

宽视场远距离光学散射成像技术研究进展

李修建^{1*}, 唐武盛², 衣文军¹, 祁俊力¹¹国防科技大学文理学院, 湖南 长沙 410073;²国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410073

摘要 散射体内部颗粒分布及折射率分布的不均匀对经过散射体的携带目标信息的光子传播造成干扰, 导致直接探测的图像失真。针对该问题, 发展了众多的光学散射成像技术, 实现了部分特定散射介质条件下的目标成像。介绍了基于弹道光优化采集的部分传统散射成像技术的原理, 还介绍了最新发展的计算散射成像技术的基本原理与技术特点。计算散射成像技术正朝着充分利用大光学厚度散射介质引起的非弹道光的方向发展, 其中基于光学记忆效应和相位恢复的算法、相干衍射成像、叠层迭代引擎等计算成像技术可能适应厚散射介质动态变化、目标非稀疏性等特点, 有望应用于宽视场、远距离散射成像领域。

关键词 图像处理; 光学散射成像; 弹道光采集; 非弹道光成像; 宽视场; 远距离; 非稀疏性

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0401012

1 引言

光学图像在军民领域均有不可替代的应用^[1], 如今光学成像技术、器件与系统^[2]发展迅速。然而, 当待探测目标被大光学厚度的云雾烟霾、悬浮尘埃、浑浊水体等散射体遮挡时, 如何有效地获取目标图像成为光学成像领域亟待解决的难题^[3]。

散射体对光信号的传输影响主要包括吸收和散射, 其中散射的影响更大。散射是由于散射体内分布着大量的散射分子或颗粒, 使来自于目标的光波前在穿透散射体的传播过程中受到随机干扰^[3], 导致目标信噪比降低, 无法直接进行成像。穿透散射体光学成像具有应用场景复杂多样^[4-8]、目标距离远、散射体光学厚度大等特点。

为了解决光学散射成像问题, 各种基于弹道光(未散射光子)和非弹道光(散射光子)采集的成像手段都得到了发展。距离选通成像、偏振成像、自适应光学成像等技术手段在天文成像、交通运输、水下探测和生物成像等领域发挥了重要作用^[9-12]。随着计算成像技术的快速发展, 研究人员将散射成像问题和计算成像技术结合起来, 发展出了各种新型散射成

像技术, 如基于波前整形的散射成像技术^[13]、基于光学传输矩阵的散射成像技术^[14]以及基于光学记忆效应(OME)和散斑相关的散射成像技术^[15-16]。其中一些关键问题亟待解决, 如主动相干散射成像还需得到进一步验证^[17], 基于光学记忆效应的成像技术的成像视场狭小^[18], 相位恢复算法的收敛速度慢、解不唯一^[19]且对结构复杂(非稀疏)目标的成像效果差^[20]等。相干衍射成像^[21]、叠层迭代引擎^[22]、关联成像^[23]、非视距成像^[24]等计算成像技术逐步与散射成像需求相结合, 为散射成像技术的发展开辟了新的方向。

本文将首先从基于弹道光优化采集的散射成像技术入手, 介绍其代表性技术和应用场景。然后分析基于非弹道光的计算散射成像技术的最新进展、基本原理、技术优缺点及应用场景, 探讨利用计算成像技术中的代表性方法来解决大光学厚度散射介质条件下的宽视场、远距离、非稀疏目标的光学散射成像问题, 并对未来光学散射成像技术的发展趋势进行展望。

2 基于弹道光优化采集的散射成像技术及其应用

2.1 距离选通散射成像技术

通过控制选通型探测器的选通门打开和关闭的

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-03; 录用日期: 2020-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(62005317, 11704411, 11872070, 12072366)

*E-mail: xjli@nudt.edu.cn

时间,距离选通散射成像能够让探测器只接收来自目标的光子用于曝光成像,屏蔽来自散射介质的主要后向散射光子和其他背景光子,以提升目标成像的信噪比^[25-26]。随着激光器与探测器技术的发展,距离选通散射成像技术广泛应用于远距离目标光学探测、三维光学成像、水下成像等领域^[27-31]。2009年,法国和德国的圣路易斯研究所使用矩形脉冲调制的连续激光二极管阵列作为光源,以像增强探测器进行选通成像,实现了高分辨率的三维图像重建,在距离切片精度为 300 m 时实现距离精度达到 10 m 的重建图像,突破了选通切片厚度的限制,如图 1 所示^[32]。

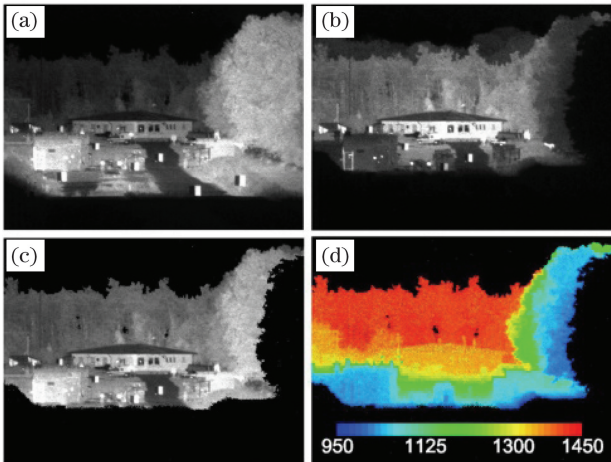


图 1 三维距离选通成像实验结果^[32]。(a) 950 m 处切片成像;(b) 1250 m 处切片成像;(c) 反射率重建图像;(d) 深度重建图像

Fig. 1 Experimental results of 3D distance gated imaging^[32]. (a) 950 m slice imaging; (b) 1250 m slice imaging; (c) reflectivity reconstruction image; (d) depth reconstruction image

距离选通散射成像技术应用于水下成像领域时存在的图像信噪比和对比度低、目标与环境反射率相差大等问题导致重建图像可视化效果差,且存在探测距离接近极限时重建图像空洞化的问题,中国科学院半导体研究所王新伟等^[11]提出了一种基于水中光传播特性的三维去模糊距离选通强度相关成像方法,该方法仅需预知水的衰减系数和参考水体,即可计算选通图像的深度噪声图,进而重建出高精度的高分辨率三维图像。当水体的衰减系数为 0.27 m^{-1} 时,在约 18.5 m (5 个衰减长度) 处拍摄两个平面目标,此时得到的图像信噪比相对较低,其峰值信噪比为 3.7671 dB,经所提方法的处理后,图像的峰值信噪比提升至 7.1494 dB。

距离选通散射成像技术仅能减小由散射介质的后向散射光子和背景光子引起的加性噪声,并不能消除散射介质对目标信号的散射、衰减等引起的乘性干扰。为此,2017年,国防科技大学李修建课题组针对距离选通成像中散射介质对目标信号的非均匀衰减等乘性干扰问题,提出了一种基于激光纵向层析的退化矩阵估计和目标图像重建方法^[33-34]。该方法利用激光纵向层析探测系统对成像链路中的散射介质和目标进行纵向扫描,生成距离谱图像序列,依据目标信号与介质后向散射信号的关联,反演目标信号的退化矩阵,进而应用全变分方法求解得到消除介质乘性干扰的目标图像,如图 2 所示。

但是,当散射介质光学厚度过大、弹道光子比例极低时,距离选通散射成像技术将无法对目标进行探测成像。

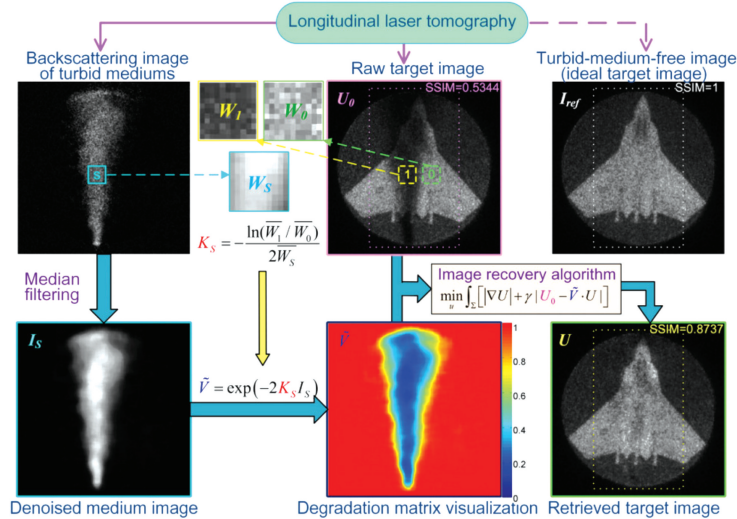


图 2 基于距离谱的目标图像探测和重建方法^[33]

Fig. 2 Detection and reconstruction method of target image based on distance spectrum^[33]

2.2 偏振散射成像技术

哥伦比亚大学的 Schechner 等^[35]于 2003 年最早提出利用偏振成像方法解决散射成像问题,其理论依据是散射光偏振效应,即在云雾、水体等散射颗粒的作用下自然光会被转换成部分线偏振光,他们提出考虑透雾成像时自然偏振效应的成像模型时,能够得到去雾后的场景结构和大气特性信息,进而重构出目标图像,而无需对散射粒子的大小或精确散射机制进行建模。该方法仅需在相机镜头前添加线性偏振片,采集透过偏振片的光强度最大和最小的两幅图片,使用正交差分算法实现去雾成像,所得

结果具有良好的对比度和色彩表现。2005 年, Schechner 等^[36]还将该方法应用于水下成像领域。但是,该方法中大气光偏振度(DPA)的计算依赖天区选择,易受高亮度物体和强光源干扰。2017 年,北京航空航天大学 的 Qu 等^[37]提出了一种不依赖天区的偏振透雾技术,通过使用线偏振器收集三幅偏振图像,计算得到最大和最小强度图像,通过求解大气中光与物体之间相关系数方程的最佳解来计算 DPA,图 3 为该方法的实验结果。该方法不依赖天区选择进行 DPA 计算,拓宽了偏振去雾技术的可能应用场景。



图 3 偏振去雾的实验结果对比^[37]。天区存在时的(a)原始数据和(b) Schechner 型偏振去雾图像;天区不存在时的(c)原始数据和(d)新技术偏振去雾图像

Fig. 3 Comparison of results of polarization dehazing^[37]. (a) Original data and (b) Schechner polarization dehazing image with sky area; (c) original data and (d) polarization dehazing image obtained by new method without sky area

进一步地,2016 年天津大学的胡浩丰团队考虑了物体辐射度对水下成像偏振度的贡献,提出一种基于估算目标信号偏振差分图的水下图像复原方法^[38],改善了重建图像的细节信息,如图 4 所示。

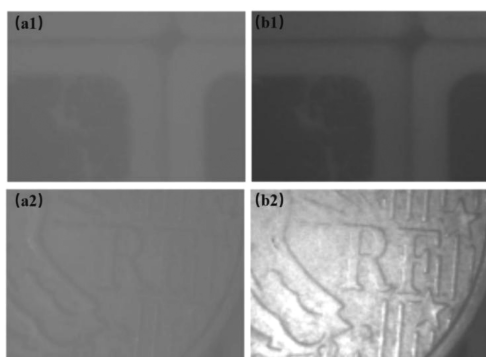


图 4 水下成像方法实验结果放大图^[38]。(a1)(a2)水下原始图像;(b1)(b2)偏振光透水图像

Fig. 4 Magnified views of experimental results obtained by underwater imaging method^[38]. (a1)(a2) Underwater original images; (b1)(b2) underwater images for polarized light

2020 年,海军工程大学的于洪志等^[39]提出了一种全局参数估计的水下主动偏振成像方法,通过偏振光主动照明得到更准确的全局变量后向散射光偏振度,从而得到更好的图像增强测量值。

总之,偏振成像技术利用散射光的偏振特性提高目标图像的信噪比和对比度,能够在对雾霾、浑浊水体等恶劣条件下目标的成像发挥重要作用。但对于偏振特性不显著的散射成像领域以及散射介质光学厚度很大导致弹道光子极少的情况下,该技术效果将难以保证。

2.3 自适应光学散射成像技术

自适应光学最早是由 1953 年海尔天文台的 Babcock 提出^[40],其利用波前探测器对大气散射造成的畸变进行探测,然后通过波前校正器引入反波前畸变,从而实现高质量的成像。1991 年,美国新墨西哥州菲利普实验室的 Fugate 等^[41]借助激光导航星来测量大气波前畸变,使用高脉冲激光、脉冲同步波前传感器和可变形镜组成的自适应调整器件,对 1.5 m 望远镜进行了连续实时大气补偿,仅用 1 s 的曝光时间即可分辨大熊座 53 ξ 双星(间隔 1.3'')。

通常,自适应光学系统的校正性能由可变形镜生成 Zernike 模式的数量来决定,但受可变形镜制作工艺的限制,生成的 Zernike 模式不够精确且数量有限,进而造成自适应光学系统校正性能的降低。为此,2020 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 Jin 等^[42]提出一种基于可变形镜本征模估计校正大气湍流性能的方法,提升了自适应系统的校

正精度,且该方案中的驱动器数量减少,系统的复杂

度和成本得到降低,结果如图 5 所示。

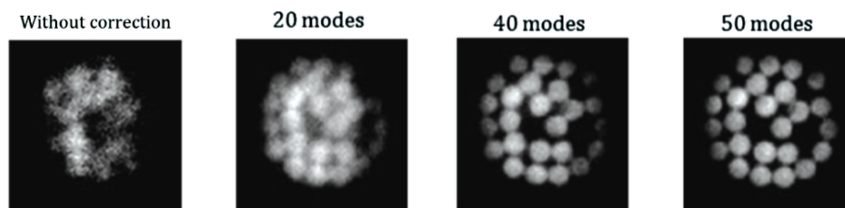


图 5 光纤束未校正图像及不同本征模下的校正图像^[42]

Fig. 5 Image of fiber bundle without correction and images after correction with different modes^[42]

2015 年,波士顿大学的 Li 等^[43]提出了一种适用于宽视场非扫描显微镜的共轭自适应光学成像技术,将其成功应用于生物观测领域。他们通过使用分区孔径波前技术开发了一种性能更优良的波前传感器,并在显微镜光路中插入了一个有源光学校正元件,该传感器可在不使用导航星的情况下提供像差校正功能,可工作于相对非准直的光照下,拥有大动态范围和宽成像视场。

上述技术属于光瞳自适应光学技术范畴,波前畸变校正元件放置在物镜后表面的共轭面上,这些技术仅适用于空不变像差,校正后的视场往往会被限制在中心处导航星周围较小的区域内,因此成像视场通常较小。针对这一缺陷,设计共轭自适应光学技术中,波前畸变校正元件与散射物体样本共轭,随着像差空间位置的变化进行波前畸变校正,校正后的视场较大。2019 年浙江大学的 Zhao 等^[44]提出了一种多导航星共轭自适应光学校正方法,利用多个导航星增加了光瞳自适应光学方法的校正面积,提高了校正效率,如图 6 所示,对于厚度为 120 μm 的小鼠脑组织,利用该方法校正后的视场尺寸可增加到光瞳自适应光学技术的 243 倍。

自适应光学技术能够在大气散射介质、生物组

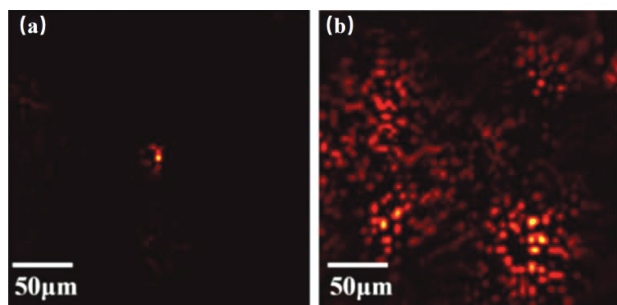


图 6 小鼠脑组织局部成像及 CAOMG 方法校正后的图像^[44]。(a) 局部成像;(b) CAOMG 方法校正后的图像

Fig. 6 Local image and image corrected by CAOMG method for mouse brain tissues^[44]. (a) Local image; (b) image corrected by CAOMG method

织等存在的情况下发挥校正畸变、消除模糊等重要作用,且不断扩大成像视场,对于宽视场远距离光学散射成像技术研究具有很好的借鉴意义。

3 计算散射成像技术及其应用

3.1 典型的计算散射成像技术

随着散射介质层光学厚度的增大,探测器接收的目标弹道光子逐渐减少,而多次散射光子逐渐增多,当云雾层光学厚度过大时,目标信号中的弹道光子会被多次散射光子湮没,这严重限制了大光学厚度条件下基于弹道光优化采集的散射成像技术的应用。为了实现穿透大光学厚度条件下散射介质的成像,多种基于非弹道光子的计算散射成像技术被研究。

计算散射成像技术是散射成像问题与计算成像技术相结合的产物,具有成本低、复杂度低、成像效果好等优势。计算散射成像技术可以结合先进的光学器件,如微机电系统调制器、空间光调制器、数字微镜器件等^[32,45-46],利用散射光的某些特性,完成高质量的散射成像,代表技术包括波前整形技术、基于光学传输矩阵的技术^[13-14]以及基于光学记忆效应和散斑相关的散射成像技术^[15-16]。

基于波前整形的散射成像技术是于 2007 年由 Vellekoop 等^[13]提出的,他们认为固体散射介质特性及其分布的相对稳定性使光场的输入和输出存在确定关系,通过波前整形技术进行编码补偿,即可让杂散的光波重新用于聚焦成像,如图 7 所示,他们获得的焦点亮度比正常漫透射高 1000 倍,也远高于普通光学透镜所能达到的聚焦亮度。

进一步地,2010 年 Popoff 等^[14]首次提出了基于散射介质光学传输矩阵的光聚焦成像方法,如图 8 所示,他们利用均方优化算子快速准确地重建任意物体,该过程与光传播的复杂性无关。但是,使用波前整形和光学传输矩阵方法进行散射成像,需基于散射介质的介观特性进行波前补偿,成像耗时

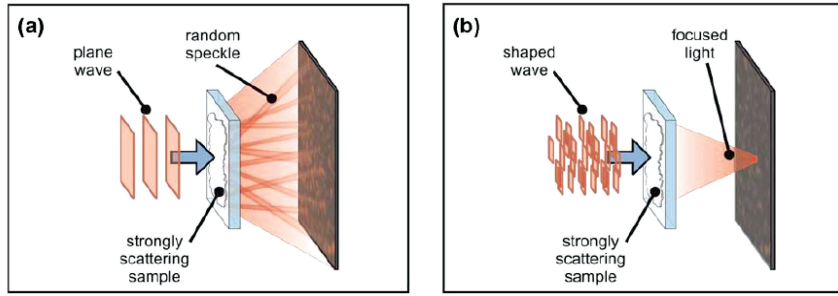


图 7 波前整形技术的实验设计图^[13]。(a)平面波经过散射介质形成散斑图样;(b)波前整形使得散射光重新聚焦
Fig. 7 Experimental design diagrams of wavefront shaping technology^[13]. (a) Speckle pattern is formed after plane wave focusing on scattering medium; (b) light is refocused by wavefront shaping

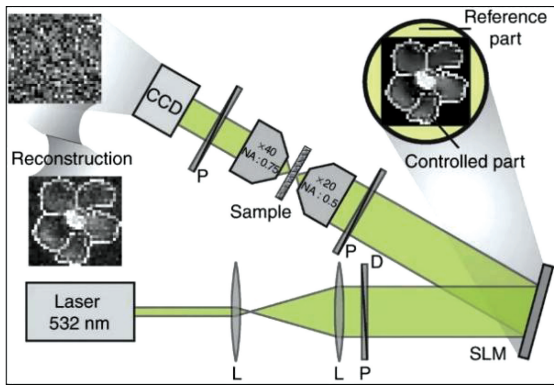


图 8 基于光学传输矩阵的散射成像技术实验光路示意图^[14]
Fig. 8 Experimental light path of scattering imaging based on optical transmission matrix^[14]

且标定步骤繁杂。

光学记忆效应是于 1988 年由 Feng 等^[47]发现、经 Freund 等^[48]通过实验证明的散射介质的重要光

学性质。光学记忆效应表现为入射光方向微小的角度变化并不会引起出射散斑的明显变化。散斑图案存在平移变换关系,具有的角度限定范围可用散斑相关函数来描述:

$$C(qL) = \left[\frac{qL}{\sinh(qL)} \right]^2, \quad (1)$$

式中: L 是散射介质的厚度; $q = 2\pi\delta\theta/\lambda$, $\delta\theta$ 为转动角度。可见,光学记忆效应的限定范围与散射介质的厚度紧密相关。

由于散斑图像的自相关包含了原始目标的傅里叶变换模量信息,因此基于光学记忆效应,2012 年 Bertolotti 等^[15]提出非侵入式散射成像方法,在光学记忆效应角度限定范围内进行角度扫描,得到高度相关的系列散斑图,然后基于散斑图自相关并采用相位恢复算法还原出目标图像,如图 9 所示,该技术可以实现穿透约 10 个光学厚度的固体散射介质层成像。

2014 年 Katz 等^[16]提出非侵入式单帧散射成像

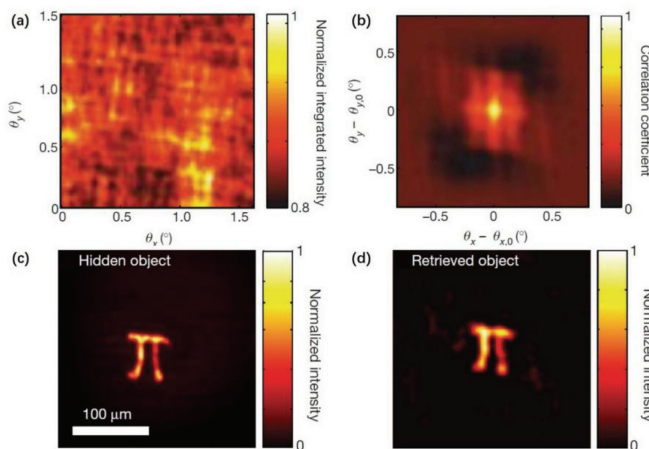


图 9 基于散斑相关的扫描成像方法的实验结果^[15]。(a)目标物荧光散斑图像;(b)9 幅散斑自相关图像的平均值;(c)无介质遮挡的目标图;(d)图 9(b)的重建目标

Fig. 9 Experimental results of scanning imaging method based on speckle correlation^[15]. (a) Fluorescent speckle image of target object; (b) average value of 9 speckle autocorrelation images; (c) target image without dielectric occlusion; (d) reconstructed target of Fig. 9(b)

技术,该技术采集单帧散斑图像,克服了角度扫描的机械不稳定和采集耗时等缺陷,利用单帧散斑图像

的自相关守恒,并通过相位恢复算法得到目标图像,显著简化了散射成像系统,如图 10 所示。

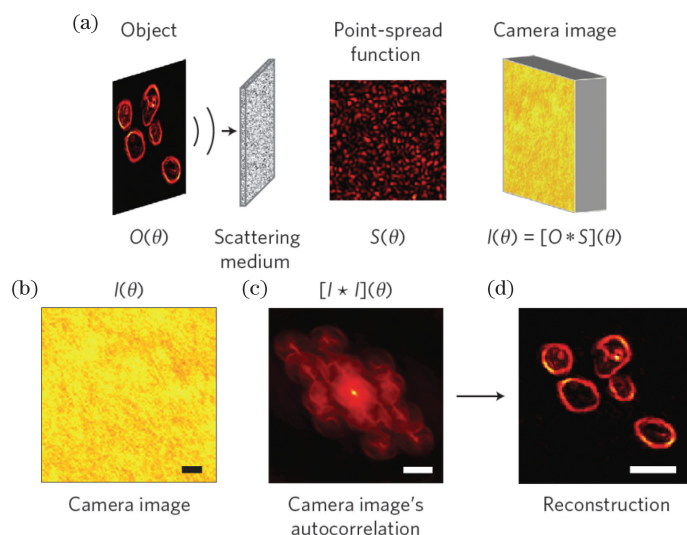


图 10 穿透强散射体的单帧拍照非侵入散射成像技术概念及数值结果^[16]。(a) 概念示意图;(b) 相机采集图像;(c) 相机采集图像的自相关;(d) 重建的目标图像

Fig. 10 Concept and numerical results of single-shot non-invasive scattering imaging through strong scattering medium^[16]. (a) Concept schematic; (b) image captured by camera; (c) autocorrelation of image captured by camera; (d) reconstructed target image

3.2 拓宽散射成像视场的尝试

上述基于散斑相关的散射成像技术受限于光学记忆效应限定范围,成像视场较小。为了拓宽成像视场,后续进行了很多卓有成效的探索。

2016 年,中山大学周建英团队将散射成像过程建模为一种卷积运算,即采集的散斑图案是原始目标函数和系统点扩展函数 (PSF) 的卷积运算结果^[49]。该研究认为,在光学记忆效应限定的范围内,不同位置点源的点扩展函数具有空间平移不变性,采集的散斑图案可认为是目标上各点源点扩展函数的线性叠加。通过测量系统的点扩展

函数,可以运用反卷积的方法实现隐藏目标的图像重建。该研究通过引入两个功能型透镜(分别用于收集超出探测器范围的散射光和缩小入瞳图像以匹配探测器尺寸),实现了超出光学记忆效应限定范围的视场拓宽,结果如图 11 所示。图 11(a)是记录的单点像素光源的参考散斑图案,即单点点扩展函数,虚线圆圈表示出瞳大小;图 11(b)是记录的隐藏未知物体的散斑图案,即目标函数与系统点扩展函数的卷积运算结果;重建图像如图 11(c)所示,图 11(d)为单次曝光的大视场散射物体图像重建结果。

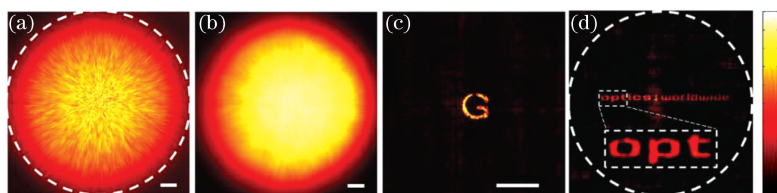


图 11 利用标准散射介质进行实验成像的结果(比例尺:200 pixel)^[49]。(a) 参考散斑图案;(b) 未知物体的散斑图案;(c) 反卷积算法恢复的图像;(d) 宽视场成像图案

Fig. 11 Results of experimental imaging through standard scattering medium (scale bar: 200 pixel)^[49]. (a) Reference speckle pattern; (b) speckle pattern of unknown object; (c) image retrieved by deconvolution algorithm; (d) pattern of wide-field imaging

2018 年新加坡南洋理工大学的 Tang 等^[50]基于单帧散斑相关成像技术并利用系统的点扩展函数进行反卷积运算,从而实现宽视场隐藏物体的散射

成像,该方法利用了光学记忆效应限定范围之外的区域产生的散斑图像。如图 12 所示,受散射介质的记忆效应限制,有限视场仅为虚线圆圈所包含的区

域所示。依次点亮投影仪上每个单点像素,得到一系列的散斑图,用 4 个不同中心视场的空间点扩展函数分别进行重建,得到目标不同部分的唯一重建图像,进一步利用互相关系数来确定每一个部分的位置,再对各部分重建结果进行缩放和重新排列,从而得到宽视场物体的图像。

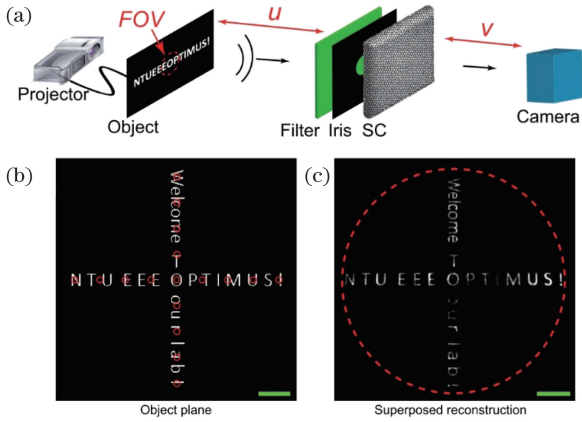


图 12 实验装置示意图及实验结果^[51]。(a)实验装置;
(b)(c)实验结果。比例尺为 1000 μm

Fig. 12 Experimental setup and results^[51]. (a) Experimental setup; (b)(c) experimental results. Scale bar: 1000 μm

也有研究引入额外参考物作为获取更多先验信息的手段。2019 年,西安电子科技大学的邵晓鹏团队提出利用已知参考物的自相关或者通过引入中心

位置参考点扩展函数的方法增加先验信息,实现超过记忆效应限定范围的散射成像^[52]。如图 13 所示,两个数字符号目标之间的距离(17.19 mm)超过了光学记忆效应限定范围(12.6 mm)。预先用透镜替换散射介质得到数字符号“1”或者“2”的自相关图像,并将其作为先验信息,利用得到的双物体散斑图像的自相关图像减去先验信息,再结合相位恢复算法,得到重建图像,实验结果如图 14 所示。如已知其中一个物体的先验信息,就可以得到待测物体“1”的自相关图像(含加性常数背景),然后利用相位恢复算法,通过重建得到目标图像,如图 14(f)所示。图 14(g)、(i)是在获得混合自相关图像和已知参考物体“1”的自相关图像的基础上,通过计算得到的未知物体“2”的图像。图 14(a)中比例尺为 120 pixel,图 14(b)~(i)中比例尺为 25 pixel。

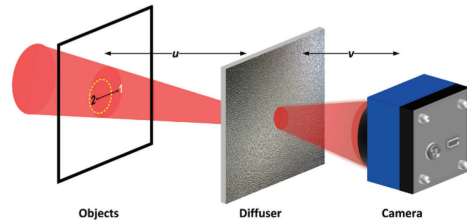


图 13 超过记忆效应范围的散射成像实验装置示意图^[52]
Fig. 13 Schematic of experimental setup of scattering imaging beyond memory effect range^[52]

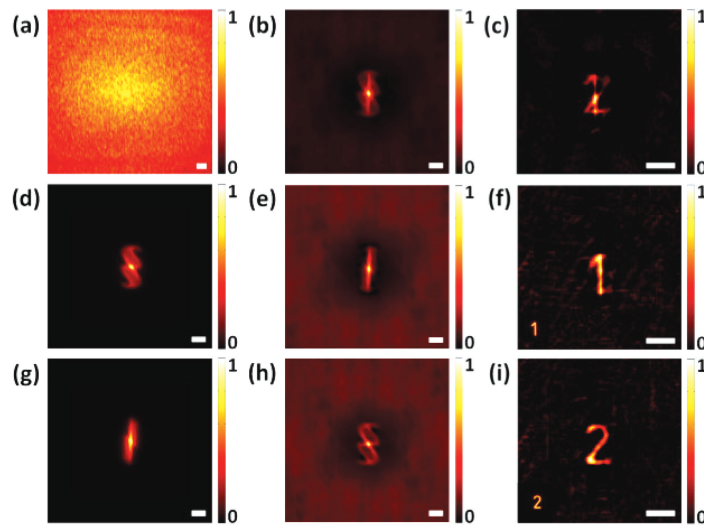


图 14 利用先验信息进行散射成像的实验结果^[53]。(a)采集的散斑图像;(b)散斑图像的自相关图像;(c)直接用相位恢复算法进行重构的结果;(d)参考物体“2”的自相关图像;(e)待测物体“1”的自相关图像;(f)物体“1”的重建图像;(g)混合自相关图像;(h)参考物体“1”的自相关图像;(i)物体“2”的重构图像

Fig. 14 Experimental results of scattering imaging with prior information^[53]. (a) Collected speckle image; (b) autocorrelation image of speckle image; (c) result reconstructed by phase recovery algorithm; (d) autocorrelation image of referenced object “2”; (e) autocorrelation image of object “1” to be tested; (f) reconstructed image of object “1”; (g) mixed autocorrelation image; (h) autocorrelation image of referenced object “1”; (i) reconstructed image of object “2”

从信息论的角度来看,上述方法都通过增加先验信息来拓宽物体的成像视场。为了提高可操作性,2019 年清华大学的戴琼海课题组提出了一种宽视场散斑相关成像技术^[18],无需进行侵入式点扩展函数测量或使用目标先验信息,实验结果如图 15 所示。两个目标“2”和“F”的间距约为光学记忆效应限定范围的 1.5 倍,直接进行相位恢复难以从散斑图像中重构并分离出目标。该技术通过傅里叶频谱

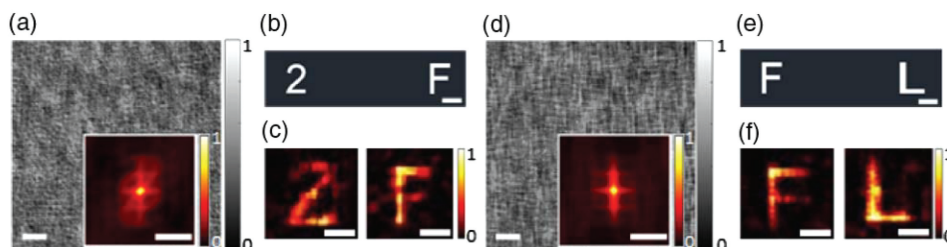


图 15 宽视场散斑相关成像重建结果^[18]。(a)双目标散斑图及其自相关图像;(b)图 15(a)对应的掩模版;(c)图 15(a)的自相关重建图像;(d)另一组双目标散斑图及其自相关图像;(e)图 15(d)对应的掩模版;(f)图 15(d)的自相关重建图像

Fig. 15 Reconstructed results of wide-field speckle correlated imaging^[18]. (a) Speckle and its autocorrelation image of dual targets; (b) mask corresponding to Fig. 15(a); (c) autocorrelation reconstruction image of Fig. 15(a); (d) speckle and its autocorrelation image of two other targets; (e) mask corresponding to Fig. 15(d); (f) autocorrelation reconstruction image of Fig. 15(d)

以上研究均为基于散斑相关的宽视场散射成像技术的代表性工作,有效地推动了计算散射成像技术的发展,在光学显微和生物成像领域发挥积极作用,对于宽视场远距离的计算散射成像研究具有重要的借鉴意义。

3.3 宽视场远距离计算散射成像技术探索

3.3.1 相干衍射成像技术的散射成像尝试

相干衍射成像(CDI)技术已经在 X 射线成像等领域发挥了重要作用。2014 年,以色列 Katz 等^[16]提出基于单帧散斑相关的散射成像技术,该技术使用了非相干光照明,其光路见图 16(a)^[16],其与 CDI 的光路结构[图 16(b)]相似^[54]。2016 年,Porat 等^[55]将宽场无透镜成像技术扩展至空间相干成像领域,该成像过程与单帧散斑相关的散射成像光学过程^[16]相似。

2019 年国防科技大学李修建团队提出了一种单帧相干功率谱散射成像技术^[17,51],在单帧散斑相关技术中使用了相干光源照明,仅采集一帧功率谱图像并利用相干衍射成像算法重建出目标图像,实验结果如图 17 所示。通过对比无散射介质的重建图像[图 17(d)]和存在散射介质的重建图像[图 17(c)]发现,散射介质可增加系统的数值孔径,且优化了功率谱结构的捕获效率,使得相干衍射成像算法收敛更

预测和迭代能量约束补偿,并使用双循环迭代法,成功将双目标的自相关图像从记录散斑中盲分离出来,结合相位恢复算法,仅用一幅散斑图像即可重建图像。图 15(a)为采集的双目标散斑图像及其自相关图像,图 15(b)为图 15(a)对应的掩模版,图 15(c)为仅由图 15(a)的数据重建的目标图像,图 15(d)~(f)为更换目标后的验证实验结果。该方法能够达到的最大视场约为光学记忆效应限定范围的 4.5 倍。

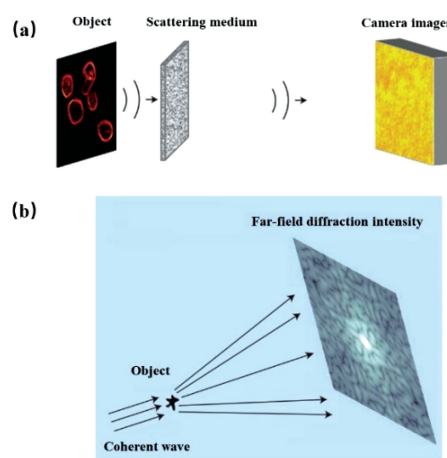


图 16 基于单帧散斑相关的散射成像技术及相干衍射成像光路对比^[16,54]。(a)基于单帧散斑相关的散射成像技术;(b)相干衍射成像

Fig. 16 Comparison of light paths of scattering imaging based on single-shot speckle correlation and coherent diffraction imaging^[16,54]. (a) Scattering imaging based on single-shot speckle correlation; (b) coherent diffraction imaging

快、准确性更高,但该机理还有待进一步探讨,其与扩展光学记忆效应对视场范围的局限具有关联性。

3.3.2 叠层迭代引擎技术在散射成像中的应用

计算成像技术中的叠层迭代引擎(PIE)^[27]方法

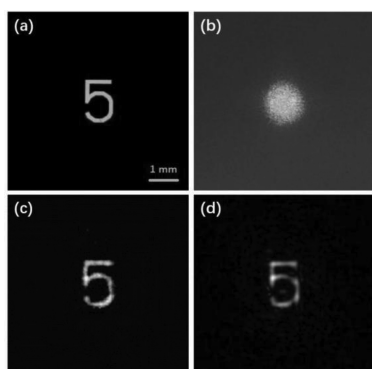


图 17 原始物体图像及重建结果对比^[17]。(a)原始物体图像;(b)直接探测遮挡目标;(c)单帧相干功率谱技术的重建物体;(d)传统 CDI 技术的重建图像;
Fig. 17 Comparison of original object image and reconstruction results^[17]. (a) Original object image; (b) direct detection of hidden target; (c) image reconstructed by single-shot coherent power spectrum technology; (d) image reconstructed by traditional CDI

可以极大地扩展相干衍射成像技术的成像视场,将 PIE 方法和散射成像相结合,有望实现宽视场、远距离散射成像。

2019 年中国科学院上海光学精密机械研究所单帧散斑相关散射成像的基础上,提出分区域实现散射成像的思路以拓宽成像体视场^[56]。该方法通过重建满足光学记忆效应限制范围的局部图像并对其进行拼接得到宽视场的目标图像,可获得视场为光学记忆效应限定范围的 2 倍的目标图像,如

图 18 所示。该技术采集了 529 幅子图像,重建图像[图 18(c)]还原了宽视场物体(8 mm×8 mm)[图 18(b)]的形状及细节信息,重建图像与真实目标图像的相关系数达到 0.93。

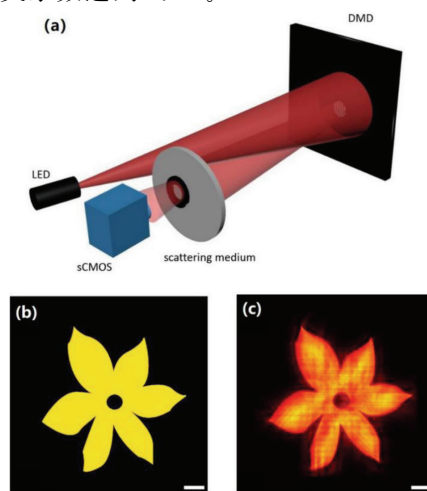


图 18 PIE 方法实现宽视场散射成像的实验光路和重建结果^[56]。(a)实验光路;(b)目标;(c)重建图像
Fig. 18 Experimental light path and reconstructed results of PIE method for wide-field scattering imaging^[56]. (a) Experimental light path; (b) target; (c) reconstructed image

2019 年,中国科学院西安光学精密机械研究所的姚保利课题组基于 PIE 和淋浴帘效应^[57],提出了一种散射成像技术^[58],实验光路如图 19 所示。在光学记忆效应的限制下,该系统的理论视场仅为 0.9 mm,但该方法成功重建了视场为 2.64 mm 的区域。

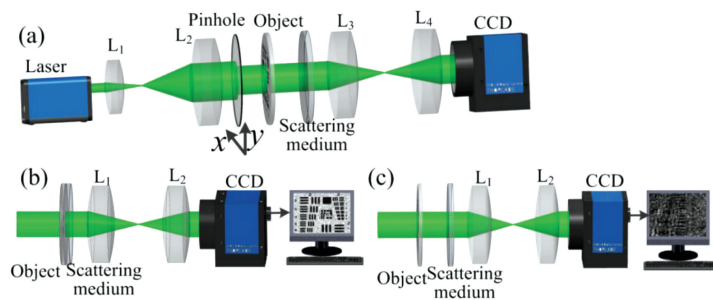


图 19 实验装置和淋浴帘效果示意图^[58]。(a)实验装置示意图;(b)物体紧紧附着在成像到探测器上的散射介质上的情况;(c)物体远离散射介质的情况
Fig. 19 Schematics of experimental setup and shower curtain effect^[58]. (a) Schematic of experimental setup; (b) object is closely attached to the scattering medium which is imaged onto the detector; (c) object is far from the scattering medium

PIE 技术具有小孔径宽视场扫描特性,适用于宽视场远距离散射成像,但其扫描稳定性和算法鲁棒性不高^[59]。2019 年,国防科技大学李修建团队提出一种可变孔径傅里叶叠层成像技术(VAFP)^[60],基于 4f 光学相关器,通过在频域内对一系列可变

孔径叠层进行扫描,并通过快速重建得到高分辨率物体图像。该方法不依赖于机械平移台的扫描精度,也不受孔的位置和形状误差的影响,为拓宽散射成像视场提供了更广阔的思路。

3.3.3 关联成像技术的散射成像实现

2018 年,国防科技大学陈平行课题组通过关联成像光路实现散射成像^[23],通过测量散射体强度传输矩阵或点扩展函数,并利用快速互相关反卷积方法实现了图像重建,实验结果如图 20 所示。

图 20(a)中圆圈标识的两个目标的距离超出光学记忆效应限定范围。相机采集了目标的散斑图样[图 20(b)],得到的方块和三缝的点扩展函数分别

如图 20(c)和图 20(e)所示,恢复的子目标图像如图 20(d)和图 20(f)所示。图 20(g)是原始组合目标的理论自相关图像,图 20(h)是散斑图像[图 20(b)]的自相关图像;图 20(i)是最终拼接得到的目标重建图像,虚线圆圈表示光学记忆效应限定范围。该方法虽操作复杂且时效性较差,但能实现超出部分光学记忆效应限定范围的远距离散射成像。

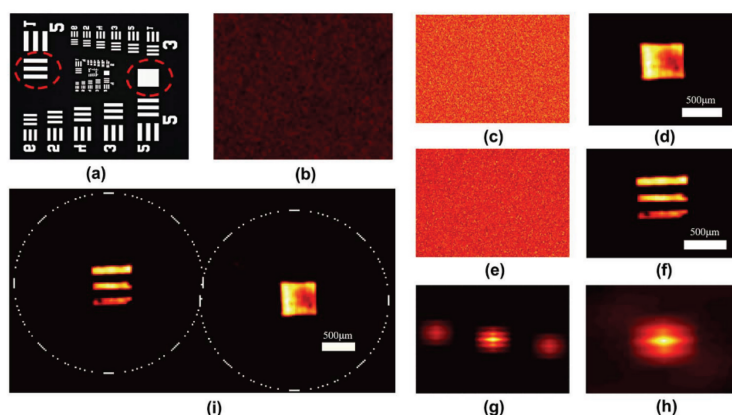


图 20 采用关联成像技术进行散射成像的实验结果^[23]。(a)感兴趣目标(圆圈标记);(b)散斑图样;(c)方形区域点扩展函数;(d)图 20(b)与图 20(c)的互相关图像重建结果;(e)三缝区域点扩展函数;(f)图 20(b)与图 20(e)的互相关图像重建结果;(g)图 20(a)理论上的自相关图像;(h)图 20(b)的自相关图像;(i)最终拼接得到的重建结果

Fig. 20 Experimental results of scattering imaging via correlated imaging technique^[23]. (a) Target of interest (marked by circles); (b) speckle pattern; (c) PSF of square area; (d) reconstructed result of autocorrelation image of Fig. 20 (b) and Fig. 20(c); (e) PSF of three-slit area; (f) reconstructed result of autocorrelation image of Fig. 20(b) and Fig. 20(e); (g) theoretical autocorrelation image of Fig. 20 (a); (h) autocorrelation image of Fig. 20 (b); (i) reconstructed result obtained by splicing

3.4 非视距成像技术在散射成像中的应用

非视距(NLoS)成像^[16,20]是计算散射成像技术的一种,通过探测视距之外物体的散射光子,可重建隐藏物体图像,是有望用于远距离散射成像的技术之一。2014 年 Katz 等^[16]在其单帧散斑相关的散射成像技术研究中,利用后向散射光实现了拐角非视

距物体单帧成像,如图 21 所示。

2020 年,美国斯坦福大学的 Metzler 等^[20]利用散斑相关技术并结合深度学习方法,完成了效果显著的非视距成像,结果如图 22 所示。该技术引入虚拟光源照射非视距的隐藏目标,将隐藏物体的反射率编码为虚拟探测器上的散斑图,通过分析散斑图

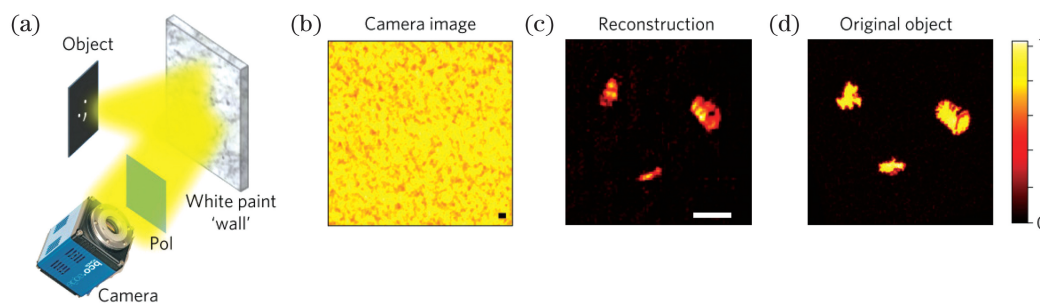


图 21 单帧散斑相关技术非视距成像的光路示意图和实验结果(比例尺:20 pixel)^[16]。(a)光路示意图;(b)相机采集图;(c)重构的目标图像;(d)原始目标图像

Fig. 21 Experimental setup and results of NLoS imaging of single-shot speckle correlation method (scale bar: 20 pixel)^[16]. (a) Schematic of experimental light path; (b) image captured by camera; (c) reconstructed target image; (d) original target image

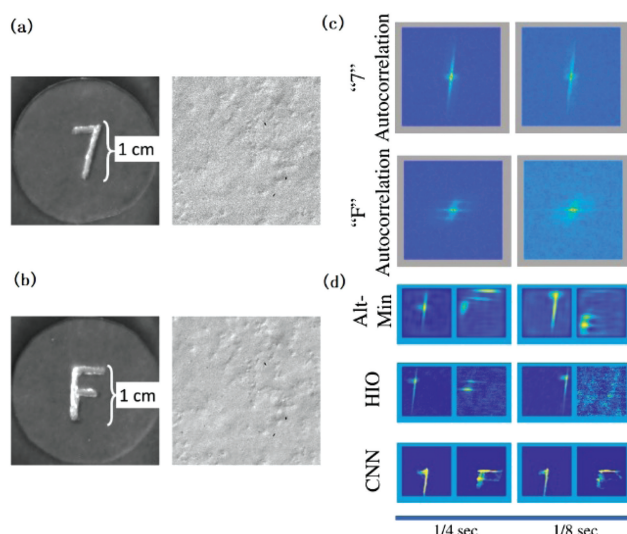


图 22 NLoS 成像的实验结果^[20]。(a)长时间曝光的 NLoS 关联示例;(b)短时间曝光的 NLoS 关联示例;(c)具有不同曝光长度的实验重建结果;(d)不同方法重建结果的对比

Fig. 22 Experimental results of NLoS imaging^[20]. (a) NLoS associated example for long exposure; (b) NLoS associated example for short exposure; (c) experimental reconstruction results with varying exposure lengths; (d) comparison of reconstruction results of different methods

的空间相关性分析反照率的自相关性,利用噪声模型训练得到深度卷积神经网络,在小于 1 s 的曝光时间内利用相位恢复方法重建出可辨识的目标图像。

其他的非视距成像技术研究还包括 2019 年美国波士顿大学的 Saunders 等^[61]提出的基于普通数码相机的计算潜望术,如图 23 所示。该技术用一个位置未知但形状尺寸已知的遮光板遮挡目标投射到散射墙面的光,用彩色相机采集墙面上形成的投影及半影作为源图像,重建得到目标彩色图像。总之,非视距成像技术是利用漫射面实现了非可视目标的成像,对于探索宽视场、远距离光学散射成像技术具有积极的作用。

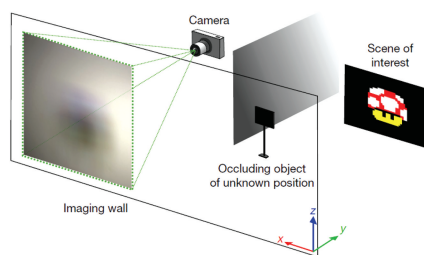


图 23 计算潜望术非视距成像实验示意图^[61]

Fig. 23 Experimental diagram of non-line-of-sight imaging of computational periscope^[61]

4 结束语

散射介质具有较大光学厚度时,可能使到达图像探测器的弹道光远弱于非弹道光,此时仅基于弹道光进行成像是极为困难的,非常有必要充分利用

散射介质的多次散射产生的大量非弹道光。利用基于记忆效应和散斑相关的计算散射成像技术,结合相干衍射成像、叠层迭代引擎等计算成像技术,有望推进宽视场远距离的散射成像的发展和应用。但该散射成像技术目前亟需解决如下问题:散射介质几何尺度大、散射介质动态变化、目标非稀疏、成像视场小、光源相干性适应性差、算法效率低等。因此,通过结合弹道光和非弹道光发展计算散射成像技术是必然的趋势。

随着计算成像技术和人工智能技术的发展,光学散射成像技术将可能朝着如下几个方向发展:

1) 发展能够适用于气、液、固三相大光学厚度散射介质的主被动结合散射成像技术。为实现对小几何厚度的固体散射介质的穿透成像以及实现对大几何厚度、大光学厚度的气体、液体散射介质的穿透成像,需要结合光纤激光器^[62]等技术与设备,发展主被动相结合的散射成像技术,从而克服单一技术的局限性。

2) 发展针对非稀疏目标的光学散射成像技术。现有散射成像技术还要求目标具有较好的稀疏性,这与实际应用的需求差距较大。

3) 发展三维光学散射成像技术。穿透散射介质对目标进行三维成像显然更有价值^[63],但由于目标的三维信息被散射介质严重干扰,恢复目标的三维信息非常具有挑战性。

4) 发展面向运动目标及动态变化散射介质的

散射成像技术。对于运动的目标和同时发生动态变化的散射介质,如战场烟尘下行驶的坦克、浑浊流动水体中的运动目标以及皮肤血液组织中运动的细胞等,实现动态成像将具有非常大的应用价值。

5) 发展彩色及多(高)光谱散射成像技术。穿透散射介质对目标进行彩色成像或多(高)光谱成像面临巨大的挑战,需要更深入理解散射介质的多光谱传输特性,还要利用相位恢复算法、深度学习算法等重建出目标的数据立方体。

6) 研究散射介质的整体光学效应,形成抽象化的数学模型。自然界的大尺度散射体分布是随机性和规律性的统一,将散射介质作为一个整体分析、挖掘其物理本质,研究其整体光学效应并形成抽象化的数学模型,将为散射成像技术的发展提供更坚实的基础。

综上所述,光学散射成像技术已在生物医学显微成像、军事及民用目标探测、航空与道路交通等领域发挥了重要作用,但面向宽视场远距离的散射成像应用需求,仍有很多问题需要解决。通过广大研究人员的不懈努力,上述问题的解决势必使得光学散射成像技术更广泛地应用于国防、工业、科研、生活等诸多领域。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Liu H B, Yang J C, Yi W J, et al. Angular velocity estimation from measurement vectors of star tracker[J]. Applied Optics, 2012, 51(16): 3590-3598.
- [3] Wu T F. Non-invasive scattering imaging methods based on optical memory effect[D]. Xi'an: Xidian University, 2018: 1-18.
吴腾飞. 基于光学记忆效应的非侵入式散射成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 1-18.
- [4] 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.
- [5] Lyu M, Wang H, Li G W, et al. Learning-based lensless imaging through optically thick scattering media[J]. Advanced Photonics, 2019, 1(3): 036002.
- [6] Conkey D B, Caravaca-Aguirre A M, Dove J D, et al. Erratum: super-resolution photoacoustic imaging through a scattering wall [J]. Nature Communications, 2015, 6: 8380.
- [7] Wang K, Sun W, Richie C T, et al. Direct wavefront sensing for high-resolution *in vivo* imaging in scattering tissue[J]. Nature Communications, 2015, 6: 7276.
- [8] Andreoli D, Volpe G, Popoff S, et al. Deterministic control of broadband light through a multiply scattering medium via the multispectral transmission matrix[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10347.
- [9] Yi W J, Hu W, Wang P, et al. Image restoration method for longitudinal laser tomography based on degradation matrix estimation [J]. Applied Optics, 2016, 55(20): 5432-5438.
- [10] Zhang W F, Man Z S, Ge X L, et al. Fast dehazing method based on polarization optics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141103.
张文飞, 满忠胜, 葛筱璐, 等. 一种快速实现的偏振光学去雾方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141103.
- [11] Wang X W, Sun L, Wang M M, et al. Deblurring methods for underwater 2D and 3D range-gated imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(2): 0203002.
王新伟, 孙亮, 王敏敏, 等. 水下二维及三维距离选通成像去噪技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2): 0203002.
- [12] Zheng W, Wu Y, Winter P, et al. Adaptive optics improves multiphoton super-resolution imaging [J]. Nature Methods, 2017, 14(9): 869-872.
- [13] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [14] Popoff S, Lerosey G, Fink M, et al. Image transmission through an opaque material[J]. Nature Communications, 2010, 1: 81.
- [15] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. Nature, 2012, 491(7423): 232-234.
- [16] 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.
- [17] Tang W, Yang J, Yi W, et al. Single-shot coherent power-spectrum imaging of objects hidden by opaque scattering media[J]. Applied Optics, 2019, 58(4): 1033-1039.
- [18] 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.
- [19] Fienup J R, Kowalczyk A M. Phase retrieval for a complex-valued object by using a low-resolution image[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(3): 450-458.
- [20] Metzler C A, Heide F, Rangarajan P, et al. Deep-inverse correlography: towards real-time high-resolution non-line-of-sight imaging [J]. *Optica*, 2020, 7(1): 63-71.
- [21] Miao J W, Charalambous P, Kirz J, et al. Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometer-sized non-crystalline specimens[J]. *Nature*, 1999, 400(6742): 342-344.
- [22] Faulkner H M, Rodenburg J M. Movable aperture lensless transmission microscopy: a novel phase retrieval algorithm [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(2): 023903.
- [23] Li L, Li Q, Sun S, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range with spatial-correlation-achieved point-spread-function[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1670-1673.
- [24] Cao Z Z, Zhang X B, Osnabrugge G, et al. Reconfigurable beam system for non-line-of-sight free-space optical communication[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 69.
- [25] Gillespie L F. Apparent illuminance as a function of range in gated, laser night-viewing systems [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56 (7): 883-887.
- [26] Steingold H, Strauch R E. Backscatter effects in active night vision systems [J]. *Applied Optics*, 1969, 8(1): 147-154.
- [27] Espinola R L, Jacobs E L, Halford C E, et al. Modeling the target acquisition performance of active imaging systems[J]. *Optics Express*, 2007, 15(7): 3816-3832.
- [28] Ran G, Schneider R, Zohar E, et al. A novel optical gating method for laser gated imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8704: 87042K.
- [29] Baker I, Thorne P, Henderson J, et al. Advanced multifunctional detectors for laser-gated imaging applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6206: 620608.
- [30] Fournier G R, Bonnier D, Forand J L, et al. Range-gated underwater laser imaging system [J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(9): 2185-2190.
- [31] Bonnier D, Larochelle V. Range-gated active-imaging system for search-and-rescue and surveillance operations [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2744: 134-145.
- [32] Laurenzis M, Christnacher F, Metzger N, et al. Three-dimensional range-gated imaging at infrared wavelengths with super-resolution depth mapping [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7298: 729833.
- [33] Yi W J, Liu H B, Wang P, et al. Reconstruction of target image from inhomogeneous degradations through backscattering medium images using self-calibration[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7392-7401.
- [34] Yi W J, Wang P, Fu M C, et al. Restoration of longitudinal laser tomography target image from inhomogeneous medium degradation under common conditions [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (14): 15687-15698.
- [35] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [36] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 570-587.
- [37] Qu Y, Zou Z. Non-sky polarization-based dehazing algorithm for non-specular objects using polarization difference and global scene feature [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25004-25022.
- [38] Huang B, Liu T, Hu H, et al. Underwater image recovery considering polarization effects of objects [J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9826-9838.
- [39] Yu H Z, Sun C S, Hu Y M. Underwater active polarization defogging algorithm for global parameter estimation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41 (1): 107-113, 193.
于洪志, 孙春生, 胡艺铭. 一种全局参数估计的水下主动偏振去雾算法 [J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 107-113, 193.
- [40] 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.
- [41] Fugate R Q, Fried D L, Ameer G A, et al. Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide-star [J]. *Nature*, 1991, 353(6340): 144-146.
- [42] Jin C B, Zhang X Y, Sun W Q, et al. Correction performance estimation of atmospheric turbulence based on eigenmode method [J]. *Optics Communications*, 2020, 466: 125661.
- [43] Li J, Beaulieu D R, Paudel H, et al. Conjugate adaptive optics in widefield microscopy with an extended-source wavefront sensor[J]. *Optica*, 2015, 2(8): 682-688.

- [44] Zhao Q, Shi X, Zhu X P, et al. Large field of view correction by using conjugate adaptive optics with multiple guide stars [J]. *Journal of Biophotonics*, 2019, 12(2): e201800225.
- [45] Popoff S M, Lerosey G, Fink M, et al. Controlling light through optical disordered media: transmission matrix approach [J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(12): 123021.
- [46] Conkey D B, Brown A N, Caravaca-Aguirre A M, et al. Genetic algorithm optimization for focusing through turbid media in noisy environments [J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 4840-4849.
- [47] Feng S C, 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.
- [48] Freund I I, Rosenbluh M, Feng S. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media [J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2328-2331.
- [49] Zhuang H, He H, Xie X, et al. High speed color imaging through scattering media with a large field of view [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32696.
- [50] Tang D, Sahoo S K, Tran V, et al. Single-shot large field of view imaging with scattering media by spatial demultiplexing [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7533-7538.
- [51] Wang W, Guo Y F, Tang W S, et al. Optimizing single-shot coherent power-spectrum scattering imaging adaptively by tuning feedback coefficient for practical exposure conditions [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(18): 3676.
- [52] Guo C F, Liu J T, Li W, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range by exploiting prior information [J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 203-208.
- [53] 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.
- [54] Shechtman Y, Eldar Y C, Cohen O, et al. Phase retrieval with application to optical imaging: a contemporary overview [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2015, 32(3): 87-109.
- [55] Porat A, Andresen E R, Rigneault H, et al. Widefield lensless imaging through a fiber bundle via speckle correlations [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16835-16855.
- [56] Li G W, Yang W Q, Wang H C, et al. Image transmission through scattering media using ptychographic iterative engine [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(5): 849.
- [57] Edrei E, Scarcelli G. Optical imaging through dynamic turbid media using the Fourier-domain shower-curtain effect [J]. *Optica*, 2016, 3(1): 71-74.
- [58] Zhou M L, Li R Z, Peng T, et al. Retrieval of non-sparse objects through scattering media beyond the memory effect [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(8): 085606.
- [59] Dong S, Horstmeyer R, Shiradkar R, et al. Aperture-scanning Fourier ptychography for 3D refocusing and super-resolution macroscopic imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13586-13599.
- [60] Tang W S, Guo Y F, Yi W J, et al. A robust fast variable-aperture Fourier ptychography [J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 144-149.
- [61] Saunders C, Murray-Bruce J, Goyal V K. Computational periscopy with an ordinary digital camera [J]. *Nature*, 2019, 565(7740): 472-475.
- [62] Zhang Y, Xu J M, Ye J, et al. Ultralow-quantum-defect Raman laser based on the boson peak in phosphosilicate fiber [J]. *Photonics Research*, 2020(7): 1155-1160.
- [63] Shi Y Y, Liu Y W, Sheng W, et al. Single-shot video of three-dimensional moving objects through scattering layers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2211003.
施瑶瑶, 刘友文, 盛伟, 等. 透过散射层对运动三维物体的单次曝光录像 [J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2211003.

Review of Optical Scattering Imaging Technology with Wide Field of View and Long Distance

Li Xiujian^{1*}, Tang Wusheng², Yi Wenjun¹, Qi Junli¹

¹ College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

² College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract

Significance The development and application of many optical imaging and measurement systems have been promoted based on the principle of straight-line propagation of light, and the artificial intelligence technologies have also been developed rapidly. However, when the target to be detected is blocked by the scatterers such as clouds, haze, suspended dust, and turbid water with large optical thickness, due to the lack of point-to-point direct mapping between the object domain and the image space pixels, how to obtain the target image effectively becomes a difficult problem to be solved in the field of optical imaging.

The influence of scatterers on optical signal transmission mainly includes absorption and scattering, especially scattering. Scattering is due to a large number of scattering media or scattering particles with different refractive indexes and particle size distributions in the scattering body, which makes the light wave front from the target subject randomly interfere in the process of penetrating scatterers, resulting in the reduction of signal-to-noise ratio of the target and distortion of direct detection images. Optical imaging of penetrating scatterers is suitable for complex and diverse application scenarios, long target distance, and large optical thickness of scatterers. It is of great significance to solve the problem of optical scattering imaging with wide field of view and long distance.

Progress Various imaging methods based on ballistic light (non-scattering light) and non-ballistic light (scattered light) have been developed to solve the problem of optical scattering imaging. Scattering imaging technologies based on ballistic light acquisition, such as range gated imaging, polarization imaging, and adaptive optics imaging, have played important roles in astronomical imaging, transportation, underwater exploration, and biological imaging. For example, in 2017, Li et al. from National University of Defense Technology (NUTD) proposed a method for degraded matrix estimation and target image reconstruction based on laser longitudinal tomography, which effectively solved the multiplicative interference problems such as the non-uniform attenuation of the scattering medium to the target signal in range gated imaging. In 2019, Zhao et al. from Zhejiang University proposed a multi-guide-star conjugate adaptive optics correction method. By using multiple navigation satellites, the correction area of pupil adaptive optics method was increased, the correction efficiency was improved, and the field of view was expanded.

With the rapid development of computational imaging technology, a variety of new scattering imaging technologies have been developed by combining the scattering imaging with the computational imaging. In 2010, Popoff et al. proposed the scattering imaging technology based on optical transmission matrix, and in 2012, Bertolotti et al. developed the scattering imaging technology based on the optical memory effect (OME) and speckle correlation. In 2014, Katz et al. proposed the noninvasive single frame scattering imaging technology to overcome the mechanical instability of angle scanning and acquisition time-consuming defects, which promoted the development of computational scattering imaging technology.

Coherent diffraction imaging (CDI), ptychographic iterative engine (PIE), correlation imaging, non-line-of-sight (NLoS) imaging, and other new computational imaging methods are gradually combined with the requirements of scattering imaging, and have been developed rapidly, gradually solving many problems in the application of scattering imaging. In 2016, Zhou Jianying's team from Sun Yat-sen University modeled the scattering imaging process as a convolution operation, realizing the field of view beyond the limited scope of OME. In 2018, Sahoo et al. from Nanyang Technological University in Singapore, based on the single frame speckle correlation imaging technology, used the speckle image generated in the area beyond the limited range of OME to realize scattering imaging of hidden objects in wide field of view. In 2019, Shao Xiaopeng's group from Xidian University realized scattering imaging beyond the limited range of OME through the use of prior information; Dai Qionghai's research group from Tsinghua University proposed and implemented a wide field of view speckle correlation imaging technology. In 2019, Li Xiujian's group from NUDT proposed a single frame coherent power spectrum scattering

imaging technology and a variable aperture Fourier PIE imaging technology, which effectively improved the imaging efficiency and enlarged the width of field of view; Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics proposed the idea of realizing scattering imaging in different regions to broaden the imaging field of view; Yao Baoli's research group of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics proposed a scattering imaging technology based on PIE and shower curtain effect, which broadened the imaging field of view. In 2018, Chen Pingxing's research group from NUDT realized scattering imaging beyond the limited range of OME based on the optical path of correlation imaging. In 2019, Charles Saunders from Boston University in the United States proposed the computational perimetry using ordinary digital cameras. In 2020, Metzler et al. from Stanford University in the United States completed the NLoS imaging with remarkable effect by using the speckle correlation technology and deep learning method. These are beneficial attempts of computational scattering imaging.

Conclusions and Prospect In recent years, various optical scattering imaging technologies have been developed rapidly, have played important roles in biomedical microscopic imaging, military and civil target detection, aviation and road traffic monitoring, and other fields, and will play a greater role. However, there are still many problems in the application of wide field of view and long-distance scattering imaging. Combined with the use of ballistic and non-ballistic light, the computational scattering imaging technologies based on OME and speckle correlation, combined with CDI, PIE, and other computational imaging technologies, are expected to promote the development and application of wide field of view and long-distance scattering imaging. According to the technical development and application requirements, it is worth developing scattering imaging technologies which have the characters of the combination of active and passive imaging methods, facing non-sparse targets, moving targets, and dynamic scattering media, have three-dimensional imaging ability, or have color and spectral imaging capabilities. And it is necessary to develop the abstract mathematical model which can express the whole optical effect of scattering media.

Key words image processing; optical scattering imaging; ballistic light acquisition; non-ballistic light imaging; wide field of view; long distance; non sparsity

OCIS codes 110.0113; 110.7050; 100.3010