

# 光学学报

## 基于光学记忆效应的多光谱散射成像方法

黄峰<sup>1,2</sup>, 林彬彬<sup>1,2</sup>, 吴衍誉<sup>2\*</sup>, 林惠芳<sup>2</sup>, 詹郝敏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350108;

<sup>2</sup>福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108

**摘要** 光在透过散射介质后发生散射现象,在成像系统焦平面形成无序的随机散斑图像,因此人们无法直接观测到隐藏在散射介质后的目标的图像信息与光谱信息。利用基于光学记忆效应的散斑相关成像技术,可以实现透过散射介质的目标重建,但当前研究主要针对单波段照明条件下的图像信息恢复,而目标的光谱信息在成像过程中易丢失。提出采用快照式微滤光片阵列多光谱探测器进行多光谱散射成像的方案,通过实验得到宽谱氙光源照明条件下的穿透散射介质成像结果。提出了基于光学记忆效应的穿透散射介质目标多光谱信息重构方法,实现了对隐藏在散射介质之后的目标多光谱信息的探测成像。针对多光谱探测器所造成的成像质量差的问题,提出了利用自相关预处理方法提升穿透散射介质多光谱成像质量的方法。

**关键词** 成像系统; 散斑相关成像; 快照式多光谱探测器; 光学记忆效应; 散射介质

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0611002

## Multi-Spectral Scattering Imaging Method Based on Optical Memory Effect

Huang Feng<sup>1,2</sup>, Lin Binbin<sup>1,2</sup>, Wu Xianyu<sup>2\*</sup>, Lin Huifang<sup>2</sup>, Zhan Haomin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

**Abstract** Light passing through scattering medium will be scattered and result in a random speckle pattern on the focal plane of an imaging system. So we cannot directly observe the spatial and multi-spectral information of an object behind the scattering medium. Optical memory effect based speckle correlation imaging can realize the reconstruction of the object passing through the scattering medium. However, the previous research mainly focuses on the reconstruction of images at a single wavelength, and the spectral information of targets is easily dropped during the imaging process. In this paper, a multi-spectral scattering imaging method using snapshot micro-filter array multi-spectral detectors is proposed, and the imaging results of objects passing through the scattering medium under the wide-spectrum xenon light source illumination are obtained experimentally. A method of multi-spectral information reconstruction for objects passing through the scattering medium based on optical memory effect is proposed, and the detection imaging of multispectral information hidden behind the scattering medium is realized. Since the multi-spectral detectors provide low imaging quality, an image pre-processing method is proposed based on the autocorrelation to improve multispectral imaging quality of penetrating scattering media.

**Key words** imaging systems; speckle correlation imaging; snapshot multi-spectral detector; optical memory effect; scattering medium

收稿日期: 2021-08-25; 修回日期: 2021-09-20; 录用日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(62005049)、福建省中青年教育科研项目(JAT90005)

通信作者: \*xwu@fzu.edu.cn

## 1 引言

光学成像是获取信息的重要途径之一。光束入射到散射介质中时,因介质表面或内部折射率分布不均而被大量地随机散射开来,在探测系统焦平面形成无序的随机散斑图像<sup>[1]</sup>,因此传统的成像方法不再适用。近年来,国内外研究人员致力于穿透散射介质成像研究,提出了许多克服散射成像的方法,这些方法在安防监控、生物医学成像和水下成像等领域具有重要意义<sup>[2]</sup>。

目前,透过散射介质成像的方法主要有自适应光学成像技术、波前整形技术、散斑相关成像技术等<sup>[3]</sup>。自适应光学成像技术<sup>[4]</sup>利用目标周围的标准信号光,通过产生的波前变形实时补偿大气扰动所带来的波前误差;波前整形技术<sup>[5-6]</sup>是通过空间光调制器加载特定的灰度图,从而校正被散射介质扰乱的波前。这些方法需要复杂的反馈控制系统,耗时长且对系统的稳定性要求较高。近年来,基于光学记忆效应的散斑相关成像技术由于具有采用非相干光照明、无需复杂的光场调控、非侵入式且快捷的特点而迅速成为散射成像领域的研究热点<sup>[7]</sup>。1988年, Freund 等<sup>[8]</sup>通过实验证明了光学记忆效应的存在,并对其进行了定量分析。2012年, Bertolotti 等<sup>[9]</sup>利用光学记忆效应对散射介质后的目标实现了非侵入式成像,这使得穿透散射介质成像不再受限于先验信息。2014年, Katz 等<sup>[10]</sup>提出了基于光学记忆效应的单帧散斑相关成像方法,该方法有效缩短了数据采集时间,简单高效地实现了透过散射介质成像。2018年, Guo 等<sup>[11]</sup>通过散斑相关技术实现了运动目标的追踪成像。2020年,王歆等<sup>[12]</sup>利用

点扩展函数(PSF)实现了基于多波长照明的透过散射介质成像。

但当前的研究主要是在单一波段照明条件下对隐藏在散射介质后的目标物体的二维图像信息进行还原。而目标的光谱信息作为分析其物理性质和化学构成的一个重要内容,受光学记忆效应范围与波长限制的影响,在成像过程中难以被恢复。为了更好地探究散射介质后隐藏的带有光谱信息目标的恢复,本文采用快照式多光谱探测器进行基于光学记忆效应的多光谱散射成像方法研究,利用多光谱探测器的一次曝光可获得多个波段的散斑图像的优势,对目标光谱图像信息进行了计算重建,实现了对具有光谱信息的小尺度目标的穿透散射介质成像。对多光谱探测器的成像特性及其所引入的图像噪声进行了进一步分析,提出了一种预处理方法以对散斑场自相关图像进行预处理,从而提升了对目标的多光谱计算成像质量。

## 2 基本原理

透过散射介质成像与传统的光学成像不同,入射光进入散射介质后发生多重随机散射,使得出射光到达探测器表面时不再呈现目标的像,而是形成杂乱无序的散斑图像。在光学记忆效应范围内,散斑图像之间具有高度相关性。基于散斑相关的成像系统可以看成是一个具有空间位移不变 PSF 的线性成像系统,其成像原理如图 1 所示。相机捕获的散斑图像  $I(\theta)$  可以看成是目标场  $O(\theta)$  与成像系统的点扩展函数  $S(\theta)$  的卷积<sup>[10]</sup>:

$$I(\theta) = O(\theta) * S(\theta), \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为入射光移动的角度;  $*$  为卷积运算。

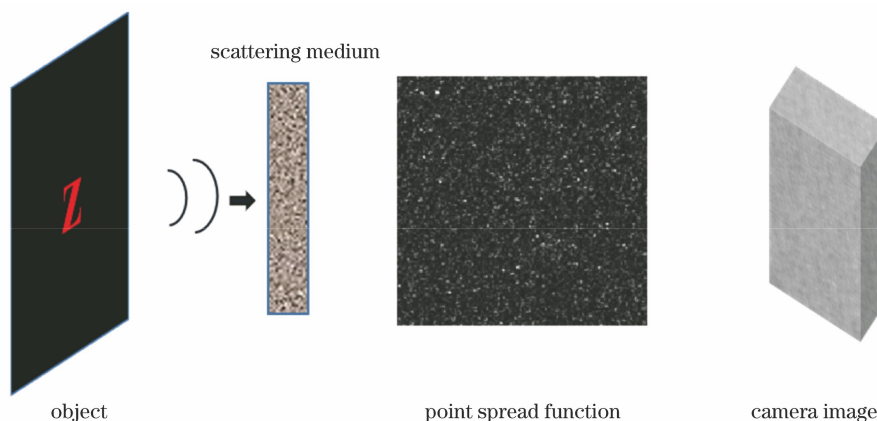


图 1 基于散斑相关性的透过散射介质成像原理图

Fig. 1 Schematic of imaging of light passing through scattering media based on speckle correlation

对相机捕获的散斑图像做自相关运算:

$$I(\theta) \star I(\theta) = [O(\theta) \star S(\theta)] \star [O(\theta) \star S(\theta)], \quad (2)$$

$$I(\theta) \star I(\theta) = [O(\theta) \star O(\theta)] \star [S(\theta) \star S(\theta)], \quad (3)$$

式中:  $\star$  为自相关运算。

在光学记忆效应范围内,散斑场是高度相关的,因此系统点扩展函数的自相关将是一个类  $\delta$  函数<sup>[9]</sup>, (3)式可以简化为

$$I(\theta) \star I(\theta) = [O(\theta) \star O(\theta)] + C, \quad (4)$$

式中:  $C$  为背景噪声。由(4)式可以看出,除去背景常数项后,散斑场的自相关与隐藏目标的自相关是几乎一致的。因此可以通过计算散斑场的自相关得到目标的信息。

根据维纳-辛钦定理,信号的功率谱密度是其自相关函数的傅里叶变换,即目标物体的功率谱可以通过计算它的自相关的傅里叶变换,再求其傅里叶变换的幅值而得到。因此,可以通过计算散斑的自相关得到目标的幅值信息:

$$\mathcal{F}[I \star I] = \mathcal{F}[O \star O] = |\mathcal{F}\{O\}|^2. \quad (5)$$

通过计算散斑的自相关,可以得到隐藏在散射介质后目标的幅值信息,但无法得到目标的相位信息,因此无法对目标进行还原。本文通过迭代 Fienup 型相位恢复算法进行相位恢复<sup>[13]</sup>,实现对目标图像的恢复。

本研究采用 Ximea 公司生产的 16 波段快照式多光谱探测器进行不同条件下基于光学记忆效应的多光谱散射成像研究。微纳结构滤光片以  $4 \times 4$  阵列微元的形式镀在探测器的像元上,各光谱通道的中心波长如图 2 所示,各通道设计带宽为 10 nm。探测器面阵规模为 2048 pixel  $\times$  1088 pixel,像元尺寸为  $5.55 \mu\text{m}$ ,单波段面阵规模为 512 pixel  $\times$  272 pixel。快照式多光谱探测器的优势在于通过捕获一帧多光谱图像便可同时获得 16 个不同光谱通道的信息,从而保证了所采集散斑图像中多光谱信息的同步性与实时性<sup>[14-15]</sup>。但受微滤光器阵列加工工艺的影响,多光谱探测器的各像素中心波长分布与光谱响应曲线仍不理想,探测器各光谱通道的实际指标参数与设计参数存在较大差异。

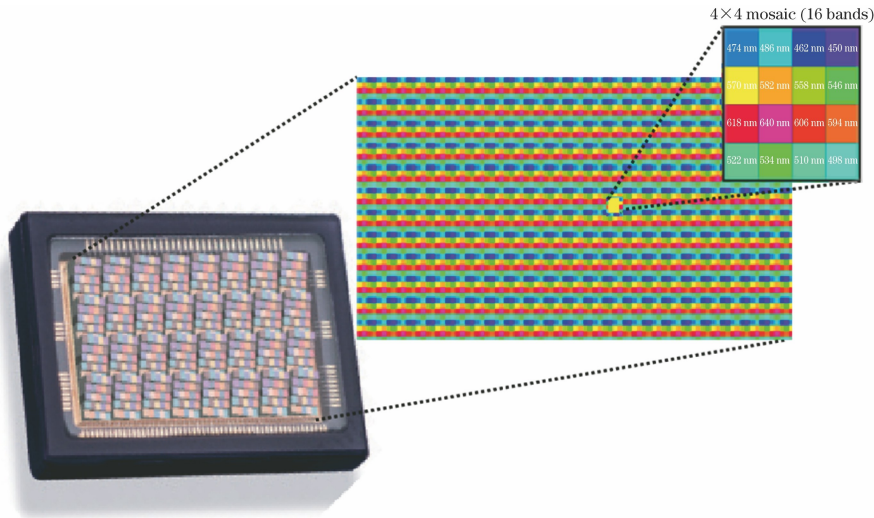


图 2 马赛克型集成滤光片分光原理

Fig. 2 Spectral theory of mosaic integrated filter

### 3 基于宽光谱光源的多光谱散斑相关成像

本文所搭建的基于光学记忆效应的多光谱散斑相关成像系统如图 3 所示。图 3 中最左侧设备为实验所采用的氙灯宽光谱照明光源(型号 GLORIA-X150A, 额定功率为 150 W, 光谱范围为 200~2500 nm)。在光源后设置一个孔径光阑用于限制光源的光斑大小,透射式二值目标“Z”的厚度为 1.75 mm;目标到

散射介质的物距为 225 mm,散射介质到多光谱探测器间的像距为 52 mm,形成的散斑在多光谱探测器上被捕获。

#### 3.1 基于氙灯光源的散斑相关成像

实验一利用宽光谱氙灯作为实验照明光源,实验装置与探测器的成像结果如图 4 所示。图 4(a)为在实验室内搭建的实验系统;图 4(b)为单次成像实验中多光谱探测器所捕获的 16 通道多光谱散斑图像;图 4(c)展示了图 4(b)中图像经分解处理后所



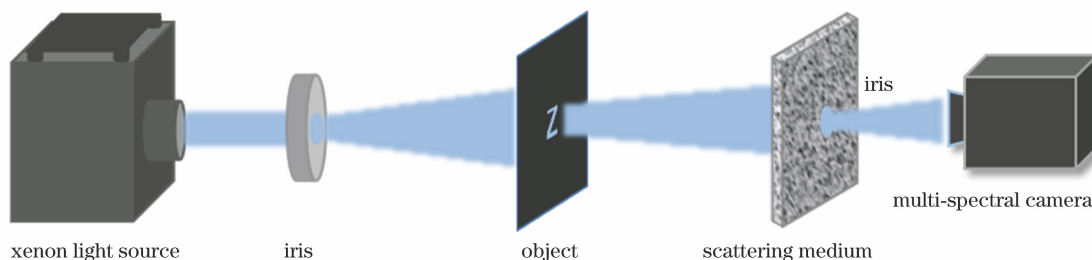


图 3 基于光学记忆效应的多光谱散射成像实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for multi-spectral imaging based on optical memory effect

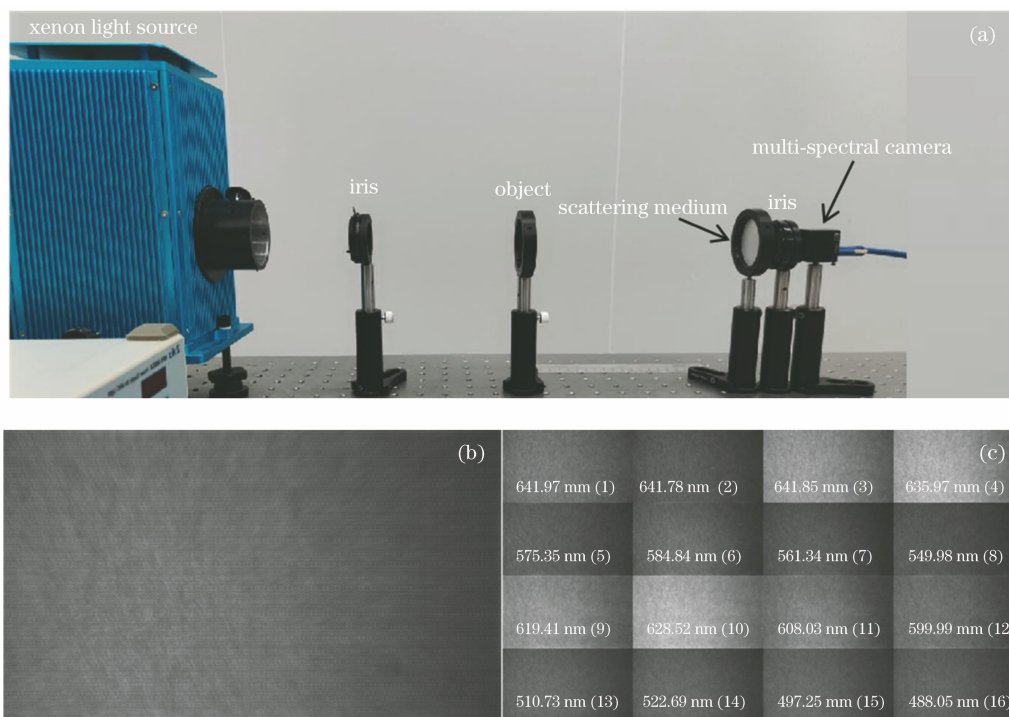


图 4 利用氙灯光源进行散射成像实验。(a)实验光路示意图;(b)多光谱探测器上捕获的散斑图;(c)各个波段的散斑图

Fig. 4 Scattering imaging experiment using xenon lamp. (a) Diagram of experimental light path; (b) speckle pattern captured by multi-spectral detector; (c) speckle pattern of each band

获得的 16 个不同波段的散斑图像,各波段中心波长及对应编号如图 4(c)中各子图像左下角所示。受探测器与微滤光器阵列制造工艺的限制,目前无法实现各微滤光器中心波长的均匀分布。

因为氙灯光源的光谱范围涵盖了多光谱探测器的光谱响应范围,多光谱探测器通过单次拍摄即可获得同一时刻、相同二维空间探测区域内的 16 个不同波段的光谱信息以及空间信息。利用多光谱探测器捕获目标物体透过散射介质后的散斑图,经过处理可以获得各个单一光谱通道的散斑图。因为各波段的散斑图像均包含目标空间信息,通过对散斑图像进行计算重构即可实现对目标空间的还原。

选取 6 个波段的图像重构结果进行展示,如图 5 所示。I~VI 6 列分别是对中心波长在 488~

642 nm 范围内的 6 组散斑图进行目标重构的过程。其中,图 5(a)~(f)是不同的散斑图;图 5(g)~(l)为对应的散斑自相关图;图 5(m)~(r)为能量谱图像;图 5(s)~(x)是对应的目标重建图像。

从图 5 可见,在氙灯光源照明条件下的多光谱成像实验中,利用不同波段的散斑图都可恢复出目标图像。这与单波段的散斑成像实验结果相同,利用多光谱探测器与宽谱光源同样可以实现透过散射介质的散斑相关成像。此外,从图 5 可以看到不同波长对应的成像效果不同,这主要是因为光学记忆效应的范围受波长的影响和微纳结构滤光片阵列的光谱透过率曲线的影响。更重要的是,与单一波段的散斑成像不同,多光谱探测器因其微纳结构滤光片阵列具有特殊的阵列式排布特性,采集相同波段

光谱信息的像素并将其在探测器焦平面按间隔 4 pixel 进行排列,所捕获的图像经散斑自相关处理

后出现了明显的中央十字亮线噪声,这一特性使得计算重构后图像的背景噪声也很大。

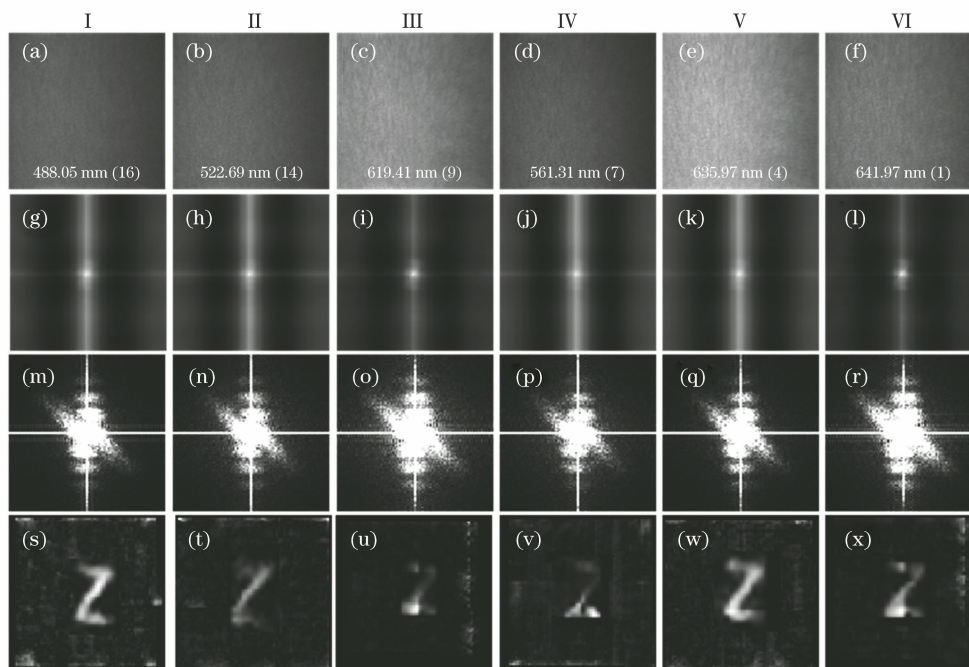


图 5 基于氙灯光源的成像实验结果。(a)~(f)不同波段的散斑图;(g)~(l)自相关图像;(m)~(r)能量谱;(s)~(x)目标重建图像(目标图像放大 2 倍)

Fig. 5 Results of imaging experiment based on xenon light source. (a)–(f) Speckle pattern of each band; (g)–(l) autocorrelation images; (m)–(r) power spectra; (s)–(x) reconstructed images of object (image is doubled in size)

如图 6 所示,在重构出的目标图像中,选取中心波长分别为 488 nm、522 nm 和 641 nm 三个不同光谱通道的图像用于构建伪彩图像,所合成的图像如图 6(d)所示。方框中图像是对目标“Z”所重构出的图案。实验中,氙灯照明光束透过目标“Z”后照射

于散射介质,因此可将目标“Z”作为一个白色成像目标。实验表明,利用快照式多光谱探测器进行散斑相关成像实验,不仅可将隐藏在散射介质后目标的二维空间信息进行恢复,并且可以获取目标的多光谱图像信息。

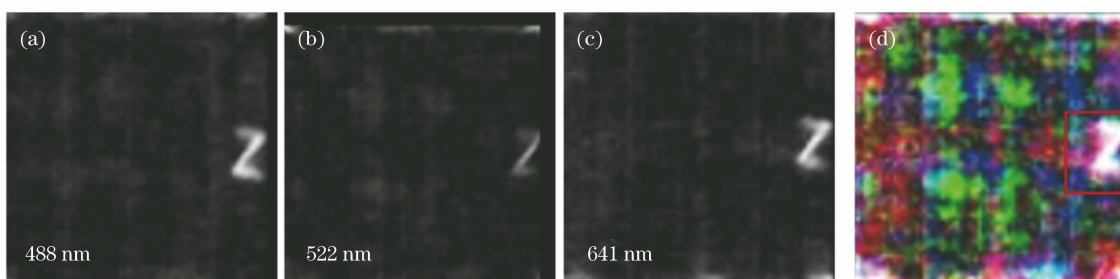


图 6 选取三个波段的还原图像进行彩色处理的结果。(a) 488 nm; (b) 522 nm; (c) 641 nm; (d) RGB

Fig. 6 Results of color processing of restored images in three bands. (a) 488 nm; (b) 522 nm; (c) 641 nm; (d) RGB

### 3.2 透过散射介质多光谱成像系统噪声分析

图 7 显示了模拟多光谱图像受网格状噪声影响后经自相关处理的结果,叠加网格噪声的散斑图在自相关处理后显示出十分明显的十字噪声。从图 5 可见,在多光谱散射图像处理过程中,自相关图像中存在较大的噪声,进而影响了目标图像的计算重构质量。从多光谱探测器的分光谱成像原理可

知,不同波长间的光学薄膜边缘存在阶跃,且相同中心波长的像素间存在特定的间隔,探测器直接采集的图像中存在网状噪声,如图 7(d)所示。因此,经拆分波段处理后的单波段散斑图图像的自相关图像中存在明显的十字噪声<sup>[16]</sup>,如图 7(f)所示。自相关图像中的噪声对所恢复目标图像的质量存在较大的影响。

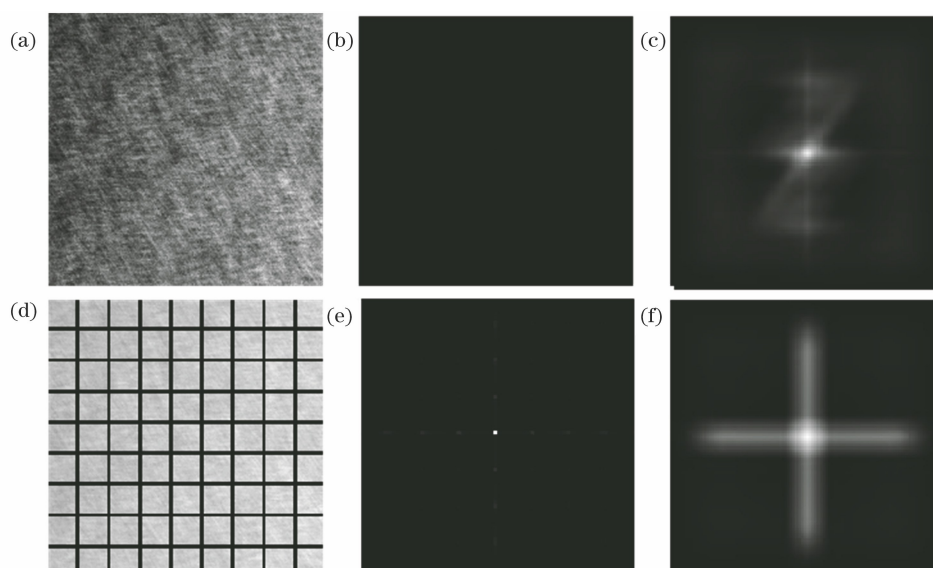


图 7 模拟结果。(a)散斑;(b)图 7(a)的频谱;(c)图 7(a)的自相关;(d)散斑图叠加网格;  
(e)图 7(d)的频谱;(f)图 7(d)的自相关

Fig. 7 Simulation results. (a) Speckle pattern; (b) spectrum of Fig. 7(a); (c) autocorrelation of Fig. 7(a);  
(d) superimposed meshes of speckle pattern; (e) spectrum of Fig. 7(d); (f) autocorrelation of Fig. 7(d)

为了更好地验证所重构图像中噪声的来源,设置了以下实验。如图 8 所示,波长为 532 nm、功率为 10 mW 的激光经扩束准直后照射到旋转毛玻璃,生成赝热光源照明目标,通过散射介质后携带目标信息的散斑图在 CMOS 探测器 (GS3-U3-51S5M-C, FLIR) 上被捕获。在数据处理过程中,首先模拟多光

谱探测器数据的分波段预处理方法,按一定的像素间距  $\Delta$  对图像进行采样,然后按照散斑自相关的处理方法恢复目标图像。实验结果如图 9 所示,通过对比间隔采样处理与无间隔采样处理的单帧散斑成像结果,验证了多光谱散射成像的十字噪声受到了探测器阵列式微滤光片结构和数据分波段处理过程的影响。

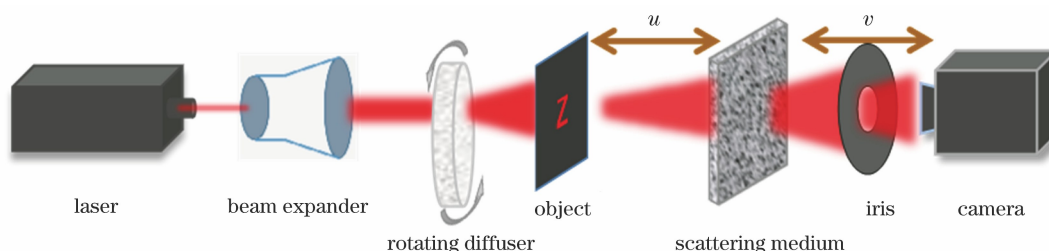


图 8 基于光学记忆效应的单帧散斑成像的实验装置

Fig. 8 Experimental setup for single-frame speckle imaging based on optical memory effect

如图 9(a)~(d)所示,在采样间隔  $\Delta=0$  的单帧散斑成像实验结果中,目标自相关与重构图像的结构完整性与图像质量较好,目标分辨率高。在此基础上进行了三组间隔采样实验,针对图 9(a)中原始散斑图像进行间隔采样,采样间隔  $\Delta$  分别设为 2, 4, 8, 生成新的散斑图如图 9(e)、(i)、(m) 所示,这三个图对应的目标恢复图像如图 9(h)、(l) 和 (p) 所示,随着间隔  $\Delta$  的增大,恢复图像中的噪声逐渐增强,信噪比下降明显。在采样间隔  $\Delta=4$  时,图 9(j) 中散斑自相关以及图 9(k) 中频谱图都出现十字噪声;当采样间隔  $\Delta=8$  时,图 9(n) 中散斑自相关和图 9(o) 中

频谱图的十字噪声已经非常明显,成像的质量大幅下降。图 9 中的噪声与多光谱探测器中出现的噪声高度一致,证明多光谱成像中的十字噪声是由多光谱探测器微滤光片阵列的固有结构引入的。

### 3.3 透过散射介质多光谱成像系统噪声处理

根据上述实验分析,透过散射介质的多光谱成像中出现的十字噪声是由探测器的阵列式微滤光器结构引入的。观察图 9 中散斑的自相关图像可知,噪声主要集中在水平与垂直方向的中心线上,即十字部分,但目标的自相关部分仍然是图像中亮度最高的区域。针对这类背景噪声的特点,提出了对自



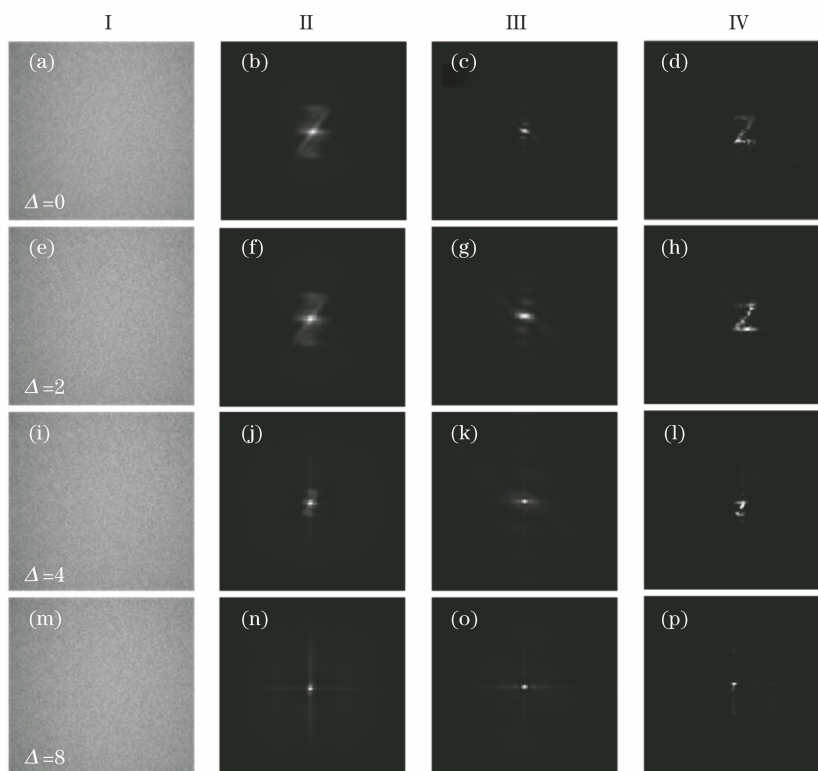


图 9 散斑间隔采样噪声验证实验结果。(a)~(d)采样间隔  $\Delta$  为 0;(e)~(h)采样间隔  $\Delta$  为 2;  
(i)~(l)采样间隔  $\Delta$  为 4;(m)~(p)采样间隔  $\Delta$  为 8

Fig. 9 Noise verification experimental results for speckle interval sampling. (a)~(d) Sampling interval  $\Delta$  is 2;  
(e)~(h) Sampling interval  $\Delta$  is 4; (i)~(l) Sampling interval  $\Delta$  is 4; (m)~(p) Sampling interval  $\Delta$  is 8

相关图像进行低通滤波后再进行预处理的方法,以提升所恢复的目标图像的质量。为了减少噪声干扰,取自相关图像中间  $50 \times 50$  个像素点的区域  $\mathbf{B}$ 。对  $\mathbf{B}$  的每一行求均值,并构建一个  $50 \times 50$  矩阵  $\mathbf{M}_r$ ,其各行元素值相同,均等于  $\mathbf{B}$  中对应行的均值:

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{B} - \kappa \mathbf{M}_r, \kappa \in (0, 1). \quad (6)$$

对矩阵  $\mathbf{B}_r$  的每一列求均值,并构建一个  $50 \times 50$  的矩阵  $\mathbf{M}_c$ ,其各列元素值相同,均等于  $\mathbf{B}_r$  中对

应的均值:

$$\mathbf{B}_c = \mathbf{B}_r - \xi \mathbf{M}_c, \xi \in (0, 1). \quad (7)$$

在本文实验中,  $\kappa$  设置为 0.25,  $\xi$  设置为 0.33。再用(7)式中的  $\mathbf{B}_c$  替换自相关图像中心部分  $\mathbf{B}$ 。利用上述预处理方法对图 5 中波段 1(中心波长为 641 nm)的数据进行处理,图 10 为波段 1 数据的散斑自相关图像在预处理前后的光强分布三维图像的对比,可以看出经过预处理之后,光强主要集中在图像中心

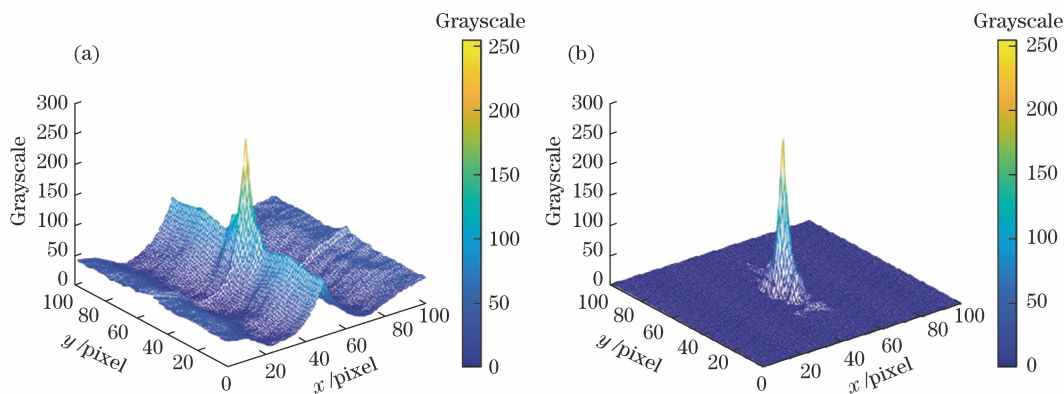


图 10 自相关预处理去噪声前后的光强分布三维图像的对比。(a)去噪声前;(b)去噪声后

Fig. 10 Comparison of 3D images of light intensity distributions before and after noise removal by autocorrelation preprocessing. (a) Before noise removal; (b) after noise removal

部分,周围噪声的起伏变小。

利用上述预处理方法对图 5 中的各波段实验数据进行处理,结合相位还原算法对处理后的自相关图像数据进行还原,实验结果如图 11 所示。可以看出,自相关图像经预处理后,中心的十字噪声得以去除,且目标的自相关信息得到了保留。如图 11(s)~(x)所示,重构出的目标图像的背景噪声明显被去除

且重建图像的质量得到了提高。但预处理方法也存在一些不足,其在降低噪声的同时也同样对有效信息进行处理。预处理过程在消除图像噪声的同时,也去除了图像中的部分高频信息,因此处理后的自相关图像边缘部分的对比度较低,在部分波段的恢复图像中目标边缘存在失真的情况[图 10(s)的图像目标重构效果不如图 5(s)好]。

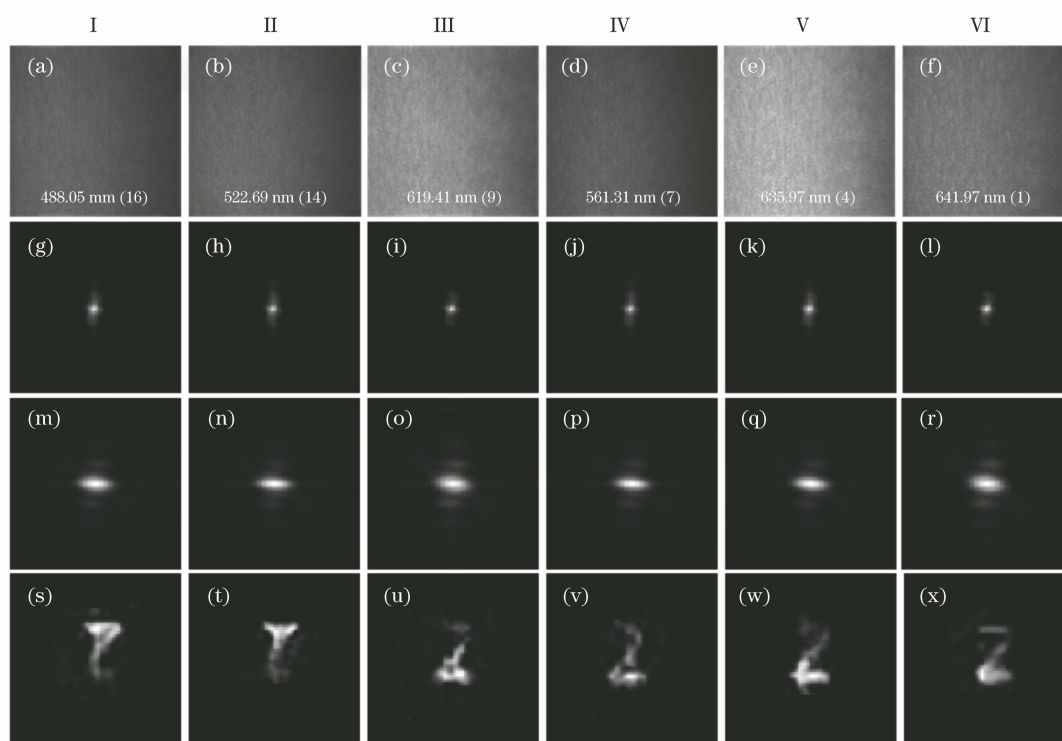


图 11 对氙灯光源照明下产生的散斑图像、自相关图像进行预处理后所获得的 6 个不同波段的实验成像结果。

(a)~(f)不同波段的散斑图;(g)~(l)自相关图像;(m)~(r)能量谱;(s)~(x)目标重建图像(目标图像放大 2 倍)

Fig. 11 Experimental imaging results of 6 different wavebands obtained after preprocessing speckle images and autocorrelation images generated under xenon light source illumination. (a)~(f) Speckle patterns; (g)~(l) autocorrelation images; (m)~(r) power spectra; (s)~(x) reconstructed results of object (image is doubled in size)

## 4 结 论

提出了一种基于光学记忆效应的多光谱散射成像方法。入射光穿过含有光谱信息的目标后通过散射介质传播,利用快照式多光谱探测器采集散斑场多光谱信息,经过计算重构,目标的空间二维信息与光谱信息都可以得到有效的还原。对于多光谱探测器结构与光学特性引起的成像系统信噪比低的问题,采用对自相关图像进行预处理的方法来抑制噪声,以有效地提高成像系统的信噪比与成像质量。所提出的多光谱成像方法可以很有效地扩展到其他的含有光谱信息的小尺度目标,为透过散射介质后的类似目标探测与识别提供了新的思路。

## 参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications[M]. Cao Q Z, Chen J B, Transl. Beijing: Science Press, 2009.  
[美]约瑟夫·古德曼. 光学中的散斑现象:理论与应用[M]. 曹其智, 陈家璧, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] Xu Q H, Sun B Q, Zhao J, et al. Imaging and tracking through scattering medium with low bit depth speckle[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12 (2): 1-7.
- [3] Zhu L, Shao X P. Research progress on scattering imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (1): 0111005.



- 朱磊, 邵晓鹏. 散射成像技术的研究进展[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111005.
- [4] Jiang W H. Adaptive optical technology[J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(1): 7-13.  
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 7-13.
- [5] Katz O, Small E, Silberberg Y. Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light[J]. Nature Photonics, 2012, 6(8): 549-553.
- [6] Vellekoop I M. Feedback-based wavefront shaping[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12189-12206.
- [7] Xie X S, Liu Y K, Liang H W, et al. Speckle correlation imaging: from point spread functions to light field plenoptics[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111004.  
谢向生, 刘忆琨, 梁浩文, 等. 散斑相关成像: 从点扩展函数到光场全要素[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111004.
- [8] 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.
- [9] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. Nature, 2012, 491(7423): 232-234.
- [10] 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.
- [11] Guo C F, Liu J T, Wu T F, et al. Tracking moving targets behind a scattering medium via speckle correlation[J]. Applied Optics, 2018, 57(4): 905-913.
- [12] Wang X, Liu H L, Hu C Y, 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.
- [13] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [14] Xue Q S, Tian Z T, Hao X J, et al. Snapshot hyperspectral analysis of spilled oil thickness based on wavelet analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1730001.  
薛庆生, 田中天, 郝锡杰, 等. 基于小波分析的快照式高光谱海面溢油厚度分析[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1730001.
- [15] Wang Y K, Han G C, Yao B, et al. The research on wide-field hyperspectral imaging technology with UAV[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(7): 876-880.  
王义坤, 韩贵丞, 姚波, 等. 面阵摆扫型无人机载大视场高光谱成像技术研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(7): 876-880.
- [16] Liu Z J, Wang C Y, Wang C. Destriping imaging spectrometer data by an improved moment matching method[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(4): 279-284.  
刘正军, 王长耀, 王成. 成像光谱仪图像条带噪声去除的改进矩匹配方法[J]. 遥感学报, 2002, 6(4): 279-284.