

自然场景透过散射介质成像探测实验研究

刘杰涛^{1,2*}, 李伟^{1,2}, 吴雨祥^{1,2}, 何顺福^{1,2}, 夏明睿^{1,2}, 梁文海^{1,2},
樊增增^{1,2}, 孙扬帆^{1,2}, 邵晓鹏^{1,2}

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

²西安市计算成像重点实验室, 陕西 西安 710071

摘要 散射成像是光学计算成像领域研究的前沿与热点。散斑自相关成像方法因其简单、快速、无损等特性而备受关注。散斑自相关成像的物理基础是光学记忆效应, 数学基础是散斑自相关非相干成像模型, 重建质量受散斑自相关的高质量提取与背景有效抑制的直接影响。光传输噪声、外界强背景干扰、探测噪声等的存在, 会严重降低散斑自相关的对比度, 使其精细结构淹没于背景及干扰噪声中, 降低目标重建质量甚至无法实现成像。为增强散斑相关成像的适用性, 提升强背景噪声干扰下的成像质量, 提出一种背景扣除、双边滤波预处理结合多帧叠加平均的方法来提升目标重建质量, 并进行了外场自然环境实验研究。实验结果表明, 所提方法可对强背景干扰下的目标进行高质量重建。在此基础上, 对于不同谱宽照明和不同距离处的目标, 实验验证了方法的有效性, 重建质量得到明显改善。研究对散射成像技术的非暗室应用及弱光成像相关应用有一定的借鉴意义。

关键词 成像系统; 计算成像; 散射成像; 散斑自相关成像; 相位恢复; 多帧叠加

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811022

Experimental Study on Imaging Through Scattering Medium in Natural Scene

Liu Jietao^{1,2*}, Li Wei^{1,2}, Wu Yuxiang^{1,2}, He Shunfu^{1,2}, Xia Mingrui^{1,2}, Liang Wenhai^{1,2},
Fan Zengzeng^{1,2}, Sun Yangfan^{1,2}, Shao Xiaopeng^{1,2}

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract Scattering imaging is the frontier and hotspot in the field of optical computational imaging field. Speckle autocorrelation imaging has attracted increasingly attention due to its efficient, fast, and noninvasive characteristics. The physical basis of speckle autocorrelation imaging is optical memory effect, and the mathematical basis is speckle autocorrelation incoherent imaging model. The reconstruction quality is directly affected by the high quality of speckle autocorrelation extraction and the effective suppression of background. Due to the existence of optical transmission noise, external strong background interference, and detection noise, the contrast of speckle autocorrelation will be seriously reduced, and its fine structure will be submerged in the background and interference noise, reducing the quality of reconstruction and even leading to fail of reconstruction. To enhance the applicability of speckle autocorrelation imaging and to improve reconstruction quality under strong background noise, we propose a strategy based on background subtraction and bilateral filtering pretreatment combined with multi-frame stacking average method, to improve the performance of reconstruction. The natural environment field experiments are carried out, and the experimental results verify the proposed method can realize high quality reconstruction under strong background disturbance. The effectiveness of the method is verified by experiments for targets at different

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-02-20; 录用日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61975254)、111 引智计划(B17035)

通信作者: *liujt@xidian.edu.cn

spectral bandwidths of illumination light and different distances, and the reconstruction quality is significantly improved. This study has certain reference significance for the non-darkroom application of scattering imaging technology and the related applications of imaging under weak light conditions.

Key words imaging systems; computational imaging; scattering imaging; speckle autocorrelation imaging; phase retrieval; multi-frame superposition

OCIS codes 110.1758; 110.0113; 050.1940

1 引言

散射介质表面或内部折射率不均匀,当光遇到诸如生物组织、毛玻璃、烟尘、混浊水体等散射介质时会出现随机散射现象,导致在探测器上得到的不再是清晰的图像,而是由散射光干涉形成的散斑,从散斑中重建出目标是一项充满挑战又极具意义的工作,散射成像是计算成像领域研究的重要前沿课题与热点。经过几十年的研究,研究人员目前已经实现了透过静态散射介质^[1-3]、动态散射介质^[4-5]、超分辨率^[6-7]、宽谱等散射成像^[8]。透过散射介质成像的主要方法有波前整形^[9-12]、数字全息^[13-14]、光学传输矩阵^[15-17]、光学相位共轭^[18-19],以及散斑相关^[20-23]等。经典方法优势明显,但不足之处亦很突出,如波前调制技术、传输矩阵、数字全息方法等易受干扰、设备昂贵、操作复杂、精度要求高,动态及活体成像困难。散斑相关成像技术只需采用非相干光照明,无需昂贵的激光器、光场调控器件及复杂机械扫描或控制系统。散斑相关成像技术以其单帧、非侵入式成像、系统简单、操作简便的优点,近年来得到迅猛发展,展现出巨大的应用潜能。

1988年,美国加利福尼亚大学的Feng等^[24]首次提出了光学记忆效应^[25](OME)的概念;同年,以色列巴伊兰大学的Freund等^[26]通过实验验证了OME的存在并从理论上证明了利用OME进行相关成像的可能性。2012年,意大利科学家Bertolotti等^[20]在*Nature*上首次提出了透过随机散射介质成像的扫描散斑相关成像(SBSC)方法,他们利用角度扫描的方式获取OME范围内目标不同角度的散斑像,最后结合相位恢复算法^[27-28]重建出目标,但该方法的数据采集过程需耗时几十分钟,无法进行实时成像;2014年,以色列希伯来大学的Katz等^[1]利用OME范围内单帧散斑图像中像素之间的相关性,提出了一种基于单帧散斑自相关(SSC)的非侵入式散射成像方法,避免了SBSC方法扫描采集数据的缺陷,在实时、非侵入式成像方面体现出巨大的应用价值。散斑相关成像方法中都要用相位恢复算法来重建出目标,但目前大多数相位

恢复算法的重建结果具有较高的随机性,既不能保证每次重建的质量,也不能确定重建目标的位置;为解决该问题,2016年,西安电子科技大学邵晓鹏课题组Wu等^[29]借鉴天文观测中的三阶相关相位恢复技术(又称双谱技术^[30]),解决了相位恢复算法所导致的重建结果不确定的问题。2017年,德国斯图加特大学的Singh等^[31]通过计算一对光轴方向上分离的散斑图像之间的互相关,成功实现了对三维目标的成像;2019年,日本大阪大学的Okamoto等^[32]提出了一种基于三维记忆效应透过散射介质进行非侵入式三维成像的方法,该方法依然受限于OME,且需要预先采集系统的点扩展函数。

散斑相关成像方法具有光路简单、非侵入式、实时成像的特点,但也存在以下几个问题:1)目前大多数的实验基本在暗室环境下进行,关于有强噪声干扰及自然环境的情况鲜有报道;2)所使用光源的光谱较窄,大多为窄带非相干光源;3)成像距离有限,尚未见远距离成像的相关研究报道,对于远距离自然环境散射成像的情况,国内到目前为止一直未见相关的实验研究报道。

如果能提高散斑自相关对比度,有效抑制背景及噪声影响,散斑相关成像的质量将会有大幅提高,应用范围将得到拓展,实用性将得到很大增强。在不增加额外硬件及实验装置复杂性的前提下,在计算和处理上平衡和优化信息处理,有较为明显的实际意义。

针对以上问题,本文提出了一种在强噪声干扰环境下从散斑中重建出目标的方法。在实验数据采集过程中,首先在存在强自然背景干扰的环境下采集多帧包含目标信号和背景噪声信号的散斑,然后采集多帧背景信号作为本底噪声;在数据处理过程中,用背景扣除、双边滤波、多帧叠加平均的方式对散斑进行预处理;在利用经过预处理的散斑进行目标重建的过程中,结合散斑自相关和相位恢复算法来对目标进行重建。此外,对于不同距离和不同谱宽照明下的成像情况,通过实验进行了分组对比验证;对于不同距离处的目标成像问题,改变散射介质到目标的距离,然后进行数据采集;对于不同谱宽

照明下的目标成像问题,通过选择不同带宽的窄带滤波器来对光源进行滤波,然后进行采集和处理。本文在进行理论分析的同时,进行了外场实验研究验证。

2 基本原理

2.1 强背景干扰下散射介质后目标重建

在光学记忆效应范围内,散射成像系统可以视为一个线性平移不变系统,最后探测器所得到的目标强度分布可以视为目标与系统点扩展函数的卷积:

$$I_k(x, y, t_k) = O(x, y, t_k) * S(x, y, t_k) + n_k(x, y, t_k), k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

式中: $O(x, y, t_k)$ 和 $S(x, y, t_k)$ 分别表示目标和成像系统的点扩展函数; $I_k(x, y, t_k)$ 和 $n_k(x, y, t_k)$ 分别表示在 t_k 时刻的散斑强度和背景噪声;*表示

卷积运算。通过叠加不同时刻的散斑强度,可以得到

$$\sum_{k=1}^n I_k(x, y, t_k) = n \cdot O(x, y, t_k) * S(x, y, t_k) + \sum_{k=1}^n n_k(x, y, t_k). \quad (2)$$

在移除照明光源的情况下,相机接收到的强度为

$$\tilde{I}_k(x, y, t_k) \approx n_k(x, y, t_k), \quad (3)$$

式中: $\tilde{I}_k(x, y, t_k)$ 为探测器接收到的在 t_k 时刻的背景噪声强度,叠加不同时刻的背景噪声强度可得

$$\sum_{k=1}^n \tilde{I}_k(x, y, t_k) \approx \sum_{k=1}^n n_k(x, y, t_k). \quad (4)$$

在自然光条件下,采用高斯白噪声模型并采用多帧叠加、系综平均的方法来消除背景噪声,即用(2)式减去(4)式,可得

$$\sum_{k=1}^n I_k(x, y, t_k) - \sum_{k=1}^n \tilde{I}_k(x, y, t_k) \approx n \cdot O(x, y, t_k) * S(x, y, t_k). \quad (5)$$

对(5)式进行平均和自相关运算,可得

$$\frac{1}{n^2} \left[\sum_{k=1}^n I_k(x, y, t_k) \right] \star \left[\sum_{k=1}^n I_k(x, y, t_k) \right] \approx \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n I_k(x, y, t_k) \star I_k(x, y, t_k) \approx (O * S) \star (O * S) = (O \star O) * (S \star S), \quad (6)$$

式中: \star 表示自相关运算。在记忆效应范围内,可以将 $S \star S$ 视为一个 δ 函数类似的尖峰函数,通过计算叠加散斑的自相关即可得到相对对比度,并可改善目标的自相关,利用维纳-辛钦(Wiener-Khinchin)定理,求解出目标的傅里叶幅值信息,再结合相位恢复算法即可重建出目标。

2.2 相位恢复算法

文中选用 Fienup 型^[27-28]相位恢复算法来恢复目标相位,用 $I(x, y)$ 表示散斑图像,用 $R(x, y)$ 表示散斑的自相关,通过运用二维傅里叶变换与逆变换计算,可以得到

$$R(x, y) = I(x, y) \star I(x, y) = \text{FT}^{-1} \{ |\text{FT} \{ I(x, y) \} |^2 \}, \quad (7)$$

式中: $\text{FT} \{ \cdot \}$ 表示傅里叶变换运算; $\text{FT}^{-1} \{ \cdot \}$ 表示傅里叶逆变换运算。

根据维纳-辛钦定理,可以从目标自相关的傅里叶变换中得到其功率谱。受光学记忆效应视场范围的限制,散斑场图像中只有中心部分携带有效目标信息,为实现重建的高效性,借助窗函数 $W(x, y)$ 求取有效的功率谱:

$$S_{\text{meas}}(k_x, k_y) = |\text{FT} \{ W(x, y) R(x, y) \} |, \quad (8)$$

式中: $W(x, y)$ 为窗函数。在此 $W(x, y)$ 可以选择 Rectangular 窗或者 Tukey 窗。相位恢复算法的具体流程如下。

1) 随机选取初始值 $g_k(x, y)$ [$g_k(x, y)$ 表示第 k 次迭代值],并对其进行二维傅里叶变换,得到

$$G_k(x, y) = \text{FT} \{ g_k(x, y) \}. \quad (9)$$

2) 求取 $G_k(x, y)$ 的辐角:

$$\varphi_k(k_x, k_y) = \arg \{ G_k(x, y) \}, \quad (10)$$

式中: $\arg \{ \cdot \}$ 表示取辐角运算。

3) 利用从散斑中估计得到的目标傅里叶幅值信息替换(1)式中傅里叶变换的模量:

$$G'_k(k_x, k_y) = \sqrt{S_{\text{meas}}(k_x, k_y)} e^{i\varphi_k(k_x, k_y)}. \quad (11)$$

4) (11)式经过二维傅里叶逆变换得到实空间的 $g'_k(x, y)$:

$$g'_k(x, y) = \text{FT}^{-1} \{ G'_k(k_x, k_y) \}. \quad (12)$$

每次输入的第 $k+1$ 次迭代值 $g_{k+1}(x, y)$ 由第 k 次迭代中的 $g'_k(x, y)$ 得到,在此求取过程中需要对目标图像进行物理约束,即在此用到的是误差减小法(ER)和混合输入-输出法(HIO)^[1,28]。

关键物理约束条件是数值为非负、实数,因为这里的数代表的是成像目标,即实际的物体;另一个物理约束条件为其范围应小于自相关半径的一半。在本文中,首先使用 HIO 算法对散斑预处理后的自相关进行 50 次迭代重建,然后将重建的结果作为初始值代入 ER 算法中继续进行 30 次迭代,最后在迭代的结果中选取代表性结果作为最终重建结果。

3 实验设置

实验光路设置如图 1 所示,该光路主要由照明光源、目标、散射介质和探测器几部分组成,LED发

出的光首先经一个准直透镜的准直后照射到目标上,携带目标信息的光透过散射介质和滤光片后被探测器接收。实验数据的采集与处理流程如图 2 所示。

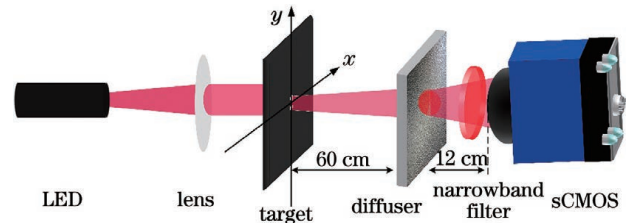


图 1 实验光路示意图

Fig. 1 Diagram of experimental light path

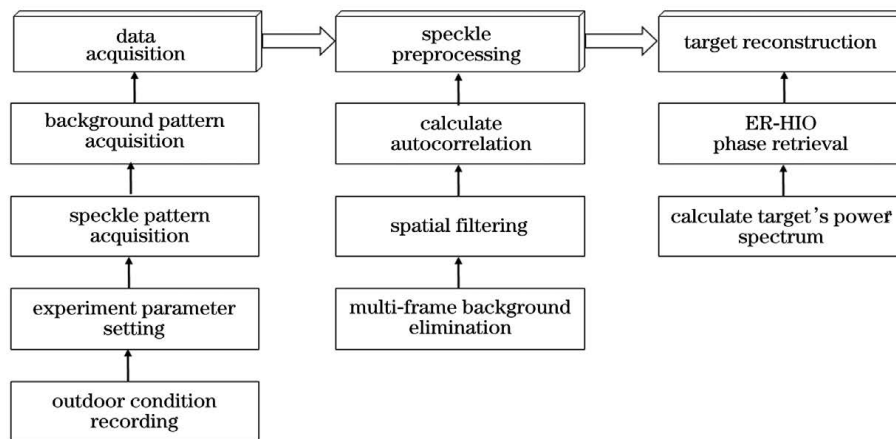


图 2 实验数据采集与目标重建处理过程

Fig. 2 Experimental data acquisition and target reconstruction process

3.1 强背景干扰下的实验结果

在外场存在自然光干扰下,搭建如图 3 所示的实验光路。



图 3 外场实验光路图

Fig. 3 Outdoor experimental light path

外场实验光路实物如图 3 所示,实验中使用的光源波长为 625 nm、带宽为 18 nm 的空间非相干 LED 光源(M625L3, Thorlabs),光经过准直透镜(GCL-0102, 半径 $r=40$ mm, 焦距 $f=100$ mm, DHC)的准直后照射到目标(Edmund, 1951 USAF Negative Object)上,携带目标信息的光经毛玻璃(Edmund, Ground Glass Diffuser)的散射和滤光片

的滤波(Andover, 633FS02-50, 1.0 ± 0.2 nm)后被探测器(sCMOS 相机, Pco. edge5. 5, $2560 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$)接收,其中物距、像距的初始设置分别为散射介质到目标的距离(60 cm)和散射介质到探测器的距离(12 cm)。

在对光路进行准直后,打开光源与相机,启动数据采集软件,为避免外场背景光太强,损坏相机,开始设置相机曝光时间为 100 ms,根据外界背景噪声的强度,相应增加曝光时间,设置好光路数值后,设置自动采集 100 帧目标经过散射后的图像,然后关闭光源,再采集 100 帧背景光强图像。本次外场实验的时间为夏季,所进行实验的外界环境监测温度为 31°C ,环境湿度为 55%,实验中所存在的外界干扰主要为自然光,目标和光源均放置于自然场景中,实验光路中探测单元无太阳光直射,环境可见度检测值为 300 m。

3.2 不同距离目标成像

保持光路的其他部分不变,设置散射介质到目标的距离 z 依次为 1, 2, 3, 4, 5 m, 然后相应地采集多帧目标散斑数据和环境背景,数据采集完成后

进行后续处理。

不同距离处目标的重建结果如图 4 所示,其中,图 4 中的 1 至 5 行分别对应目标到散射介质的距离为 1,2,3,4,5 m 时的情况,图 4(a)为在不同距离处采集的目标散斑,图 4(b)为在相应距离处关闭光源所采集的自然环境背景,图 4(c)为使用不同帧数的

重建处理结果。

从重建结果可知,对于不同距离处的目标,用所提出的方法都能重建出肉眼可分辨的目标及其结构。随着目标距离的增加,目标的重建质量会有不同程度的下降,采用多帧重建可以一定程度地改善重建图像质量。

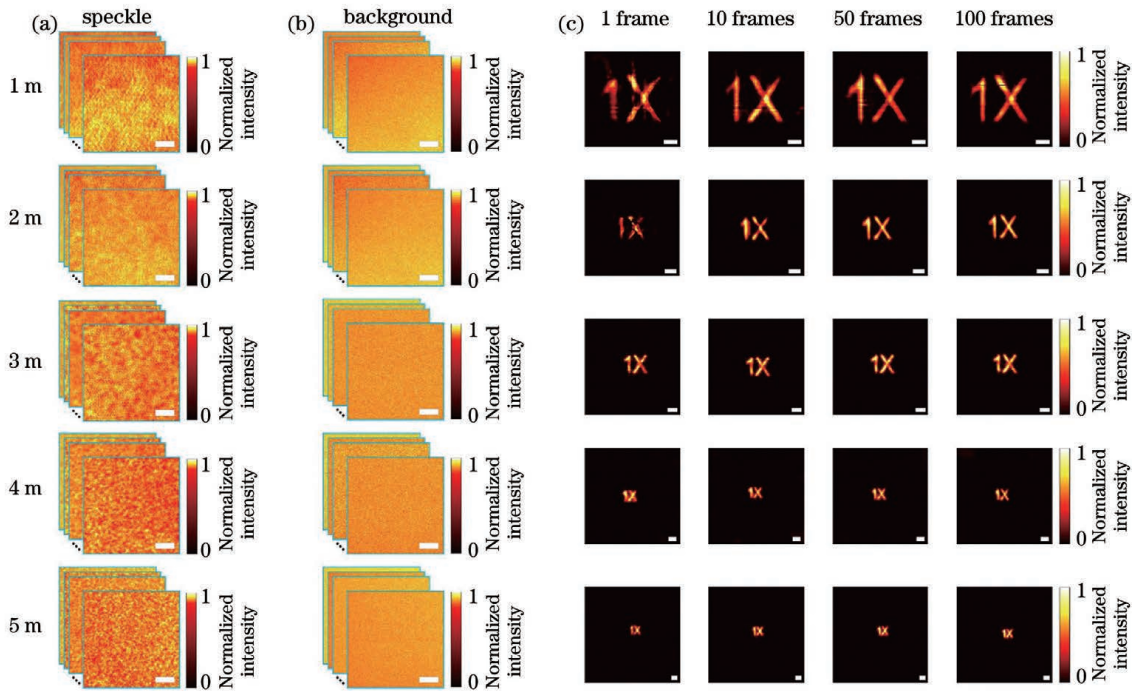


图 4 外场不同距离处目标的重建结果。(a)采集的目标散斑;(b)关闭光源所采集的自然环境背景;(c)使用不同帧数的重建处理结果

Fig. 4 Outdoor experimental results for different distances. (a) Captured target speckles; (b) captured natural environment backgrounds when light source is turn off; (c) reconstruction processing results for different frame numbers

3.3 直接 LED 光源照明成像

光路及参数设置与强背景噪声干扰下数据采集时一致,移除相机前面的窄带滤波器,直接采集

LED 光源照明散斑,采集多帧目标散斑数据和环境背景噪声用于重建。宽谱 LED 光源照明下的重建结果如图 5 所示,其中,图 5(a)为不同距离处采集

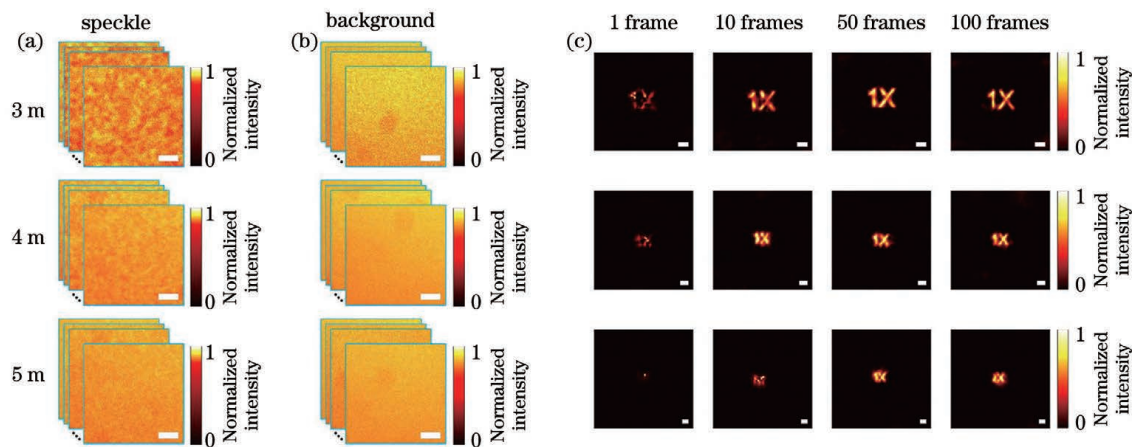


图 5 LED 照明重建结果。(a)目标散斑;(b)背景信号;(c)帧数为 1,10,50,100 的重建结果

Fig. 5 Experimental results using LED illumination. (a) Target speckles; (b) background signals; (c) reconstructed results for frame numbers of 1, 10, 50, and 100

的目标散斑,图 5(b)为对应距离处采集的背景信号,图 5(c)为采用不同帧数的重建结果。

对于 LED 直接照明的情况,在目标到散射介质的距离为 3 m 时,由于采集了背底信号,使用单帧重建依然能够分辨出目标,只是目标细节信息有一定程度的丢失;使用 10 帧图像进行多帧重建时,目标重建质量有明显提升;增加重建所用帧数,在 50 帧和 100 帧时,重建质量得到进一步提高。在目标到散射介质的距离为 4 m 和 5 m 时对目标进行重建,随着重建使用帧数的叠加,目标的重建质量有一定的改善,目标能被明显分辨出,但是有了比较明显的信息丢失。对于更远距离目标的重建,由于可收集到的有效光子能量和有用光子信息减少,因此其重建质量受到影响。

4 结果分析

引入结构相似性(SSIM)和 Pearson 相关系数(PCC)来对重建结果进行客观的、定量的评价。其中结构相似性的计算公式为

$$SSIM(X, Y) = \frac{(2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\sigma_{XY} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2)}, \quad (13)$$

式中: X, Y 分别表示原始目标和重建目标; μ_X, μ_Y 分别是 X, Y 的均值; σ_{XY} 是 X, Y 的协方差; C_1, C_2 是为了避免分母为 0 而引入的一个小的正常数,通常 $C_1 = (K_1L)^2, C_2 = (K_2L)^2$, 其中 $K_1 = 0.01, K_2 = 0.03, L$ 是图像灰度级数。

Pearson 相关系数的计算式为

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X\sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X\sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)} \sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}}, \quad (14)$$

式中: $cov(x, y)$ 是 X, Y 的协方差; $E(\cdot)$ 表示数学期望。

外场散斑相关重建结果的 SSIM 和 PCC 如图 6、图 7 所示,在进行单帧处理后,得到的 SSIM

和 PCC 的值都很小,随着重建使用帧数的增加,SSIM 和 PCC 值随之增加,直至一定帧数后趋于稳定,这与主观看到的结果相一致。

外场 LED 照明重建的实验结果如图 7 所示。

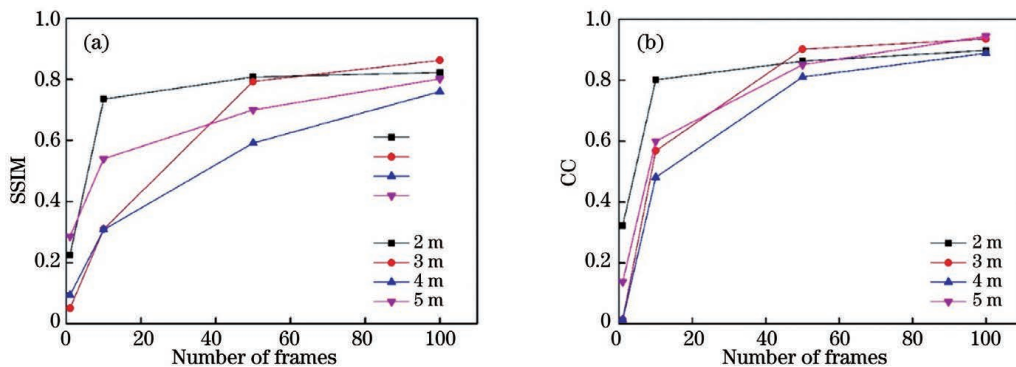


图 6 外场强干扰下的重建结果。(a)SSIM;(b)相关性(CC)

Fig. 6 Reconstructed results under strong interference. (a) SSIM; (b) CC

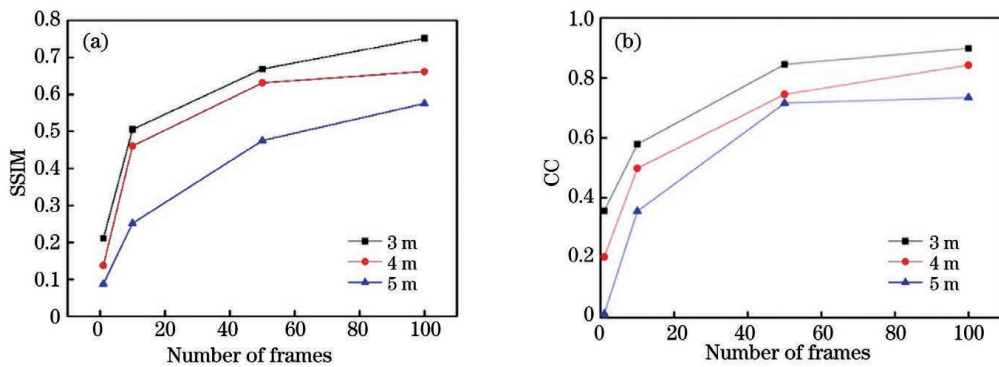


图 7 宽谱照明下的重建结果。(a)SSIM;(b)CC

Fig. 7 Reconstructed results under wideband spectrum illumination. (a) SSIM; (b) CC

LED 光源照明下的散斑目标重建中,在单帧重建时,得到的 SSIM 值和 CC 值都非常小,重建质量较差,随着重建使用帧数的增加,重建结果的 SSIM 值和 PCC 值也快速增加,最后趋于一个特定的值。

经过数据分析可知,本文提出的处理技术与方法可以实现强背景噪声干扰下的散斑目标重建,且对于不同距离处、LED 光源照明下的目标也有一定的重建能力,但是当距离增加到一定值以后,主要由于光源强度、探测器接收效率等的影响,目标的重建质量会出现明显下降,且目前虽然能实现宽谱光源照明下的散射成像,但恢复目标的信噪比较低,可以从光源强度、探测收集效率、数据处理、重建算法等几方面进一步提升成像质量。

5 结 论

针对强背景噪声干扰下的散射成像问题,通过多帧叠加、背景扣除的方法对散斑进行预处理,采用散斑相关和相位恢复算法进行目标重建;实验结果表明,对于强背景干扰下的散射成像问题,随着使用帧数的增加,所提方法可有效提升重建目标的质量;与直接采用散斑相关重建目标的方法相比,所提方法在一定程度上解决了强背景噪声干扰下的散射成像问题,该方法有望拓宽散射成像的应用范围,促进散射成像技术从实验室环境到自然环境应用的发展,推动散射成像技术更广泛地应用于日常生活及生产中。所提方法需要采集环境背景,考虑实际成像需求,以后将在宽谱非相干光源及自然光照明下透过散射介质的重建目标信噪比提升、高分辨成像方面进行进一步研究^[33-35]。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xu X Q, Xie X S, He H X, et al. Imaging objects through scattering layers and around corners by retrieval of the scattered point spread function [J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32829-32840.
- [3] Wang X Y, Jin X, Li J Q, et al. Prior-information-free single-shot scattering imaging beyond the memory effect [J]. Optics Letters, 2019, 44(6): 1423-1426.
- [4] Edrei E, Scarcelli G. Optical imaging through dynamic turbid media using the Fourier-domain shower-curtain effect [J]. Optica, 2016, 3(1): 71-74.
- [5] Kanaev A V, Watnik A T, Gardner D F, et al. Imaging through extreme scattering in extended dynamic media [J]. Optics Letters, 2018, 43(13): 3088-3091.
- [6] Kim M K, Park C H, Rodriguez C, et al. Superresolution imaging with optical fluctuation using speckle patterns illumination [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 16525.
- [7] Liu Y H, Chen L, Liu W, et al. Resolution-enhanced imaging through scattering media by high-order correlation [J]. Applied Optics, 2019, 58(9): 2350-2357.
- [8] Divitt S, Gardner D F, Watnik A T. Imaging around corners in the mid-infrared using speckle correlations [J]. Optics Express, 2020, 28(8): 11051-11064.
- [9] Vellekoop I M, Aegerter C M. Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers [J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1245-1247.
- [10] Mosk A P, Lagendijk A, Leroose G, et al. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media [J]. Nature Photonics, 2012, 6(5): 283-292.
- [11] Horstmeyer R, Ruan H W, Yang C H. Guidestar-assisted wavefront-shaping methods for focusing light into biological tissue [J]. Nature Photonics, 2015, 9: 563-571.
- [12] Hsu C W, Liew S F, Goetschy A, et al. Correlation-enhanced control of wave focusing in disordered media [J]. Nature Physics, 2017, 13(5): 497-502.
- [13] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Looking through a diffuser and around an opaque surface: a holographic approach [J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7694-7701.
- [14] Papadopoulos I N, Jouhannau J S, Poulet J F A, et al. Scattering compensation by focus scanning holographic aberration probing (F-SHARP) [J]. Nature Photonics, 2017, 11(2): 116-123.
- [15] Popoff S M, Leroose 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.
- [16] Choi Y, Yoon C, Kim M, et al. Scanner-free and wide-field endoscopic imaging by using a single multimode optical fiber [J]. Physical Review Letters, 2012, 109(20): 203901.
- [17] Mounaix M, Defienne H, Gigan S. Deterministic light focusing in space and time through multiple scattering media with a time-resolved transmission matrix approach (Conference Presentation) [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10073: 100730S.

- [18] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(2): 110-115.
- [19] Si K, Fiolka R, Cui M. Fluorescence imaging beyond the ballistic regime by ultrasound pulse guided digital phase conjugation [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 657-661.
- [20] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [21] Judkewitz B, Horstmeyer R, Vellekoop I M, et al. Translation correlations in anisotropically scattering media[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(8): 684-689.
- [22] Li Y Z, Xue Y J, Tian L. Deep speckle correlation: a deep learning approach toward scalable imaging through scattering media[J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1181-1190.
- [23] Stern G, Katz O. Noninvasive focusing through scattering layers using speckle correlations[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 143-146.
- [24] Feng S, Kane C, Lee P A, et al. Correlations and fluctuations of coherent wave transmission through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(7): 834-837.
- [25] Helmchen F, Denk W. Deep tissue two-photon microscopy[J]. *Nature Methods*, 2005, 2(12): 932.
- [26] Freund I, Rosenbluh M, Feng S. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2328-2331.
- [27] Fienup J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. *Optics Letters*, 1978, 3(1): 27-29.
- [28] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [29] Wu T F, Katz O, Shao X P, et al. Single-shot diffraction-limited imaging through scattering layers via bispectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5003-5006.
- [30] Lohmann A W, Weigelt G, Wirtzner B. Speckle masking in astronomy: triple correlation theory and applications [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 4028-4037.
- [31] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Exploiting scattering media for exploring 3D objects[J]. *Light, Science & Applications*, 2017, 6(2): e16219.
- [32] Okamoto Y, Horisaki R, Tanida J. Noninvasive three-dimensional imaging through scattering media by three-dimensional speckle correlation [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2526-2529.
- [33] Lu X Y, Zhao C L, Cai Y J. Research progress on methods and applications for phase reconstruction under partially coherent illumination [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500016.
卢兴园, 赵承良, 蔡阳健. 部分相干照明下的相位恢复方法及应用研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500016.
- [34] Guo C, Geng Y, Zhai Y L, et al. Research progress on parameter-changed computational imaging techniques [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(16): 160001.
郭澄, 耿勇, 翟玉兰, 等. 变参数计算成像技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(16): 160001.
- [35] Zuo C, Feng S J, Zhang X Y, et al. Deep learning based computational imaging: status, challenges, and future [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111003.
左超, 冯世杰, 张翔宇, 等. 深度学习下的计算成像: 现状、挑战与未来 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111003.