



基于散斑光场偏振共模抑制性的宽谱散射成像技术

孙雪莹 刘飞 段景博 牛耕田 邵晓鹏

Broadband scattering imaging technology based on common-mode rejection of polarization characteristic

Sun Xue-Ying Liu Fei Duan Jing-Bo Niu Geng-Tian Shao Xiao-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224203 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210703

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210703>

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

外差式偏振干涉成像光谱技术研究

Heterodyne polarization interference imaging spectroscopy

物理学报. 2017, 66(16): 160702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.160702>

浅海被动水下偏振成像探测方法

Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area

物理学报. 2018, 67(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180692>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

基于稀疏低秩特性的水下非均匀光场偏振成像技术研究

Clear underwater vision in non-uniform scattering field by low-rank-and-sparse-decomposition-based polarization imaging

物理学报. 2021, 70(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210314>

低维半导体偏振光探测器研究进展

Recent progress in polarization-sensitive photodetectors based on low-dimensional semiconductors

物理学报. 2019, 68(16): 163201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191002>

新型双通道差分偏振干涉成像系统

Novel dual channel polarization interference imaging system

物理学报. 2018, 67(10): 100701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172691>

基于散斑光场偏振共模抑制性的 宽谱散射成像技术*

孙雪莹¹⁾²⁾ 刘飞^{1)2)3)†} 段景博¹⁾²⁾ 牛耕田¹⁾²⁾ 邵晓鹏¹⁾²⁾³⁾

1) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学西安市计算成像重点实验室, 西安 710071)

3) (西安电子科技大学先进光学成像前沿交叉研究中心, 西安 710071)

(2021年4月13日收到; 2021年6月2日收到修改稿)

针对透过随机散射介质成像中由于光源谱宽导致目标信息被淹没于背景噪声中, 无法清晰复原隐藏目标信息的问题, 提出基于散斑光场偏振共模抑制特性的宽谱散射成像方法. 该方法深入分析散斑光场的偏振特性, 利用散斑光场中目标与背景的偏振信息差异性与独立性, 结合光场的偏振共模抑制特性, 有效去除光源谱宽所带来的背景噪声影响, 重建高对比度、高信噪比的隐藏目标图像, 实现透过随机散射介质的宽谱成像. 实验结果表明, 该成像方法不仅能够在宽谱光源照明下实现目标与背景信息的分离, 而且能够大幅提高重建图像的信噪比、对比度和结构相似度, 在散射成像领域具有普适性及良好应用前景.

关键词: 宽谱散射成像, 偏振, 差分成像

PACS: 42.25.Fx, 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.70.20210703

1 引言

目前在透过随机散射介质成像技术中, 由于随机散射介质对光波的强散射作用, 入射光波从散射介质表面出射时改变了原有入射光场的空间相对位置关系, 出射光场因而变得紊乱而随机, 导致目标信息被淹没于混乱的背景噪声中, 无法直接对目标进行观测. 然而, 光波透过随机散射介质后, 入射光携带的目标信息并未丢失, 只是隐藏于散射光中形成散斑光场^[1]. 因此, 从散斑光场中恢复出隐藏的目标信息, 实现穿透随机散射介质成像, 在生物医学成像、军事安全及生命科学等领域具有重要的物理意义和应用价值.

近年来, 国内外许多学者对散斑光场中提取目标信息相继开展了研究. 其可根据成像的方式分为

三类: 1) 研究散射介质的散射特性, 利用传输矩阵 (transmission matrix, TM) 表示光场输入与输出变换作用: 如 Popoff 团队^[2-3] 和 Liu 等^[4] 通过相移干涉法测量光学系统的 TM, 实现了透过散射介质成像; 2) 研究散斑场的随机统计特性: 如 Bertolotti 等^[5], Shao 等^[6] 及 He 等^[7] 利用散斑相关技术 (speckle correlation technique, SCT), 即利用散斑与目标的自相关相似性实现透过散射介质成像; 3) 研究散射介质引入的波前畸变, 使用波前整形技术对散射介质进行波前补偿: 如 Horstmeyer 等^[8] 及 Wan 等^[9] 利用此技术实现了透过散射介质的聚焦与成像. 然而, 传输矩阵测量技术与波前整形技术受制于光波的相干性, 散斑相关技术由于系统点扩散函数 (point spread function, PSF) 的相似性假设条件苛刻, 导致无法实现透过随机散射介质的宽谱成像. 而利用白光 LED 或自然光等造价低且

* 国家自然科学基金 (批准号: 61975254, 62005203, 62075175) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: feiliu@xidian.edu.cn

易获得的宽谱照明光源实现透过散射介质成像, 将极大促进该成像技术由主动成像向被动成像的跨越. 目前, 针对透过散射介质的宽谱成像主要利用散斑相关成像模型结合窄带滤波器及图像处理方法, 如 Xu 等^[10]在单帧散斑相关散射成像的基础上, 采用 LED 光源照明, 由已知参考物体产生的类散斑图案去卷积恢复散射介质的点扩散函数, 从而实现对待测物体透过散射介质宽谱成像. Liu 等^[11]通过多帧叠加、背景扣除的方法对散斑进行预处理, 结合散斑相关技术实现了在自然场景下的透过散射介质宽谱成像. 然而这些方法通过借助已知物体的先验信息和空间滤波等图像处理手段成像, 并未从物理模型本质解决光源谱宽对成像的影响, 导致对不同频率宽谱光源的普适性差. 因此, 本研究针对散射成像技术受限于光源谱宽的难题, 提出基于散斑光场偏振共模抑制性的宽谱散射成像方法, 该方法深入分析散斑光场中目标信息和背景噪声的分布特性, 深度挖掘偏振域内信息的相似性和差异性, 结合其共模抑制特性有效解决散射成像中由于光源谱宽所引入的散斑对比度低, 背景噪声严重等问题, 实现了在可见光波段宽谱光源照明下透过随机散射介质的清晰成像.

2 宽谱散射成像模型

如图 1 所示为基于宽谱光源照明的透过散射介质成像系统, 探测器获得的散斑场强度图像 I 为^[12]

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} O(r) \cdot S(r) dr$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} A(r) \cdot e^{i\varphi(r)} \cdot S(r) dr = O * S, \quad (1)$$

式中, $O(r)$ 为成像目标, $S(r)$ 为系统的 PSF, r 表示空间位置, $A(r)$ 和 $e^{i\varphi(r)}$ 分别为 $O(r)$ 的振幅与相位, $*$ 表示卷积运算. $O(r)$ 与 $S(r)$ 分别简记为 O 和 S .

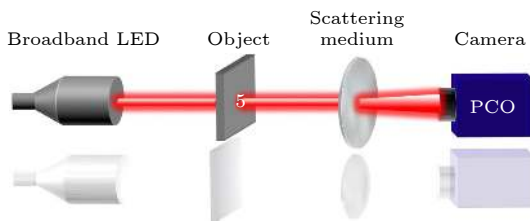


图 1 基于宽谱光源照明的透过散射介质成像原理示意图
Fig. 1. Schematic of imaging through scattering medium with broadband light illumination.

根据散射介质具有光学记忆效应的物理特性^[13–14], 当目标尺寸在光学记忆效应范围内, 成像系统 PSF 具有空间位移不变性, 目标信息经过散射介质后将形成近乎相同的散斑光场, 则目标的自相关与散斑光场的自相关具有一致性^[10]. 但当光源的中心波长一定时, 随着谱宽的增大, 随机散射光学成像系统 PSF 的相关系数近似呈指数规律衰减, 并逐渐趋于零^[15], 此时散斑光场的自相关信息与目标的自相关信息存在一定差异性. 通过 (1) 式可以得到宽谱散斑光场的自相关表示式为

$$I \star I = (O \star O) * (S \star S), \quad (2)$$

式中, \star 表示自相关操作, S 为宽谱光源照明成像系统的 PSF. 由于随机散射光学成像系统是一个线性系统, 其 PSF 可等效为 N 个窄带子光源分别照明该系统的 PSF 的线性叠加, 如 (3) 式所示:

$$S(\lambda, \Delta\lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_i S(\lambda_i, \Delta\lambda_i), \quad (3)$$

式中: λ, λ_i 分别为宽谱光源与窄谱子光源的中心波长; $\Delta\lambda, \Delta\lambda_i$ 则分别表示宽谱光源和窄谱子光源的谱宽; α_i 为相应的叠加系数. 则宽谱光源照明该成像系统 PSF 的自相关等于所有 $S(\lambda_i, \Delta\lambda_i)$ 自相关的线性叠加与 $S(\lambda_i, \Delta\lambda_i)$, $S(\lambda_j, \Delta\lambda_j)$ ($i \neq j$) 的互相关线性叠加之和, 即:

$$S(\lambda, \Delta\lambda) \star S(\lambda, \Delta\lambda)$$

$$= \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 S(\lambda_i, \Delta\lambda_i) \star S(\lambda_i, \Delta\lambda_i)$$

$$+ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j S(\lambda_i, \Delta\lambda_i) \star S(\lambda_j, \Delta\lambda_j), \quad (4)$$

式中 $S(\lambda_i, \Delta\lambda_i) \star S(\lambda_i, \Delta\lambda_i)$ 的线性叠加之和是一个类 δ 的脉冲响应函数. 因此, (2) 式可以细化为

$$I \star I = (O \star O) * (S \star S) = (O \star O) *$$

$$\left(\delta + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j S(\lambda_i, \Delta\lambda_i) \star S(\lambda_j, \Delta\lambda_j) \right)$$

$$= (O \star O) + C_1 + (O \star O) * CC_{\text{sum}}(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$$

$$\approx (O \star O) + B, \quad (5)$$

式中: $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j S(\lambda_i, \Delta\lambda_i) \star S(\lambda_j, \Delta\lambda_j)$ 为互相关线性叠加之和, 简记为 $CC_{\text{sum}}(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$; $B = C_1 + C_2(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$ 为背景项; C_1 为计算散斑自

相关时产生的常数背景项^[12]. 由于类 δ 的脉冲响应函数呈现高斯分布规律, 通常对散斑图样进行高斯滤波预处理操作^[16–17], 即可滤除常数背景项 C_1 . $C_2(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$ 是由光源谱宽所引入的背景噪声项, 目前通过在探测器前放置一个带宽约为 1 nm 的窄带滤波器来提升所获得的散斑图像质量^[18–19], 如图 2(a) 所示, 经滤波后的散斑颗粒清晰、分布均匀且对比度高. 图 2(b) 为宽谱照明下探测器前无窄带滤波器的散斑原图, 散斑图像整体亮度比图 2(a) 高, 但是散斑颗粒与背景的对比较低且边缘颗粒模糊. 将两幅散斑图样的相同区域分别进行局部放大为图 2(c) 与图 2(d), 对比两处绿色圆圈标记内的散斑分析可知, 探测器前加入窄带滤波器时, 散斑颗粒度得到一定的提升, 隐藏在散斑图样中的目标信息被凸显, 背景噪声得到大幅抑制, 此方式即可滤除由光源谱宽引起的 $C_2(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$ 项的影响. 随后结合维纳辛钦定理^[6]与相位恢复算法^[20], 可实现隐藏目标的重构. 相比图 2(c) 的散斑图样, 图 2(d) 的背景噪声较强, 使得散斑对比度显著降低, 而目标信息完全淹没在 $C_2(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$ 项的背景干扰中, 难以有效提取.

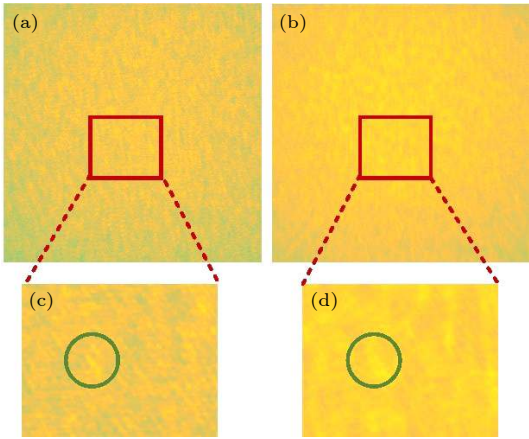


图 2 宽谱照明下探测器前有无窄带滤波器的散斑对比图 (a) 探测器前有窄带滤波器; (b) 探测器前无窄带滤波器; (c) 窄谱照明散斑图像局部放大结果; (d) 宽谱照明散斑图像局部放大结果

Fig. 2. Speckle patterns with or without narrowband filter in front of the detector under broadband light illumination: (a) With narrowband filter; (b) without narrowband filter; (c) zoomed-in view of the region of interest in speckle image with narrowband light illumination; (d) zoomed-in view of the region of interest in speckle image with broadband light illumination.

虽然采用探测器前放置窄带滤波器的方法可

以实现宽谱照明下的透过散射介质成像, 但是其成像的物理本质依旧是利用窄谱照明下成像系统 PSF 的相似性, 在加入窄带滤波器获得高信噪比与高对比度散斑的过程中, 滤除了光源谱宽所引入的 $C_2(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$ 项, 然而成像系统能量透过率大幅下降, 并且缺乏解决该项的物理表征模型, 导致成像效果受限. 此外, 窄带滤波器的谱宽范围有局限性, 对于实际应用中的白光及自然光等谱宽更宽的照明光源, 窄带滤波器发挥的作用有限, 即对任一宽谱光源的普适性差. 因此, 通过构建新的物理成像模型, 有效移除由光源谱宽引起的背景噪声 $C_2(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$ 项, 从探测到的如图 2(d) 所示的低信噪比散斑中恢复出隐藏的目标信息是本文探究与待解决的问题, 也是解决透过随机散射介质成像普适性差、实际应用受限的必由之路.

3 散斑光场的偏振特性分析

由于线偏振光波照射至粗糙的散射介质表面后采集的散斑具有偏振特性^[21], 因此通过深入分析宽谱散斑光场的偏振特性, 考虑将该物理特性有效用于构建新的宽谱成像模型中, 以解决谱宽引起的背景噪声. 当偏振调制的宽谱光源照射至随机散射介质后, 成像系统相机探测到的强度图像与探测器前偏振片的旋转方位角 ϕ_{pol} 之间的关系为^[22]

$$I(\phi_{\text{pol}}) = \frac{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}{2} + \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{2} \cos(2((\phi_{\text{pol}} - \varphi))), \quad (6)$$

式中, I_{max} 和 I_{min} 分别为探测器接收到光强度最大与最小的图像, φ 是光波场的初始相位. 由 (6) 式可知, 探测器接收到的图像强度随偏振方位角的变化呈现余弦函数变化规律. 为验证透过散射介质后形成的散斑光场具有偏振特性, 根据图 3(a) 搭建了宽谱散射成像实验装置. LED 宽谱照明光源被第一个偏振器件调制为完全线偏振光, 依次照射至目标与散射介质后, 旋转第二个偏振调制器件的方位角, 每间隔 5° 采集序列宽谱散斑图像, 不同偏振方位角散斑图样的均值强度分布如图 3(b) 所示, 其中 a, b, c, d 分别为偏振方位角 0° , 45° , 90° 与 135° 的宽谱散斑图像.

根据不同偏振方位角散斑图样以及均值强度曲线可知, 散斑光场强度随偏振方位角有显著的明暗变化, 并且服从余弦函数分布规律. 为了深入分析散斑光场的偏振特性, 计算透过散射介质后散斑

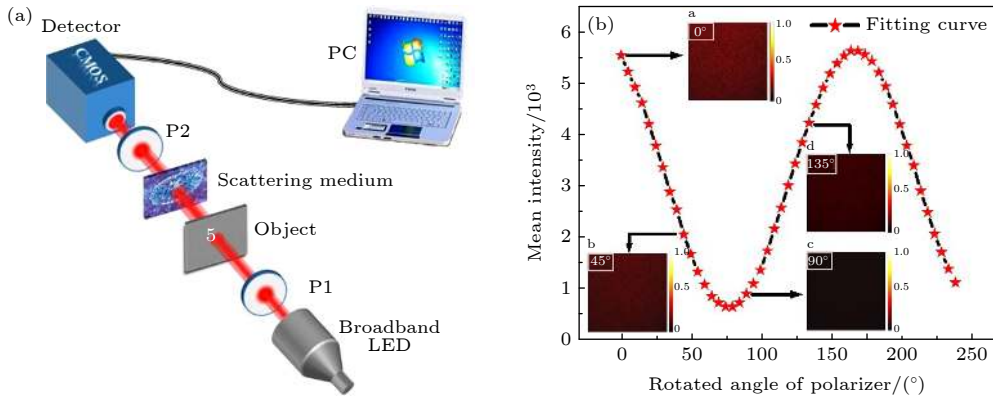


图 3 宽谱散斑光场的偏振特性分析 (a) 基于宽谱光源照明的偏振散射成像系统; (b) 不同偏振方位角宽谱散斑图像的均值强度分布曲线

Fig. 3. Polarization characteristics analysis of broadband speckle field: (a) Polarization scattering imaging system with broadband light illumination; (b) the fitting curve between different rotated angles of polarizer and the mean intensity of broadband speckle.

光场的偏振度 [23], 其归一化强度分布如图 4 所示. 散斑光场中无论表征目标信息的散斑颗粒还是表征背景噪声信息的散斑图像都具有明显的偏振特性, 对于受背景噪声影响较小的散斑颗粒区域 (如黄色圆圈所标记) 其偏振度值大致位于 0.3—0.9 之间. 根据第 2 节的分析可知, 散斑光场中含有因光源谱宽引起的严重背景噪声项, 导致目标信息被噪声所淹没, 故而图 4 所示偏振度中所有的像素点取值取决于目标信息与背景噪声共同影响, 因此低于 0.2 值的像素点为背景噪声影响占优的结果. 以散斑偏振度图像的第 300 列 (红色直线处) 像素的归一化强度分布曲线为例, 偏振度的强度值在 0.08 至 0.13 之间波动, 变化趋势相对平稳且规律. 由以上分析可知, 图 4 表明基于偏振调制的宽谱照明光源透过散射介质形成的散斑光场中, 目标信息的偏振特性与大量背景噪声的偏振特性相比有显著的差异性 [24]. 因此, 考虑充分利用散斑场中两者偏振特性的差异性提取出隐藏的目标信息, 从而从物理模型上解决宽谱散射成像中 $C_2(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$ 项

的干扰问题.

4 偏振散斑差分成像方法

由于探测器所接收到的散斑光场在偏振域内呈现明显的偏振特性, 深入分析散斑光场中目标信息光和背景散射光的偏振差异性, 如图 5 所示. 通过旋转置于探测器之前的偏振片间隔 5° 采集序列散斑图像, 选取散斑中表征目标信息的 2 个散斑颗粒区域 (图 5(b) 中的红色与绿色框) 和背景信息的平滑区域 (图 5(b) 中蓝色框), 进行像素强度值的统计, 区域强度分布曲线如图 5(a) 所示. 目标信息的变化随着偏振片的旋转方向总体呈现明显的余弦变化趋势, 表明其具有明显的偏振特性; 而背景散射信息的变化则相对比较稳定, 表明其呈现出弱偏振特性. 因此, 鉴于此差异性, 结合 (7) 式所示的偏振共模抑制特性方法有效滤除背景 $C_2(\lambda_{ij}, \Delta\lambda_{ij})$ 项, 提取目标信息光.

$$\begin{bmatrix} I_{PS} \\ I_{PD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{//} \\ I_{\perp} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中, I_{PD} 和 I_{PS} 分别表示偏振差分成像信号和偏振求和成像信号 [25]. 对于理想的线偏振分析系统, I_{PS} 相当于传统的场景强度图像 I , 且经过正交分解的 $I_{//}$ 和 I_{\perp} 满足 $I_{\perp} = I_{\max}$, $I_{//} = I_{\min}$, 即到达探测器单元上每一个像元的偏振光的最大光强和最小光强呈相互正交分布. 然而在散射成像中, 由于随机散射介质所具有的强散射作用, 导致探测器所接收到的能够最大限度反映散斑差异性的最大和最小光强图像不严格呈现正交分布, 如图 3(b) 所示. 因此, 为有效提升散斑光场目标信息提取的准确

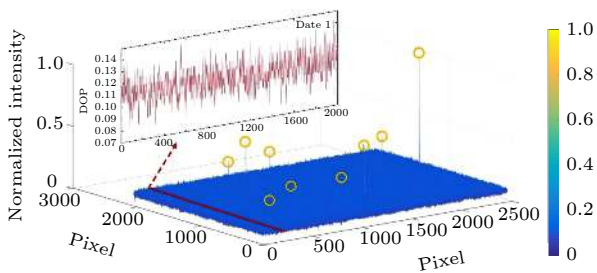


图 4 宽谱散斑光场的偏振度归一化强度分布图

Fig. 4. The normalized intensity distribution of the degree of polarization of broadband speckle.

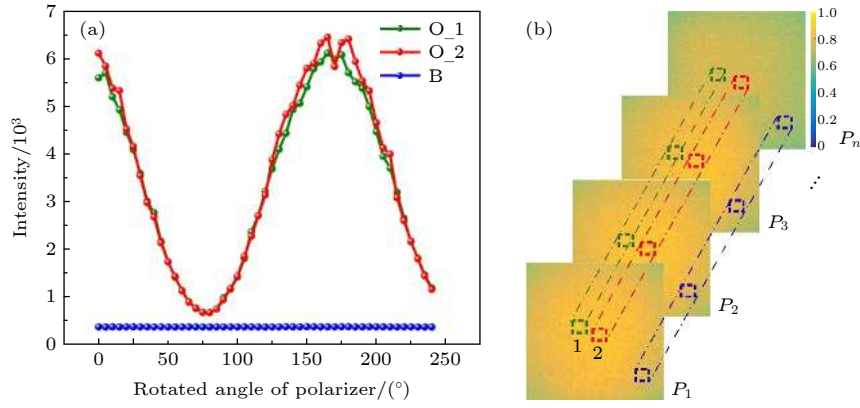


图 5 不同偏振方位角散斑图像中目标和背景强度变化 (a) 目标与背景强度分布曲线 (O_1 和 O_2 分别表示图 (b) 中表征目标信息的绿色和红色区域散斑颗粒强度分布, B 为图 (b) 中表征背景信息的蓝色区域散斑颗粒强度分布); (b) 不同偏振方位角散斑图像 ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 表示探测器前偏振片在不同旋转方位角采集的散斑图样)

Fig. 5. The intensity of the object and background as a function of different rotated angles of polarizer: (a) The fitting curves (O_1 and O_2 respectively represent the object information intensity distribution of speckle particles in the green and red regions of the figure (b), and B represents the background information intensity distribution of the speckle particles in the blue region of the figure (b)); (b) speckles with different rotated angles of polarizer ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ represent the speckle patterns obtained by the polarizer in front of the detector at different rotated angles).

性, 以及重建图像的质量, 本文基于不同偏振方位角调制的散斑光场强度的自相关函数差异性, 进行函数拟合, 有效获取散斑场中含有的目标信息与背景噪声占优的两幅图像, 利用偏振的共模抑制特性, 抑制由光源谱宽引起的背景噪声项, 使得散斑场强度的自相关信息与目标的自相关信息近似相等, 再结合相位恢复算法, 从散射光场中重建出高对比度、高信噪比的目标图像。

当宽谱光源照射至散射介质后形成的散斑光场, 经不同偏振方位角调制后, 其自相关信息各不相同. 如图 6(a) 所示, 以偏振方位角分别为 165° 与 70° 调制为例, 两个偏振态调制散斑场的自相关图像具有显著差异性, 165° 调制的散斑自相关图像中可以看到隐藏数字目标‘2’的自相关信息, 即目标信息被凸显; 70° 调制的散斑自相关图像中的背景噪声极其严重, 无法观测到任何的目标信息. 根据散斑场强度的自相关函数表达式^[26], 以及曲线的分布特性深入分析偏振散斑图像差异性.

$$\Gamma_I(r) = \langle I \rangle^2 \left[1 + \left| 2 \frac{J_1\left(\frac{\pi D r}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi D r}{\lambda z}} \right|^2 \right], \quad (8)$$

式中, $r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 为空间坐标, $\Gamma_I(r)$ 为散斑场强度 I 的自相关函数, D 为探测器接收到的散斑直径, z 表示传播距离, $J_1(\cdot)$ 表示一阶贝塞尔函数. 自相关函数的归一化强度分布曲线如图 6(b) 所示

为对称的类高斯函数, 对比 165° 和 70° 偏振调制的散斑自相关归一化强度分布曲线可知, 165° 曲线的峰值 (约为 0.75) 明显高于 70° 曲线的峰值 (约为 0.255), 峰值点表征的是目标自相关中心处的信息, 该值越大, 表明图像所含的目标信息越多. 并且, 165° 曲线的两端最低处基本都是除目标自相关信息外的噪声信号, 邻近峰值点的一些数据点也反映出了目标信息的含量; 然而, 70° 曲线上数据点的整体强度值较小, 体现了背景噪声信号的分布特性。

由自相关函数的峰值相关能量 (peak-to-correlation energy, PCE) 评价指标^[27]的物理含义可知, PCE 值越高, 表示目标信息与背景噪声比值越大, 即含有的目标信息越丰富. 根据 PCE 的求解方法, 相关函数的峰值点与其周围接近峰值的 8 个数据点之和表征目标信息的强度, 计算该值与所有数据点强度之和的比值即为 PCE, 找到 PCE 最大与最小值对应的散斑图样. 如图 7 所示为不同偏振方位角采集散斑图样的自相关函数的 PCE 拟合曲线, 最大和最小值所对应的偏振方位角分别为 70° 和 165° , 即为目标信息与背景噪声差异性最大和最小的图像。

5 实验结果与分析

为验证本文所述方法的有效性, 搭建如图 3(a) 所示的实验光路图, 通过旋转散射介质后的偏振片, 采集不同偏振方位角的散斑图样. 实验中采用

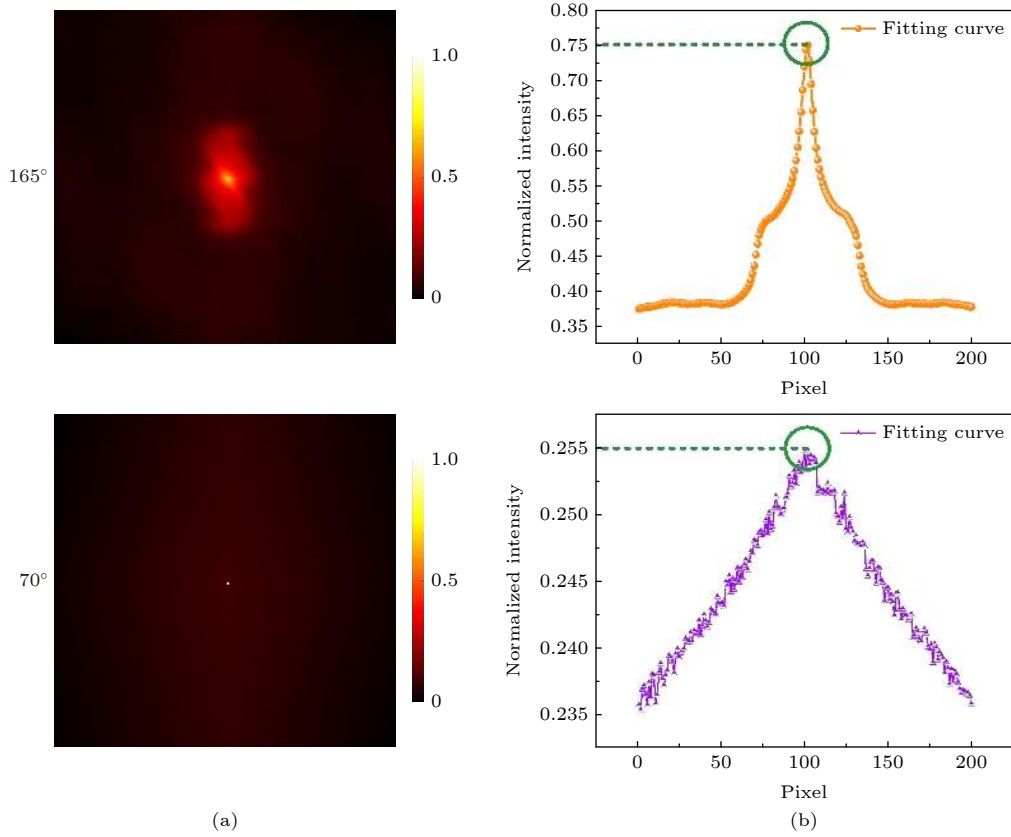


图 6 不同偏振调制的宽谱散斑自相关信息对比图 (a) 散斑场的自相关; (b) 自相关函数中心归一化强度分布曲线

Fig. 6. Autocorrelation images of broadband speckles under two different rotated angles of polarizer: (a) The autocorrelation images of speckles; (b) the normalized intensity curves of the center of autocorrelation images.

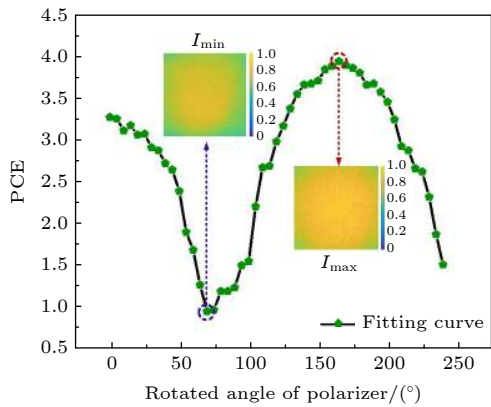


图 7 不同偏振方位角散斑自相关函数的 PCE 曲线

Fig. 7. PCE curve of speckle autocorrelation functions with different rotated angles of polarizer.

中心波长为 632.8 nm、谱宽为 16 nm 的 LED 光源模拟宽谱照明, 数字目标‘2’的大小为 1.5 mm, 散射介质为颗粒度 220 的毛玻璃, 目标与散射介质之间的距离为 60 cm, 探测器位于散射介质后 12 cm 处. 为直观地表示散射介质的光学特性与散射程度, 计算其光学厚度. 根据比尔朗伯定律有:

$$\ln(I_0/I) = (\mu_s + \mu_a)d, \quad (9)$$

式中, I_0 是入射光强度, I 是透过散射介质后的光强, μ_s 与 μ_a 分别为介质的散射系数与吸收系数, d 为介质的物理厚度, $(\mu_s + \mu_a)d$ 即为介质的光学厚度 [28]. 光学厚度越大, 表明光波在介质内部发生散射的次数越多, 即散射程度越强. 经计算, 实验中所用毛玻璃介质的光学厚度为 3.99.

宽谱光源不经偏振调制照射至散射介质所得散斑强度图像、散斑原图的自相关结果, 以及利用 Fienup 型相位恢复算法 [29] 以 0.04 的步长迭代 4 次的重建结果如图 8(a) 所示. 实验中直接采集图像每次只能恢复相应强度信息, 而对于目标的轮廓和细节信息根本无法识别且背景噪声严重. 因此, 在传统的散斑相关散射成像方法中, 为了去除背景噪声提高散斑的对比度, 对采集到的散斑原图进行高斯滤波预处理 [12,17,26], 处理后结果如图 8(b) 所示的散斑图样. 滤波处理可在一定程度上的抑制背景噪声, 对比图 8(a) 的自相关图像可知, 目标的自相关信息较为完整, 轮廓相对清晰, 但是周围的背景噪声干扰依然强烈. 相同的相位恢复算法和迭代次

数下,可以辨识出目标的大致轮廓.相比直接用散斑原图成像的方法,重建结果的对比度有一定的提升,但是无法达到每次迭代都恢复出完整并可识别的目标结构信息,这种散斑预处理的散射成像方法效率低且普适性差.如图 8(c) 所示为本文算法所得的散斑图样、散斑的自相关及重建的结果.相比前两种方法,散斑自相关中的背景噪声得到有效抑制,重建结果清晰可见.不仅视觉效果明显改善,对比度显著提升,而且每次迭代恢复出的目标信息都较为精准,重构出的弯道细节信息完善易分辨且强度值较高.

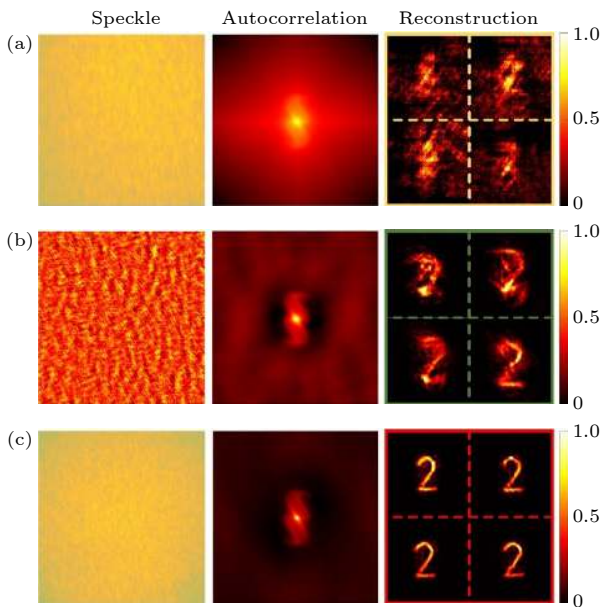


图 8 三种处理方法的重建结果对比图 (a) 散斑原图重建; (b) 传统的散斑相关散射成像方法; (c) 基于散斑光场偏振共模抑制性的宽谱散射成像方法

Fig. 8. Reconstruction images of three different methods: (a) Original speckle reconstruction; (b) traditional speckle correlation imaging method with filter; (c) broadband scattering imaging method based on common-mode rejection of polarization characteristic.

为了深入分析与对比传统的预处理散射成像方法与本文所述宽谱散射成像方法的重建效果,采用两种常用的图像质量客观评估参数:峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)^[30] 和结构相似性 (structural similarity index, SSIM)^[31]. PSNR 能够直观反映出重建目标图像信噪比的变化情况,其值越大,表明图像目标信号与背景噪声的比值越大,图像越清晰.为了更加符合人眼视觉的主观感受,SSIM 指标从图像的亮度、对比度与结构 3 个因素衡量重建目标与原目标的相似度,其值越大则

目标信息的强度值越高,与背景的反差越大则恢复的结构越接近原目标.图 9(a) 所示为两种方法分别重建 20 次结果的 PSNR 对比曲线,显而易见,本文所提方法重建目标的 PSNR 相比传统的预处理散射成像方法提升了近 3 倍,且变化趋势平稳趋于 80 dB(红色曲线),其中 PSNR 最小值为 76.216 dB,均值为 78.278 dB;宽谱照明散斑高斯滤波后重建结果 (蓝色曲线) 的 PSNR 曲线在 20 dB 至 50 dB 之间波动,起伏较大,其中最大值为 44.689 dB 且均值为 34.963 dB.说明本文方法重构目标的清晰度得到显著增强,与此同时,直观反映了该成像方法的稳定性与高效性.从图 9(b) 可知,两种方法重建结果的 SSIM 曲线变化趋势与其对应的 PSNR 曲线几乎吻合,本文所提方法的 SSIM 数值基本都接近于 1,且在 0.95 附近小幅度变动 (红色曲线),均值为 0.966;传统的预处理散射成像方法重建结果的 SSIM 最大数值为 0.85,最小为 0.66,且均值为 0.770,数据跨度范围与波动较大 (蓝色曲线).

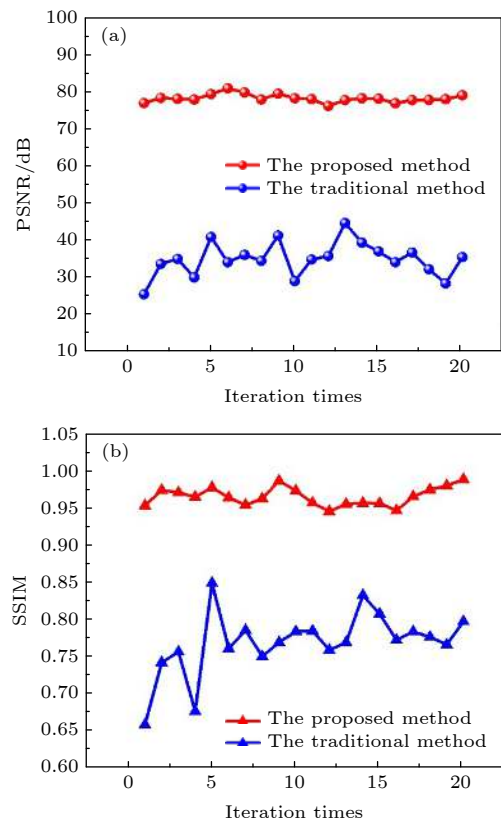


图 9 传统的预处理散射成像与本文所述宽谱散射成像方法重建结果的分析对比曲线 (a) PSNR 对比曲线; (b) SSIM 对比曲线

Fig. 9. The PSNR and SSIM curves of reconstructions using traditional scattering imaging method and the proposed method: (a) PSNR curves; (b) SSIM curves.

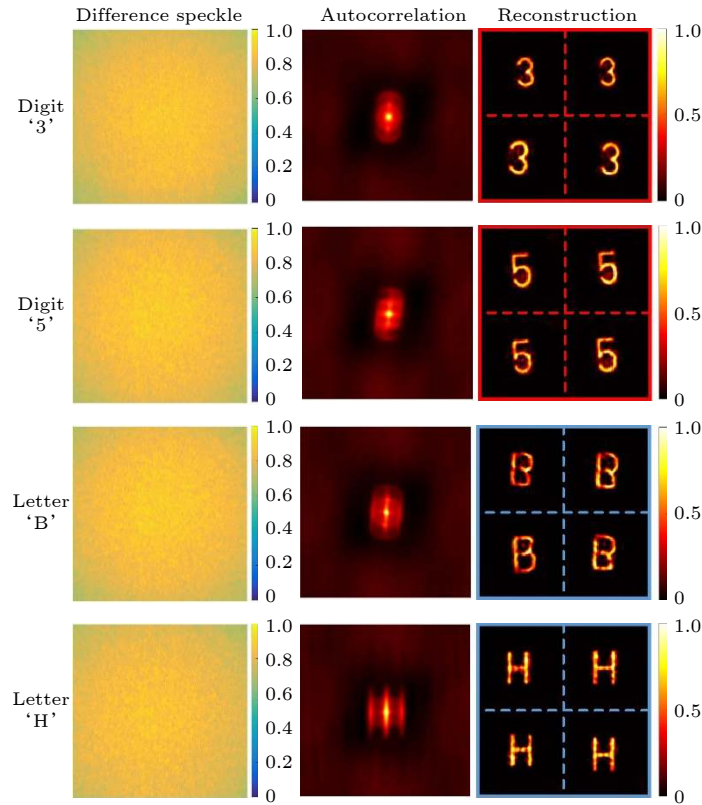


图 10 不同目标在本文所述宽谱散射成像方法的实验结果

Fig. 10. Reconstruction images of different objects using the proposed method.

这都表明经本文所提方法重建后, 图像质量与目标重构效率都有显著提升, 尤其在图像亮度、对比度和结构及背景噪声抑制方面, 并且与图像主观评价和分析结果一致. 在此基础上, 为验证所述方法的普适性, 实验中选取了多个不同类型的目标. 结果如图 10 所示, 对于不同的数字目标及相对复杂的字母目标都能实现清晰成像.

6 结 论

针对宽谱照明下透过散射介质无法清晰成像的问题, 提出了基于散斑光场偏振共模抑制性的宽谱散射成像方法. 本文深入挖掘宽谱散斑光场的偏振特性, 利用散斑场中目标信号与背景噪声在偏振域内的差异性和独立性, 结合散斑光场强度自相关分析模型, 获取目标信息和背景噪声分别占优的偏振方位角图像. 此外, 通过偏振共模抑制特性建立了偏振散斑差分成像模型, 实现了散斑光场中目标信息的精确解译和利用. 实验结果表明, 该方法能够有效移除由光源谱宽引起的背景噪声, 重建高对比度、高信噪比的清晰目标图像. 与传统的散斑相关成像技术相比, 该方法可从宽谱散斑光场中稳

定、高效地重构隐藏目标的轮廓与细节信息, 并且对于不同类型的目标具备稳定性与普适性. 该技术为宽谱照明散射成像技术的应用提供了理论支持, 也为透过散射介质的被动式成像奠定了良好基础.

参考文献

- [1] Goodman J W 2007 *Speckle phenomena in optics: theory and applications* (Englewood: Roberts & Company) pp1–6
- [2] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, Fink M, Boccarda A C, Gigan S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 100601
- [3] Popoff S M, Lerosey G, Fink M, Boccarda A C, Gigan S 2010 *Nat. Commun.* **1** 1
- [4] Liu J T, Wang J N, Li W, Sun X Y, Zhu L, Guo C F, Shao X P 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 6900811
- [5] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, Lagendijk A, Vos W L, Mosk A P 2012 *Nature* **491** 232
- [6] Wang G, Liu J T, Sun X Y, He S F, Guo C F, Wu Y X, Shao X P 2020 *Opt. Commun.* **463** 125361
- [7] He H X, Guan Y F, Zhou J Y 2013 *Opt. Express* **21** 12539
- [8] Horstmeyer R, Ruan H, Yang C 2015 *Nat. Photonics* **9** 563
- [9] Wan L, Chen Z, Huang H, Pu J X 2016 *Appl. Phys. B* **122** 1
- [10] Xu X Q, Xie X S, He H X, Zhuang H C, Zhou J Y, Thendiyammal A, Mosk A P 2017 *Opt. Express* **25** 32829
- [11] Liu J T, Li W, Wu Y X, He S F, Xia M R, Liang W H, Fan Z Z, Song Y F, Shao X P 2021 *Laser & Optoelectronics Progress* **58** 1
- [12] Katz O, Heidmann P, Fink M, Gigan S 2014 *Nat. Photonics* **8**

784

- [13] Feng S C, Kane C, A. Lee P, Stone A 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 834
- [14] Freund I, Rosenbluh M, Feng S C 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2328
- [15] Dai W J 2015 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [代伟佳 2015 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [16] Wu P F, Liang Z, Zhao X, Su L, Song L P, 2017 *Appl. Opt.* **56** 3335
- [17] Li H J 2017 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [李慧娟 2017 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [18] Li H J, Wu T F, Liu J T, Gong C M, Shao X P 2016 *Appl. Opt.* **55** 9731
- [19] Guo C F, Liu J T, Wu T F, Zhu L, Shao X P 2018 *Appl. Opt.* **57** 905
- [20] Fienup J R 1978 *Opt. Lett.* **3** 27
- [21] Goodman J W 2007 *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* (Englewood: Roberts & Company) pp40–42
- [22] Kadambi A, Taamazyan V, Shi B X, Raskar R 2017 *Int. J. Comput. Vision* **125** 34
- [23] Liu B, Zhao P X, Zhao X, Luo Y, Zhang L C 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 184202 (in Chinese) [刘宾, 赵鹏翔, 赵霞, 罗悦, 张立超 2020 物理学报 **69** 184202]
- [24] Liu F, Wei Y, Han P L, Yang K, Bai L, Shao X P 2019 *Opt. Express* **27** 3629
- [25] T'yo J S 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 359
- [26] Wu T F 2017 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [吴腾飞 2017 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [27] Kumar B V K V, Shi W, Hendrix C 1990 *Opt. Lett.* **15** 807
- [28] Han P L, Liu F, Zhang G, Tao Y, Shao X P 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 054202 (in Chinese) [韩平丽, 刘飞, 张广, 陶禹, 邵晓鹏 2018 物理学报 **67** 054202]
- [29] Fienup J R 1982 *Appl. Opt.* **21** 2758
- [30] Gan H P, Zhang T, Hua Y, Shu J, He L J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 038402 (in Chinese) [干红平, 张涛, 花隼, 舒君, 何立军 2021 物理学报 **70** 038402]
- [31] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, Simoncelli E P 2004 *IEEE Trans. Image Process.* **13** 600

Broadband scattering imaging technology based on common-mode rejection of polarization characteristic*

Sun Xue-Ying¹⁾²⁾ Liu Fei^{1)2)3)†} Duan Jing-Bo¹⁾²⁾Niu Geng-Tian¹⁾²⁾ Shao Xiao-Peng¹⁾²⁾³⁾1) (*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)2) (*Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xidian University, Xi'an 710071, China*)3) (*Interdisciplinary Research Center on Advanced Optics and Perception, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(Received 13 April 2021; revised manuscript received 2 June 2021)

Abstract

Owing to the inhomogeneity of the refractive index inside the sample (e.g. biological tissue) or on the surface of the sample (e.g. ground glass), light will be strongly scattered when it propagates through the sample. Therefore, we can hardly obtain the information about the objects behind the scattering medium, except for only a complex speckle pattern. To date, many approaches to realize focusing and imaging through scattering medium have been put forward. The traditional method mainly utilizes ballistic photons for imaging through scattering medium. Since the ballistic light is attenuated exponentially with the increase of depth of propagation in the scattering medium, the reconstruction from the speckle formed by scattered light is more conducive to practicability such as deep biomedical imaging. Typically, the wavefront shaping, optical transmission matrix and speckle correlation techniques which can successfully recover hidden object from the speckle, are valuable in biomedical imaging field. However, both optical transmission matrix and wavefront shaping rely on the coherence of light waves. The physical model of speckle correlation imaging is limited by the similarity of the point spread function of the imaging system. Thus, it is restrictive to achieve imaging through random scattering medium with broadband light illumination by using the current techniques.

In this paper, we present a broadband scattering imaging method based on common-mode rejection of polarization characteristic. In order to solve the problem that current scattering imaging methods are limited by the spectral width of the light source illumination, the polarization characteristic of the speckle field is explored in depth. We qualitatively analyze the difference in polarization information between the hidden object and the background noise in the speckle field. Notably, owing to the differences among autocorrelation functions of the speckle field intensity with different rotate angles of polarization, we can obtain two images where the object information contained in the speckle field and the background noise are dominant. Specifically, two speckle patterns are selected according to the maximum value and minimum value of the peak-to-correlation energy of the different speckles' intensity autocorrelation. Afterwards, the serious background noise caused by the broadband light illumination is significantly suppressed by using polarization speckle difference imaging, and then the hidden object is reconstructed, with basic phase retrieval algorithm combined.

Comparison with conventional speckle correlation imaging technique, the value of peak signal-to-noise ratio and structural similarity index of reconstructions through using the proposed method are improved significantly, and the fitting curves are stabilized. Emphatically, the background noise item is physically handled by developing a novel physical imaging model. Furthermore, the proposed method is highly efficient and universal to recover different types of the hidden objects with better quality under broadband light illumination. Therefore, the proposed method has more potential applications in scattering imaging and biomedical imaging.

Keywords: broadband scattering imaging, polarization, difference imaging

PACS: 42.25.Fx, 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.70.20210703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975254, 62005203, 62075175).

† Corresponding author. E-mail: feiliu@xidian.edu.cn