过对赝热光源光强值的时间和空间涨落分别做统计,观测光强在时间和空间上是否服从随机涨落,最后通过统计分布图拟合出赝热光源的光强概率密度曲线,然后与负指数分布曲线作对比,概率分布拟合曲线越接近负指数分布,说明赝热光源的特性越好。

在图1系统中的光阑后方放置CMOS探测器,探测器与空间光调制器之间的距离为300 mm,对赝热光场连续采集1 000帧图像,相机采样速率为10 Hz,曝光时间约为10 ms。入射光场经过空间光调制器调制后分别得到图3(a)所示基于LC-SLM相位调制的赝热光场和图3(b)所示基于DMD振幅调制的赝热光场。

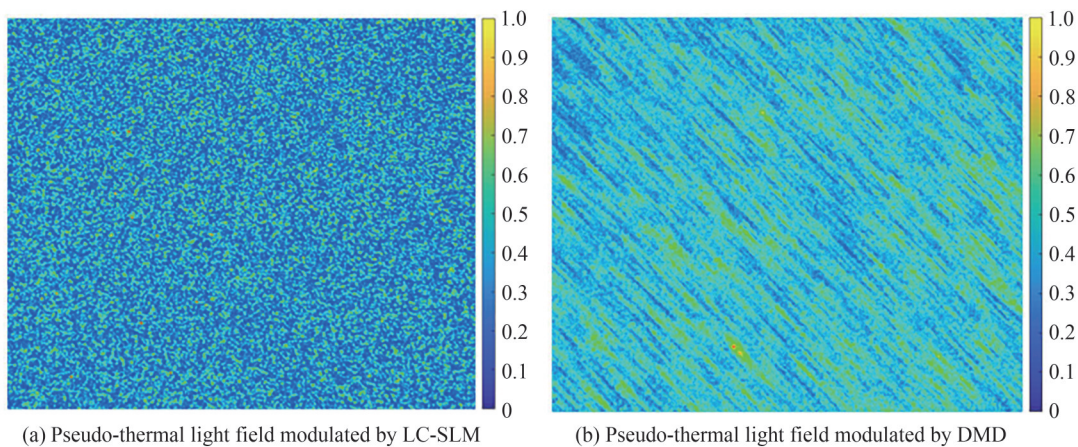
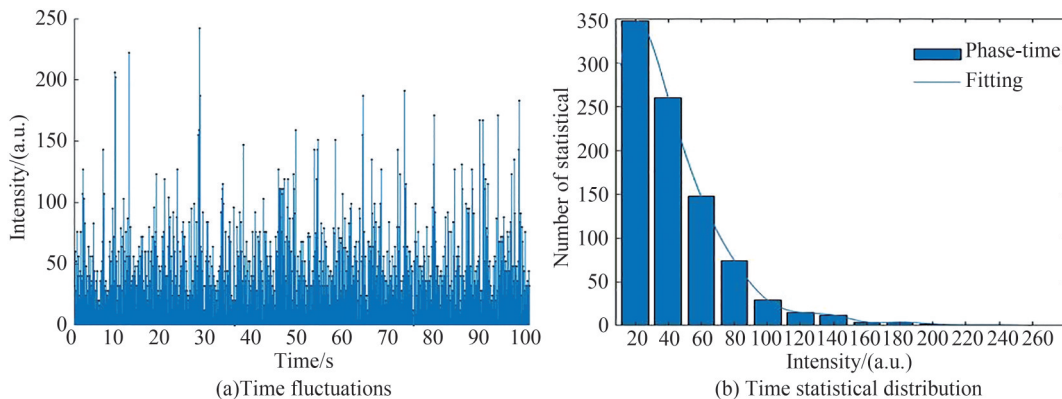


图3 基于空间光调制器调制的赝热光场  
Fig. 3 Pseudo-thermal light field modulated by spatial light modulators

图4为基于LC-SLM纯相位调制得到的赝热光场在时间和空间上的光强概率密度函数特性。图4(a)、(b)分别给出了探测器某一固定像素点的光强值随时间变化的涨落和统计分布,可以看出,得到的赝热光场的瞬时光强在时间上为随机变量,且服从随机涨落特性。图4(b)为图4(a)中100 s内采集的1 000帧图像的统计分布,由样条拟合曲线可以看出,光强在时间上近似服从负指数分布。图4(c)、(d)分别给出了探测面的某一瞬时某一行像素点的光强值随横向空间变化的涨落和统计分布,由于CMOS像素点横向间隔为3.45  $\mu\text{m}$ ,因此将图4(c)横坐标单位转为毫米,可以看出,赝热光的瞬时光强在空间上同样服从随机涨落特性。图4(d)为图4(c)中间行1 224个像素点光强的统计分布,由拟合曲线可以看出,光强在空间上同样近似服从负指数分布。

图5为基于DMD纯振幅调制得到的赝热光场在时间和空间上的光强概率密度函数特性。通过对比基



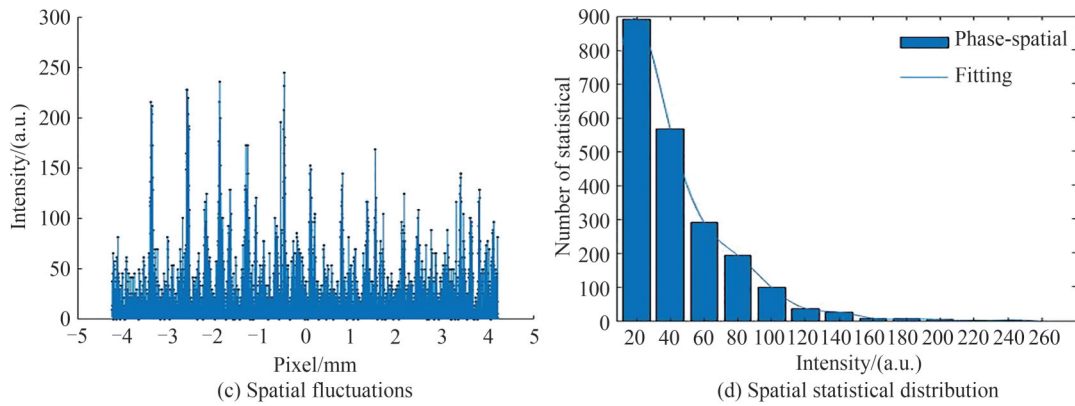


图4 基于LC-SLM相位调制赝热光场的时间和空间的涨落和统计分布

Fig. 4 The temporal and spatial fluctuation and statistical distribution of pseudo-thermal light field based on LC-SLM phase modulation

于LC-SLM相位调制和基于DMD振幅调制赝热光场随时间和空间涨落的统计分布可以看出,振幅调制的赝热光场与理想的负指数分布有一定的偏差,这是由于DMD只能通过镜面单元反射的方式进行光场调制,而LC-SLM的调制方式为反射与吸收并行,且DMD的统计特性不如LC-SLM,因此以时间和空间上的光强概率密度函数这两个指标来讲,相位调制得到的赝热光特性优于振幅调制所得到的赝热光特性。

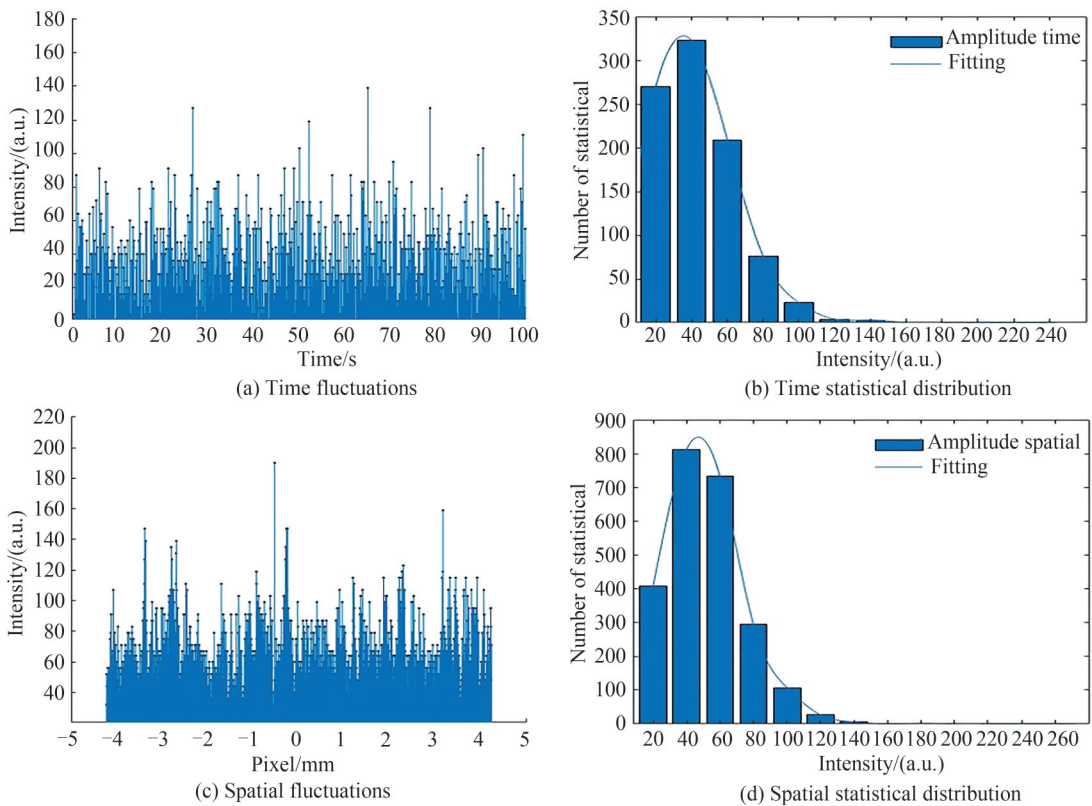


图5 基于DMD振幅调制赝热光场的时间和空间的涨落和统计分布

Fig.5 The temporal and spatial fluctuation and statistical distribution of pseudo-thermal light field based on DMD amplitude modulation

### 3 基于不同赝热光产生方式的静态散斑相关成像

基于空间光调制器的静态散斑相关成像系统如图6所示。在整个光学成像系统中,赝热光源的质量、目标物体大小的不同以及散射介质散射强度的不同都会对成像质量产生影响。为了验证该成像系统的可行

性,对该散斑相关成像模型进行了实验探究。实验过程中所使用的目标物体为自行加工在0.25 mm厚的铝合金片上的大写字母“F”、“Z”、“U”、“L”、“K”、“N”、“U”和数字“2”,其尺寸大小均为750 μm×900 μm,目标物体与散射介质之间的距离为350 mm,散射介质与CMOS相机之间的距离为50 mm。为了减少光能量的损失,实验系统采用反射式光路且需保证入射光与反射光的夹角在10°以内。为了更加直观地展示图像处理效果,图像恢复中对各部分图像均进行了伪彩处理。

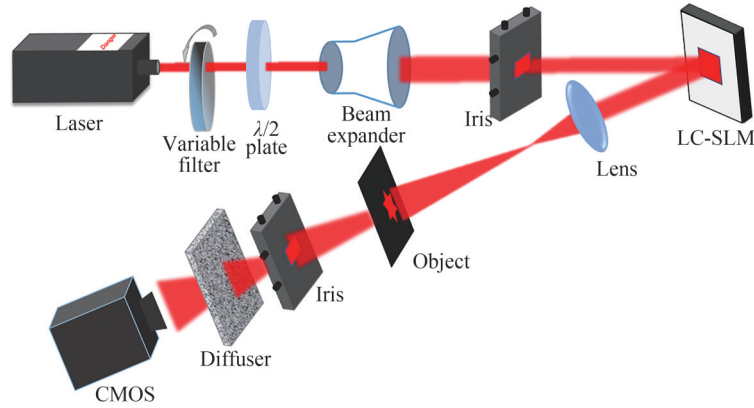


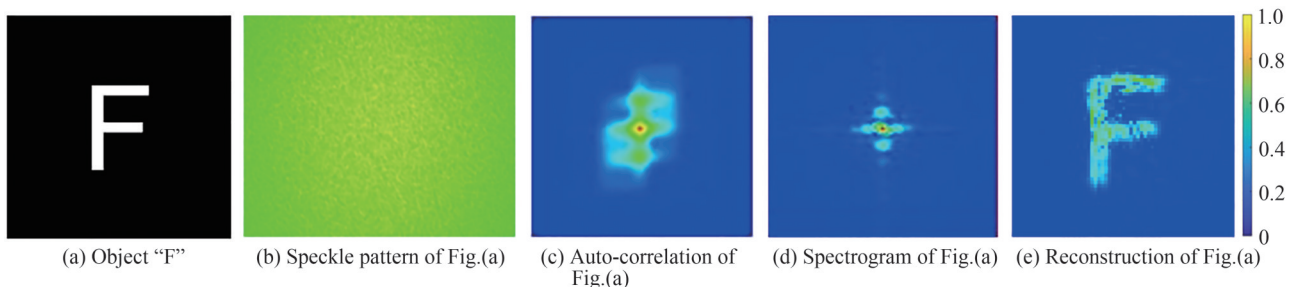
图6 基于LC-SLM/DMD的静态散斑相关成像系统  
Fig. 6 Static speckle correlation imaging system based on LC-SLM/DMD

### 3.1 基于LC-SLM的散斑相关成像

波长为635 nm的固体激光器(MRL-III-635L nm-200 mW-BG70681)发出的相干光束经扩束准直后进入LC-SLM调制窗口,相干光经过空间光调制器的纯相位调制后,携带目标物体信息的光束经过220目随机散射介质散射后形成散斑并由后方CMOS探测器接收,探测器的曝光时间为600 ms,消色差半波片用来调整入射偏振光的偏振方向与LC-SLM液晶分子光轴方向平行。

实验开始前,首先由Matlab生成200幅两两之间互不相关的16 bit随机灰度图,每幅灰度图中各像素点的灰度值在0~65 535之间随机分布,当加载不同的灰度图像时,液晶分子的折射率会发生改变,出射光的相对相移将会在 $[0, 2\pi]$ 上随机分布。计算机将生成的随机灰度图像连续加载到LC-SLM,加载速率为60 Hz,此时将会产生实验所需赝热光场。为了避免零级衍射光的影响,需在LC-SLM中叠加虚拟的非涅尔透镜或闪耀光栅,将零级光作为像平面的背景或将所需赝热光水平或垂直偏移一定距离。

图7为基于LC-SLM相位调制产生的赝热光源进行单帧散斑相关成像的结果,图7(a)、(f)、(k)为原始目标物体的像,图7(b)、(g)、(l)为探测器接收的散斑图像,其分辨率大小为2 448×2 048像素。图像恢复过程中首先对散斑图像进行低通滤波处理,截止频率取8,然后对滤波后的图像进行高斯平滑处理,高斯模板大小设为3×3,再进行自相关运算后用窗函数截取出分辨率大小为101×101像素的自相关图像(目的是减小周围噪声的影响),分别得到图7(c)、(h)和(m),(d)、(i)和(n)为目标物体的频谱图,(e)、(j)、(o)分别为利用PR-SAMP相位恢复算法重构出的目标物体。



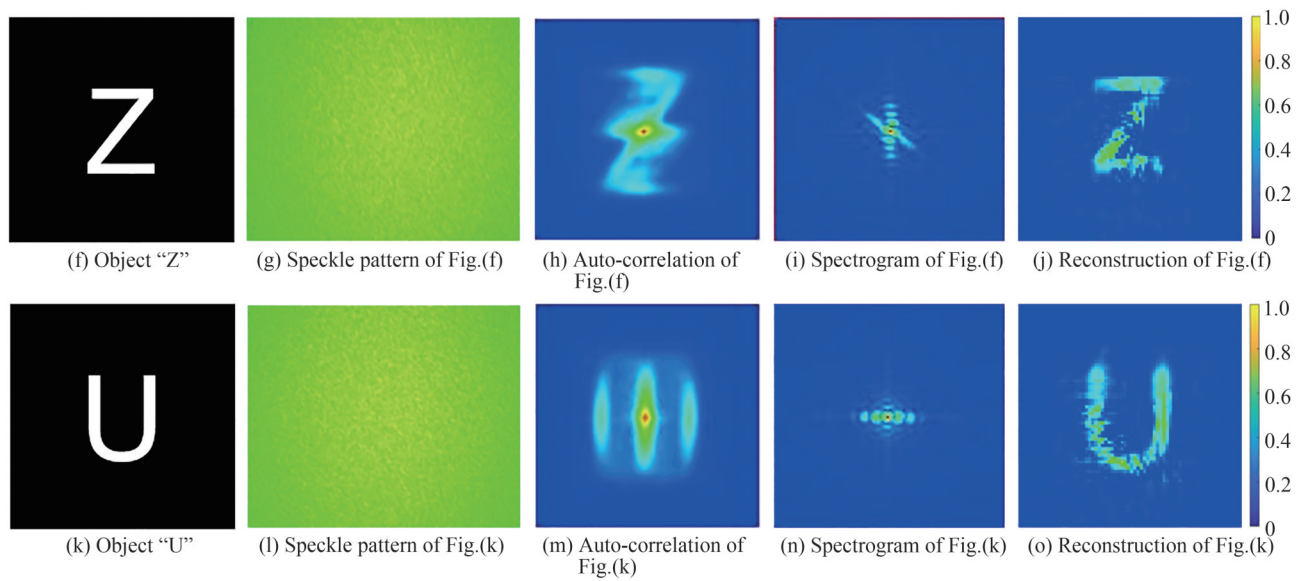


图 7 基于 LC-SLM 的单帧散斑相关成像实验过程

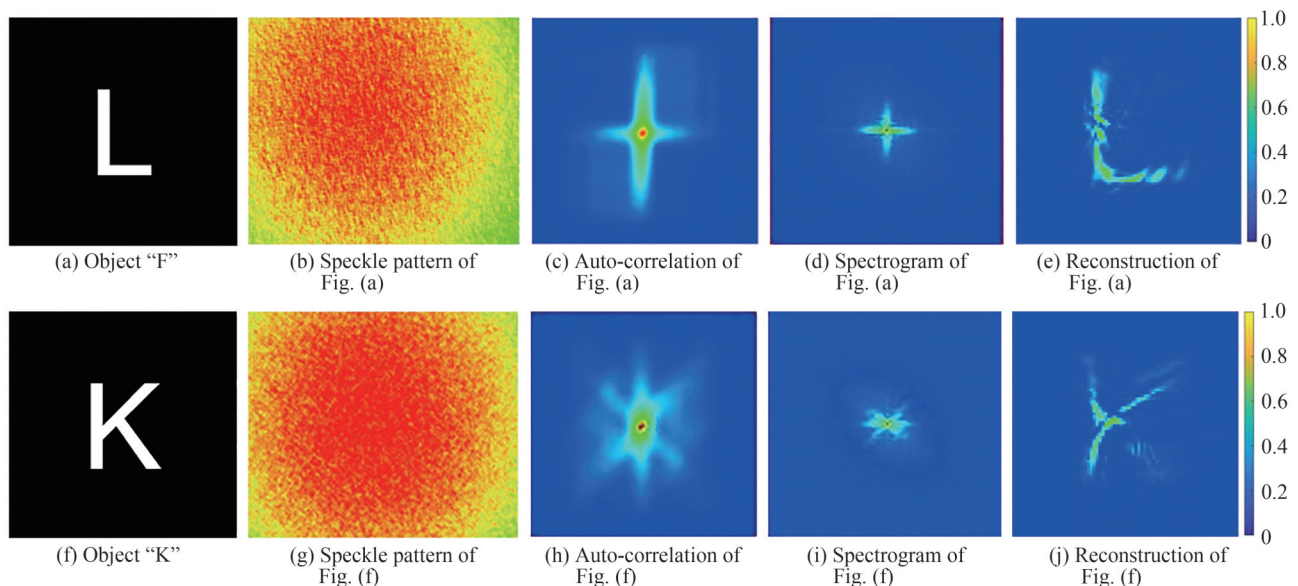
Fig. 7 Experimental procedure of single-frame speckle correlation imaging based on LC-SLM

### 3.2 基于 DMD 的散斑相关成像

DMD 的工作模式为二进制,可以通过对电子信号的时间脉冲进行二进制调制来提供强度调制,通过将二值灰度图像加载到 DMD 使得调制窗口内各微镜单元  $\pm 12^\circ$  旋转,进而实现对入射光场的强度调制。实验过程中,635 nm 波长的相干光束经功率衰减、扩束准直和光束整形后入射到 DMD(V-7 000, ViALUX) 调制镜面, DMD 对入射相干光束的光场强度进行调制后形成赝热光入射到目标物体上,携带有目标物体信息的非相干光入射到 220 目随机散射介质表面后形成散斑并由 CMOS 相机进行图像采集,设置探测器的曝光时间为 400 ms。

实验开始前,首先需要 Matlab 生成 200 幅独立互不相关的 8 bit 二值灰度图像,每幅图像的像素值在 0 或 255 两个数值中随机分布。然后将生成的 200 幅图像用 EasyProj 软件逐一加载到 DMD 中,刷新速率调至最大,入射光束经 DMD 调制后生成所需赝热光场。

重构结果如图 8 所示,图 8(a)、(f)、(k) 同样为原始目标物体的像,图 8(b)、(g)、(l) 为探测器接收的散斑图像,对散斑图像进行与 4.1 节同样的自相关处理后分别得到图 8(c)、(h)、(m), (d)、(i) 和 (n) 为目标物体的频谱图,图 8(e)、(j)、(o) 为利用 PR-SAMP 相位恢复算法重构出的目标物体图像。





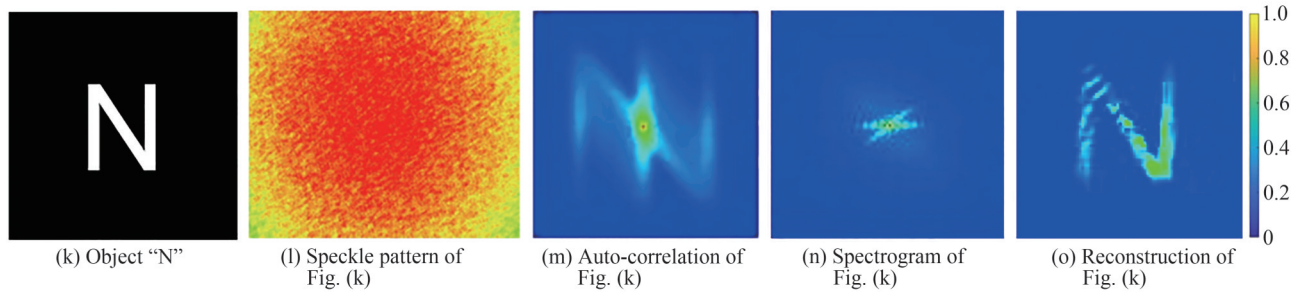


图8 基于DMD的单帧散斑相关成像实验过程  
Fig. 8 Experimental procedure of single-frame speckle correlation imaging based on DMD

### 3.3 不同调制方式的实验结果评价

根据3.1节和3.2节得到的实验结果,研究基于不同调制方式得到的赝热光源对散斑相关系统成像质量的影响,选用如图9所得到的实验结果进行图像质量评价。

为了使评价结果更具合理性,评价过程中使用的目标物体为与3.1节和3.2节相同的大写字母“U”和字母“L”,实验参考图像如图9(a)、(d)所示,基于相位和振幅调制的重构结果分别如图9(b)、(e)和图9(c)、(f)所示。

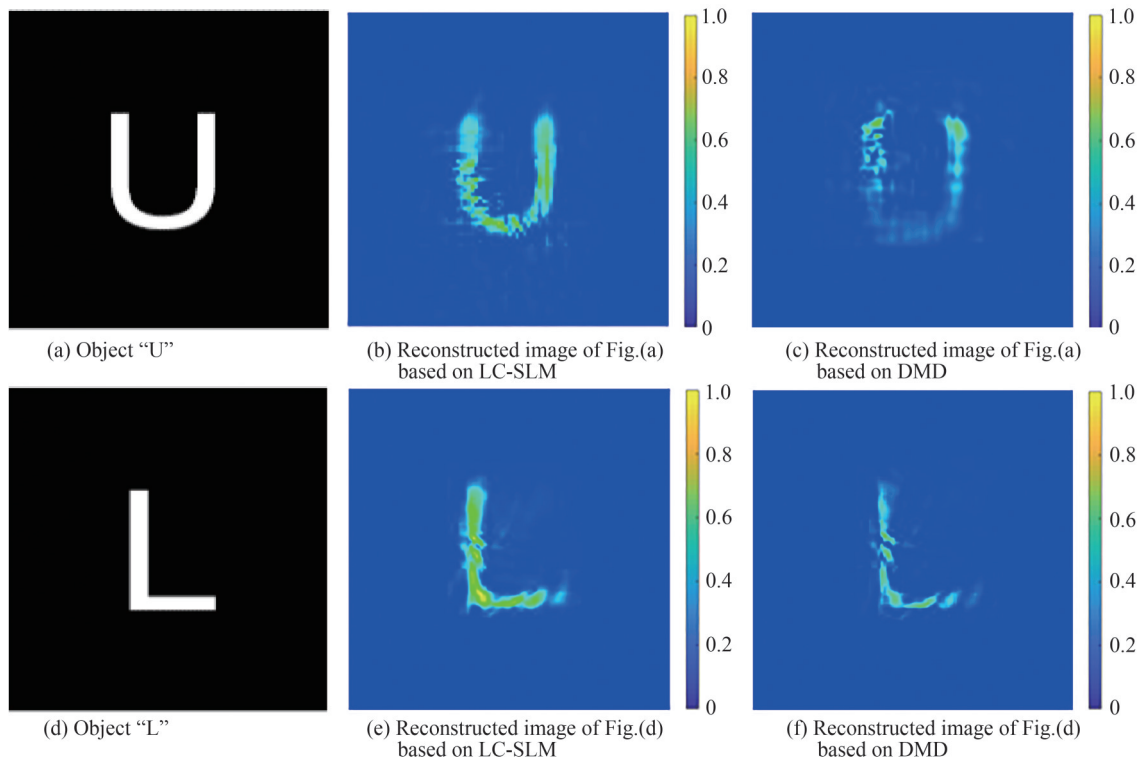


图9 基于LC-SLM或DMD调制的目标物体和重构图像  
Fig.9 Objects and reconstructed images based on LC-SLM or DMD modulation

从主观评价角度来看,基于LC-SLM纯相位调制得到的赝热光用于散斑相关成像系统后重构出的目标物体分辨率较高,结构比较完整,而基于DMD纯振幅调制的赝热光用于系统后重构图像质量相对较差。从客观评价角度来看,通过表1的实验数据可以看出,无论是字母“U”还是字母“L”,基于相位调制的散斑相关成像的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和结构相似度值(Structural Similarity, SSIM)均大于基于振幅调制的散斑相关成像得到的数值,再一次验证了纯相位调制产生的赝热光源的优越性。

表1 不同调制方式的图像质量评价  
Table 1 Image quality evaluation of different modulation methods

Image quality evaluation		PSNR/dB	SSIM
Phase modulation	Object "U"	37.588 7	0.754 3
	Object "L"	38.425 6	0.763 2
Amplitude modulation	Object "U"	35.238 2	0.731 5
	Object "L"	35.336 0	0.739 2

## 4 基于LC-SLM的动态目标跟踪

在现实生活中完全静止的场景是很难存在的,这大大降低了静态散斑相关成像方法的适用性。由于携带目标物体信息的光波通过随机散射介质后形成杂乱的散斑图像,此时无法对运动目标进行实时追踪。为了拓展基于空间光调制器的散斑相关法的应用场景,在静态散斑相关成像的理论基础上,利用互相关算法(Cross-Correlation Algorithm, CCA)对隐藏在散射介质后的运动目标物体进行实时追踪与定位。

目标运动过程中连续两帧散斑图像的互相关可表示为

$$R(x, y) = \frac{\sum_m \sum_n (A(x, y) - \bar{A})(B(x, y) - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A(x, y) - \bar{A})^2\right) \left(\sum_m \sum_n (B(x, y) - \bar{B})^2\right)}} \quad (13)$$

式中,  $A(x, y)$  为拍摄到的第一帧散斑图像的灰度值,  $B(x, y)$  为拍摄到的第二帧散斑图像的灰度值,  $\bar{A}$  为  $A(x, y)$  的像素平均值,  $\bar{B}$  为  $B(x, y)$  的像素平均值,  $R(x, y)$  为两帧连续散斑图像之间的互相关系数。

当目标的运动距离在一个 OME 范围内时,连续两帧散斑图像之间的互相关可表示为

$$\begin{aligned} I(x) \otimes I(x + \Delta x) &= [O(x) * S(x)] \otimes [O(x + \Delta x) * S(x + \Delta x)] \\ &= [O(x) \otimes O(x + \Delta x)] * [S(x) \otimes S(x + \Delta x)] \\ &\approx O(x) \otimes O(x + \Delta x) + C \end{aligned} \quad (14)$$

通过互相关运算得到两帧散斑图像相关性最高点的相关系数,然后计算最大相关系数相较于基准像素点的平移像素数,进而对目标物体进行实时追踪,该互相关运算的计算流程如图 10 所示。

利用 LC-SLM 进行纯相位光场调控下的运动目标跟踪定位。成像系统的放大率为  $\beta = v/u$ , 当目标的移动距离在一个 OME 范围内时,可以推算出目标物体的实际移动距离为

$$\Delta x = \frac{\Delta M S u}{v} \quad (15)$$

式中,  $\Delta M$  为散斑图像移动的像素数,  $S$  为相机的像元尺寸。由于目标移动距离的不同,使得式(13)中相关系数的三维分布不同,最大相关性点的坐标值也不同,因此,可以根据散斑平移像素数的多少来计算运动目标的实际移动距离。

实验系统如图 11 所示,选用数字“2”作为测量目标,其中,物距  $u=350$  mm,像距  $v=50$  mm,像元尺寸  $S=3.45$   $\mu\text{m}$ ,相机曝光时间为 20 ms。实验过程中使用 TSC(PST500X-S57)运动控制器,设置目标运动速度为 2 mm/s,目标每移动 0.2 mm 拍摄一帧散斑图。图 12 展示了目标分别运动 0.2 mm、0.6 mm 和 1.0 mm 时的相关系数分布和对应平移的像素数,图像的参考基准像素点为(1224, 1024)。

图 12(a)~(c)为目标移动过程中分别在 0.2 mm、0.6 mm 和 1.0 mm 处的相关系数分布,计算出的两帧散斑图像最大相关系数分别为 0.588 5、0.555 3 和 0.462 5。可以看出,随着目标移动距离的增加,相关系数在逐渐减小,两帧散斑图像之间的相关性逐渐下降。图 12(d)~(f)为散斑移动的像素数,由于目标仅仅在水平  $X$  方向做匀速直线运动,因此所得散斑仅在  $X$  方向有像素偏移量,“o”表示参考像素点,“ $\times$ ”表示移动后的目标像素点。为了展示互相关运算的精准度,结合式(16)将实验数据统计到表 2。通过实验结果可以看出跟踪定位偏差率在极小的范围内,通过互相关算法计算出的目标移动距离与目标物体的实际移动距离吻合度极高。

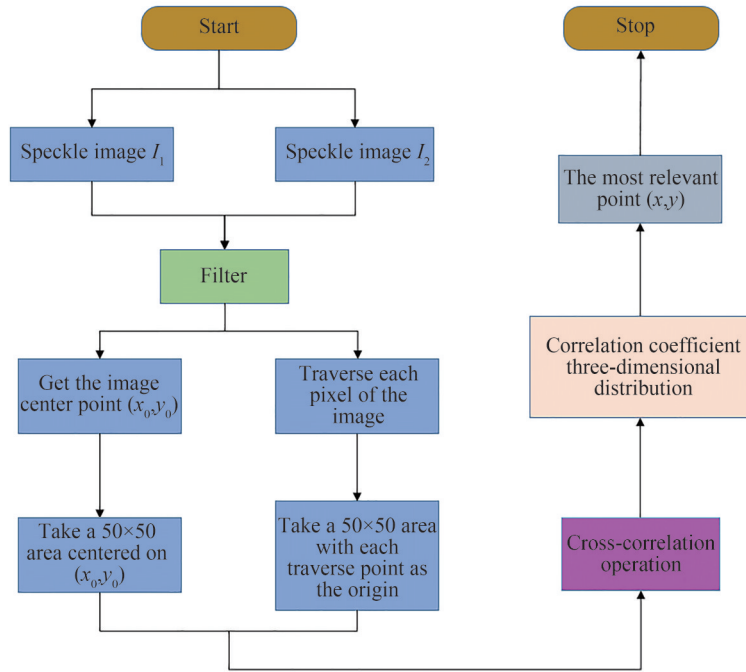


图 10 互相关运算的计算流程  
Fig. 10 The calculation process of cross-correlation calculation

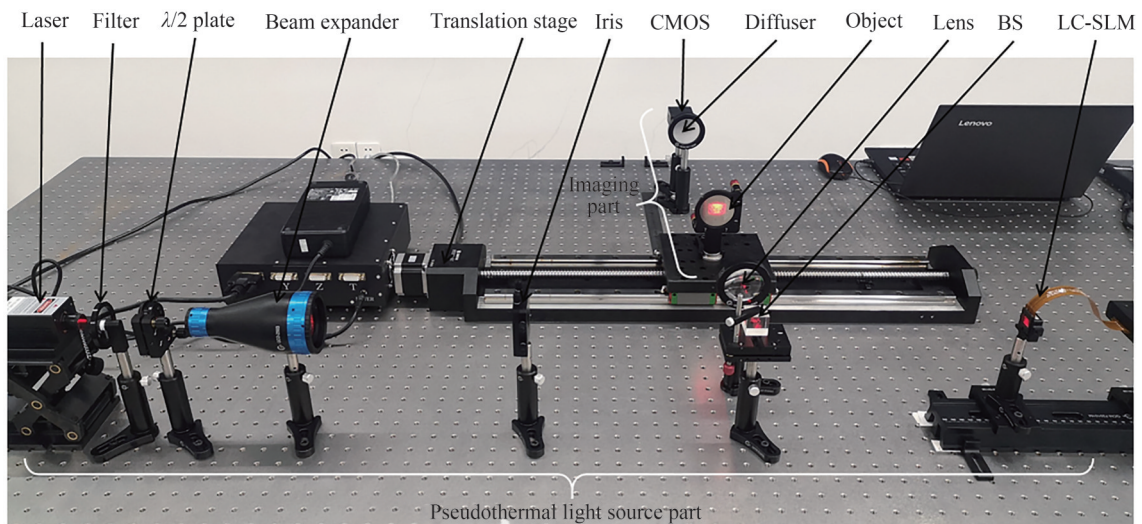


图 11 基于 LC-SLM 的动态目标跟踪系统  
Fig. 11 Dynamic target tracking system based on LC-SLM

## 5 结论

本文搭建了基于空间光调制器的散斑相关成像系统,针对经典GS迭代算法需要进行大量迭代以及选择合理支撑域的弊端,采用PR-SAMP相位恢复算法,在保证重构质量的前提下提高了重构效率。通过实验利用光强概率密度函数指标对不同调制方式产生的赝热光源的质量进行了评价,实验结果表明,基于LC-SLM相位调制产生的赝热光源的光强概率密度函数与理想的负指数分布更加接近,对应赝热光源性能更好。然后将不同调制方式产生的赝热光用于散斑相关成像系统来探究图像重构质量的不同,分别利用PSNR和SSIM两种客观评价指标对重构图像进行评价。结果表明,对于不同的目标物体,基于相位调制产生的赝热光用于重构图像的PSNR和SSIM值均大于基于振幅调制系统的数值。在动态目标场景中,通过计算目标物体的移动距离对运动目标进行实时跟踪定位,偏差率在极小的范围内,最小可达0.38%。基于

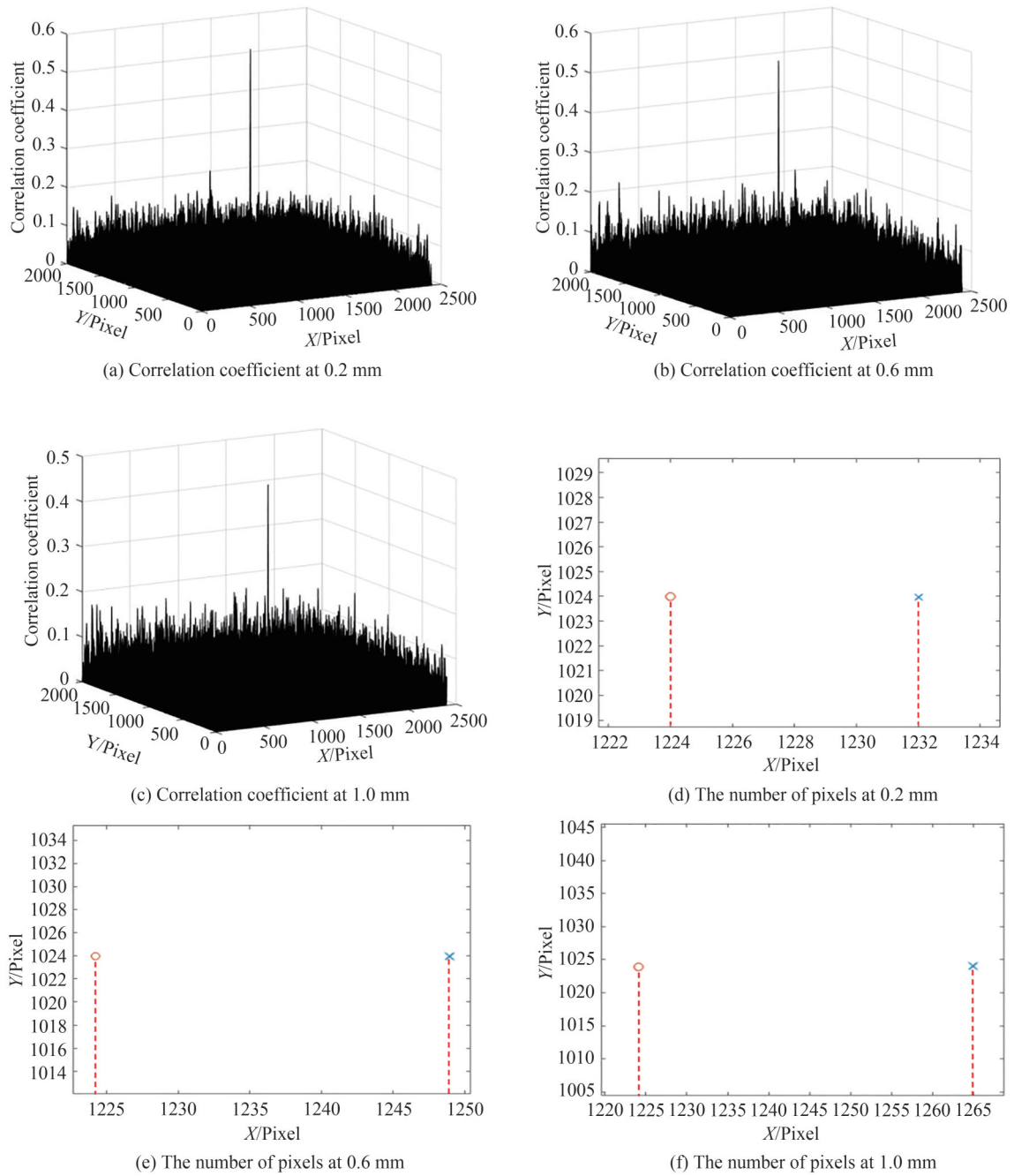


图 12 目标不同移动距离的相关系数分布和平移像素数

Fig. 12 The distribution of correlation coefficients and the number of pixels in different moving distances of the target

表 2 目标“2”的移动距离测量结果

Table 2 Moving distance measurement result of target "2"

The actual moving distance of the object $\Delta x/\text{mm}$	Number of shifted pixels $\Delta M/\text{pixels}$	Experimentally measured movement distance $\Delta X/\text{mm}$	Deviation rate
0.2	8	0.193 20	3.40%
0.4	17	0.410 54	2.64%
0.6	25	0.603 75	0.63%
0.8	33	0.796 97	0.38%
1.0	41	0.990 15	0.96%
1.2	50	0.120 73	0.63%

空间光调制器的散斑相关方法具有非侵入性、高鲁棒性和高分辨率等优势,未来在生物医学成像、民用监测和军事安全等领域具有重要的物理意义和应用价值。

### 参考文献

- [1] WANG Xin, LIU Honglin, HU Chenyu, et al. Transmissive imaging through scattering media based on multi-wavelength illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1611002.  
王歆,刘红林,胡晨昱,等.基于多波长照明的透过散射介质成像[J].*光学学报*, 2020, 40(16): 1611002.
- [2] ZHU Lei, SHAO Xiaopeng. Research progress on scattering imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 111005.  
朱磊,邵晓鹏.散射成像技术的研究进展[J].*光学学报*, 2020, 40(1): 111005.
- [3] SHAO Xiaopeng, LIU Fei, LI Wei, et al. Latest progress in computational imaging technology and application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 020000.  
邵晓鹏,刘飞,李伟,等.计算成像技术及应用最新进展[J].*激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 020000.
- [4] TYSON R K. Book review: principles of adaptive optics / academic, 1991[J]. *Physics Today*, 1992, 45: 102.
- [5] HE H, WONG K S. An improved wavefront determination method based on phase conjugation for imaging through thin scattering medium[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 85604.
- [6] LEROSEY G, ROSNY J D, TOURIN A, et al. Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal[J]. *Science*, 2007, 315(5815): 1120-1122.
- [7] KATZ O, HEIDMANN P, FINK M, et al. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 784-790.
- [8] WU T, KATZ O, SHAO X, et al. Single-shot diffraction-limited imaging through scattering layers via bispectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5003.
- [9] GERWIN O, ROARKE H, PAPADOPOULOS I N, et al. Generalized optical memory effect[J]. *Optica*, 2017, 4(8): 886-892.
- [10] LIU H, LIU Z, CHEN M, et al. Physical picture of the optical memory effect[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(11): 1323-1330.
- [11] AMIR, PORAT, ESBEN, et al. Widefield lensless imaging through a fiber bundle via speckle correlations[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16835-16855.
- [12] VELLEKOOP I M, MOSK A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [13] POPOFF S M, LEROSEY G, CARMINATI R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 100601.
- [14] CUI M, YANG C. Implementation of a digital optical phase conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3444-3455.
- [15] HSIEH C L, PU Y, GRANGE R, et al. Imaging through turbid layers by scanning the phase conjugated second harmonic radiation from a nanoparticle[J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 20723-20731.
- [16] ZHOU Bingkun, GAO Yizhi, CHEN Tirong. *Laser principle*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.  
周炳琨,高以智,陈倜荣.激光原理[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [17] PEI Lili, HUANG Dajie, FAN Wei. Stability analysis for optically-addressed phase-only spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8):0801002.  
裴丽丽,黄大杰,范微.相位型光寻址空间光调制器稳定性分析[J].*中国激光*, 2019, 46(8):0801002.
- [18] ZHU J, ZHANG Q, MENG X, et al. Vector approximate message passing algorithm for compressed sensing with structured matrix perturbation[J]. *Signal Processing*, 2020, 166: 107241-107248.
- [19] WANG W, HU X, LIU J, et al. Gerchberg-Saxton-like ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28416-28422.
- [20] KE Jun, ZHANG Linxia, ZHOU Qun. Applications of compressive sensing in optical imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 111006.  
柯钧,张临夏,周群.压缩感知在光学成像领域的应用[J].*光学学报*, 2020, 40(1): 0111006.