

# 从随机散斑到“浑浊透镜”——基于波前整形的散射光聚焦技术(特邀)

刘凯歌<sup>1,2</sup>, 张恒康<sup>3</sup>, 付星<sup>1,2\*\*</sup>, 柳强<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;

<sup>2</sup>清华大学精密仪器系光子测控技术教育部重点实验室, 北京 100084;

<sup>3</sup>北京控制工程研究所, 北京 100190

**摘要** 散射介质会破坏光束的光波前分布和能量输送,限制了强散射环境下光镊、荧光成像、光通信等技术的应用。波前整形技术通过优化入射波前,重新规划散射介质内的光传输路径,实现了在散射介质内部或透过散射介质的光聚焦,从而克服了散射介质的限制,将散射光重新利用,使得散射介质成为一个类似透镜的光学元件,也被称为“浑浊透镜”。目前主要有依赖反馈调控的迭代优化方法、建立输入-输出联系的传输矩阵方法和利用光路可逆原理的相位共轭方法三类技术路线。本文从技术原理、应用背景以及重要进展等方面梳理了基于波前整形技术的散射介质聚焦的研究进展,并对比展望了三类技术在应用中的发展前景。

**关键词** 散射介质; 波前整形; 光聚焦; 迭代优化; 传输矩阵; 光学相位共轭

中图分类号 O438 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231825

## 1 引言

散射介质是普遍存在于自然界的一种物质,如浑浊大气、烟雾、生物组织等。相干光束在传播经过散射介质时会由于随机散射效应的影响,波前遭到破坏,传输方向偏离原有的输入方向而变得杂乱无章。散射光发生随机干涉会形成颗粒状的强度图样,被称为“光学散斑”<sup>[1]</sup>。而在多模光纤中,由于模式色散和模间干涉的作用,会形成类似的散斑分布,因此多模光纤也被视为一类特殊的散射介质<sup>[2-4]</sup>。

由于散射现象的存在,光束难以维持原有的空间分布,并且能量随穿透深度的增加呈指数级衰减<sup>[5]</sup>,极大地限制了光镊<sup>[6-8]</sup>、光通信<sup>[9-10]</sup>、生物医学<sup>[11-14]</sup>等先进技术在强散射环境下的应用。然而,1990年, Freund<sup>[15]</sup>提出静态散射介质中的光散射是一个确定的线性过程,这个特性揭示了重新利用散斑光场能量的可能性。由于入射光与散射光存在确定的响应关系,合适的输入条件能够使得经过散射介质后的输出光场形成预期的分布。2007年, Vellekoop 和 Mosk<sup>[16]</sup>提出了光学波前整形的概念,通过优化入射光波前的分布,使得光场在目标点处实现同相相干叠加,实现了散射介质后达到衍射极限的聚焦光斑。波前整形技术的出现使得有效利用散射光成为可能,解除了散射问题对

于上述光学应用的限制,其原理如图1所示。

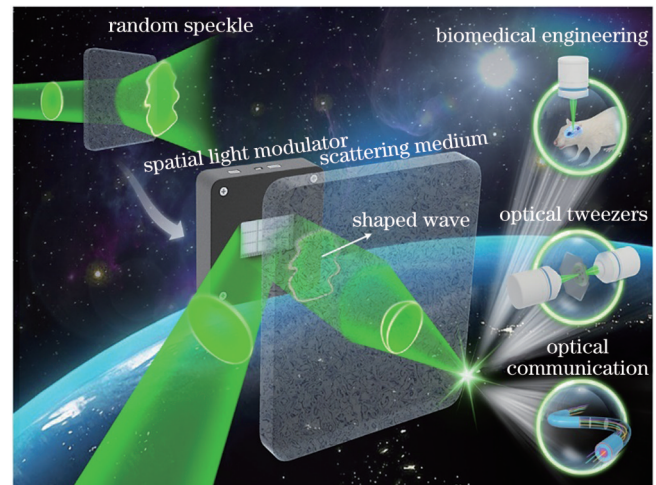


图1 基于波前整形技术的散射介质后光聚焦原理及应用  
Fig.1 Principle and applications of focusing through turbid medium based on wavefront shaping technique

随着近年来调制器件和计算机技术的发展,越来越多的波前整形方法被应用到散射介质聚焦中,聚焦的质量和速度不断得到提升,以此为基础的应用也取得了令人振奋的进展。运用波前整形技术,透过强散射介质的精密光操控成为了可能<sup>[7,17-18]</sup>;深层生物组

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2023-12-13; 录用日期: 2023-12-27; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(62275137)

通信作者: \*qiangliu@mail.tsinghua.edu.cn; \*\*fuxing@mail.tsinghua.edu.cn

织内荧光激发的强度可以得到大幅提升,极大拓展了荧光成像的穿透深度<sup>[19-20]</sup>;甚至可以主动借助散射介质,提高聚焦物镜的数值孔径,实现超越衍射极限的聚焦<sup>[21]</sup>。得益于波前整形技术,散射介质已然成为了一种新型的光学器件,拥有超高的操作自由度,可以实现一些弹道光无法完成的特殊应用,例如光计算中的功能模块<sup>[22-23]</sup>、超分辨成像<sup>[24]</sup>、定向能量输送<sup>[25]</sup>等。

本文着眼于基于波前整形的散射介质光聚焦,主要介绍了包括迭代优化方法、传输矩阵方法和相位共轭方法在内的三类波前整形技术,涵盖了对技术原理和应用背景的介绍、近年来的代表性工作进展以及对未来发展方向的展望。

## 2 迭代优化方法

在静态散射介质的线性光传输过程中,输入光场与输出光场之间存在确定的响应关系。当改变输入条件时,目标观测位置处的光强也会随之改变。而迭代算法的核心就是在不断更新输入光场的过程中,逐渐提高目标位置处的聚焦强度,最终找到实现最高聚焦

强度的输入分布。迭代优化过程依赖控制理论中的反馈闭环控制,通常需要设定一个评价价值来量化聚焦效果,常见的有焦点的强度<sup>[26]</sup>、峰背比<sup>[16]</sup>或其他间接反映焦点强度的参量<sup>[27-28]</sup>。在一个初始猜想的基础上,算法随机地改变输入条件,并根据评价价值的变化来确定当前一次迭代的作用是否为正面作用。沿着评价价值不断提高的优化方向,可以期待迭代的过程最终达到理论的最高评价价值,并得到该系统条件下实现最高聚焦强度的输入光场。

2007年,Vellekoop和Mosk<sup>[16]</sup>首次实现散射介质后光聚焦所使用的方法就是基于迭代优化的逐步顺序算法(SSA)。该算法对空间光调制器(SLM)上用于调制的所有单元按照顺序进行相位优化,每个调制单元都单独打开进行 $0\sim 2\pi$ 的相位检索,根据目标位置处的光强大小选择最佳的相位输入,之后遍历所有输入单元最终得到优化的输入相位,并实现在散射介质后的光聚焦。优化过程如图2(a)所示。为了定量评价聚焦的效果,定义焦点增强因子(PBR)为焦点强度与背景光场平均强度之比。在这项工作中,使用3228个控制单元时,实验所实现的PBR可以达到1000以上。

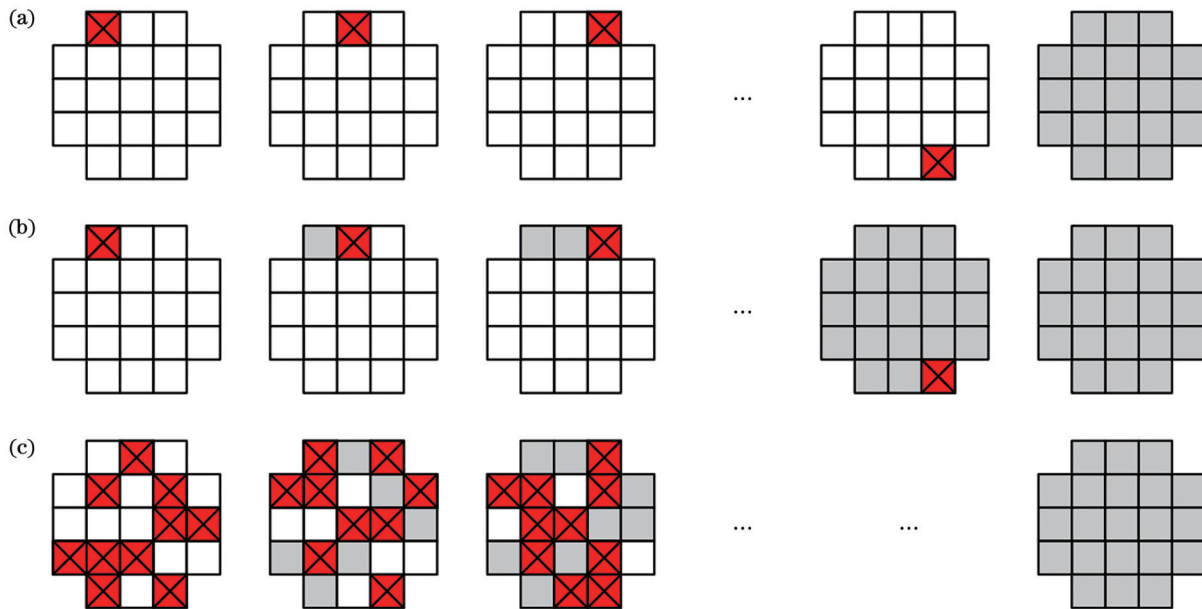


图2 迭代优化算法的原理示意图<sup>[29]</sup>。(a)逐步序列算法;(b)连续序列算法;(c)分区算法

Fig. 2 Schematic diagrams of iterative optimization algorithms<sup>[29]</sup>. (a) Stepwise sequential algorithm; (b) continuous sequential algorithm; (c) partitioning algorithm

在之后的研究中,研究人员主要围绕着迭代算法的迭代方式和反馈信号改进,不断有新型的优化算法和新的反馈机制产生,拓展着迭代优化方法的应用场景并提升算法性能。

接下来首先介绍在迭代方法上的进展。Vellekoop和Mosk<sup>[29]</sup>于2008年进一步测试了连续序列算法(CSA)和分区算法(PA)在散射聚焦中的应用,并将两种算法与之前的SSA算法进行了聚焦效果上的对比。这两种算法的优化过程如图2(b)和2(c)所示。

不同于SSA每次只打开一个控制单元,CSA将优化完成的控制单元始终加载优化后相位,随着优化过程的进行,透射光的总强度逐渐提高,信噪比高于SSA,拥有更强的抗噪能力。而PA每次随机打开一半的控制单元,优化其整体的相位值,在迭代初期就具有较高的信噪比,抗噪声能力比SSA和CSA更强,但是在迭代后期每次仍然有大量的输入单元进行相位更新,算法难以收敛。三种算法中,SSA和CSA的优化过程稳定,但是在复杂场景的优化问题上表现不

佳,并且信噪比不高;相比之下,PA具有一定应用到复杂优化场景的能力以及较高的信噪比,但是收敛速度较慢。

为了解决这些问题,智能优化算法被引入到波前整形领域。这一类算法通常基于自然界中的某种特定现象或生物行为设计,相比传统的迭代优化拥有更好的抗噪声能力、收敛速度以及最终优化的效果。2012年,Conkey等<sup>[30]</sup>首次将遗传算法(GA)用于迭代优化型波前整形技术,其算法框图如图3(a)所示。GA模拟生物种群中基因遗传的过程,通过交叉(crosser)和

变异(mutation)来完成迭代过程中数据的传递和更新。交叉保障了高评价价值个体的特征在迭代中得以保存,而变异增加了算法在输入空间中搜索的范围,减少了算法落入局部最优的风险。相比传统的迭代优化算法,GA提高了迭代的收敛速度和最终实现的聚焦PBR,同时抗噪声的能力更强。而GA强大的并行优化能力,也让它在多焦点同步聚焦的应用中表现出良好的性能。2019年,Peng等<sup>[17]</sup>使用改进的GA实现了多点的快速聚焦,并应用到了散射介质后的粒子操控中,实现了多粒子的同步操控。

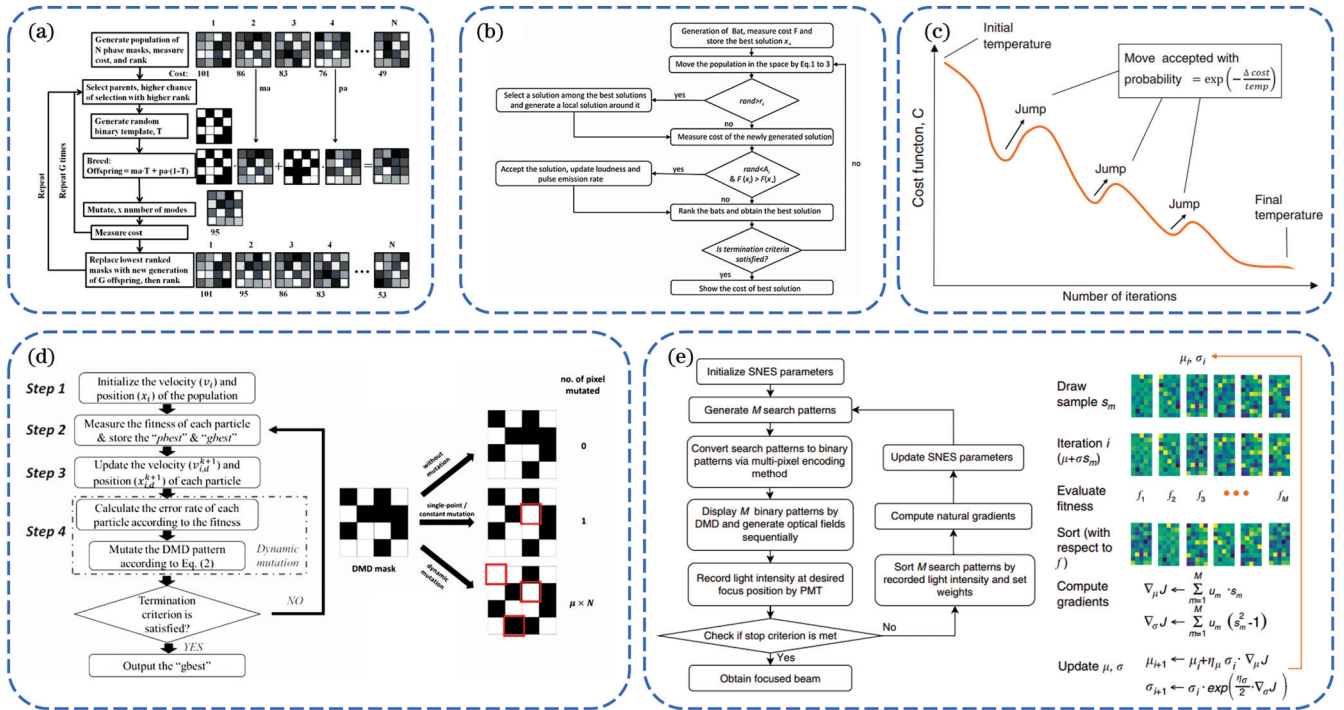


图3 智能优化算法原理图。(a)遗传算法<sup>[30]</sup>;(b)蝙蝠算法<sup>[31]</sup>;(c)模拟退火算法<sup>[32]</sup>;(d)粒子群优化算法<sup>[33]</sup>;(e)可分离自然演化策略<sup>[34]</sup>

Fig. 3 Schematic diagrams of intelligent optimization algorithms. (a) Genetic algorithm<sup>[30]</sup>; (b) bat algorithm<sup>[31]</sup>; (c) simulated annealing algorithm<sup>[32]</sup>; (d) particle swarm optimization algorithm<sup>[33]</sup>; (e) separable natural evolution strategies<sup>[34]</sup>

GA之后,多个智能优化算法被陆续用于波前整形技术的研究中,包括蝙蝠算法<sup>[31]</sup>、模拟退火算法<sup>[32]</sup>、粒子群优化算法<sup>[33, 35]</sup>、可分离自然演化策略<sup>[34]</sup>等等。其算法原理如图3(b)~(e)所示。这些新型智能优化算法的核心与GA相似,但是关注了不同的应用场景和优化参数,拥有各自独特的优势。

近几年来,随着人工智能技术的飞速发展,机器学习方法得到了众多研究领域的青睐。2008年,Vellekoop和Mosk<sup>[29]</sup>即预言机器学习方法将在波前整形技术领域得到应用。机器学习方法中,通常需要一系列的散射介质输入-输出图像对作为训练集,训练网络学习散射介质的输入光场与输出光场之间的联系。通过迭代反馈优化网络参数,使之逐渐具备预测训练集之外输入-输出关系的能力,可以被视为一种特殊的迭代优化算法<sup>[36-37]</sup>。但是相比智能优化算法,机器学

习的方法具有更强的并行优化能力,当完成对网络的训练后,在输出面上任意位置处的光聚焦都可以不经过迭代快速实现,因此机器学习方法尤其适用于需要计算多个位置聚焦的应用中。2017年,Horisaki等<sup>[38]</sup>首次将机器学习方法应用于波前整形技术。将一组散射介质输入-输出对作为训练集,利用支持向量回归(SVR)算法,将散射介质的散射作用函数化,通过最小化预测值与真实值之间的误差来找到该复杂函数的分布规律,根据网络预测他们在实验上实现了单点或多点光聚焦,算法原理与单点聚焦的结果如图4(a)所示。

2018年,Turpin等<sup>[39]</sup>将神经网络算法应用于波前整形技术研究中,分别由单层神经网络(SLNN)算法和卷积神经网络(CNN)算法实现了透过散射介质的光聚焦。如图4(b)所示为SLNN和CNN的结构和聚

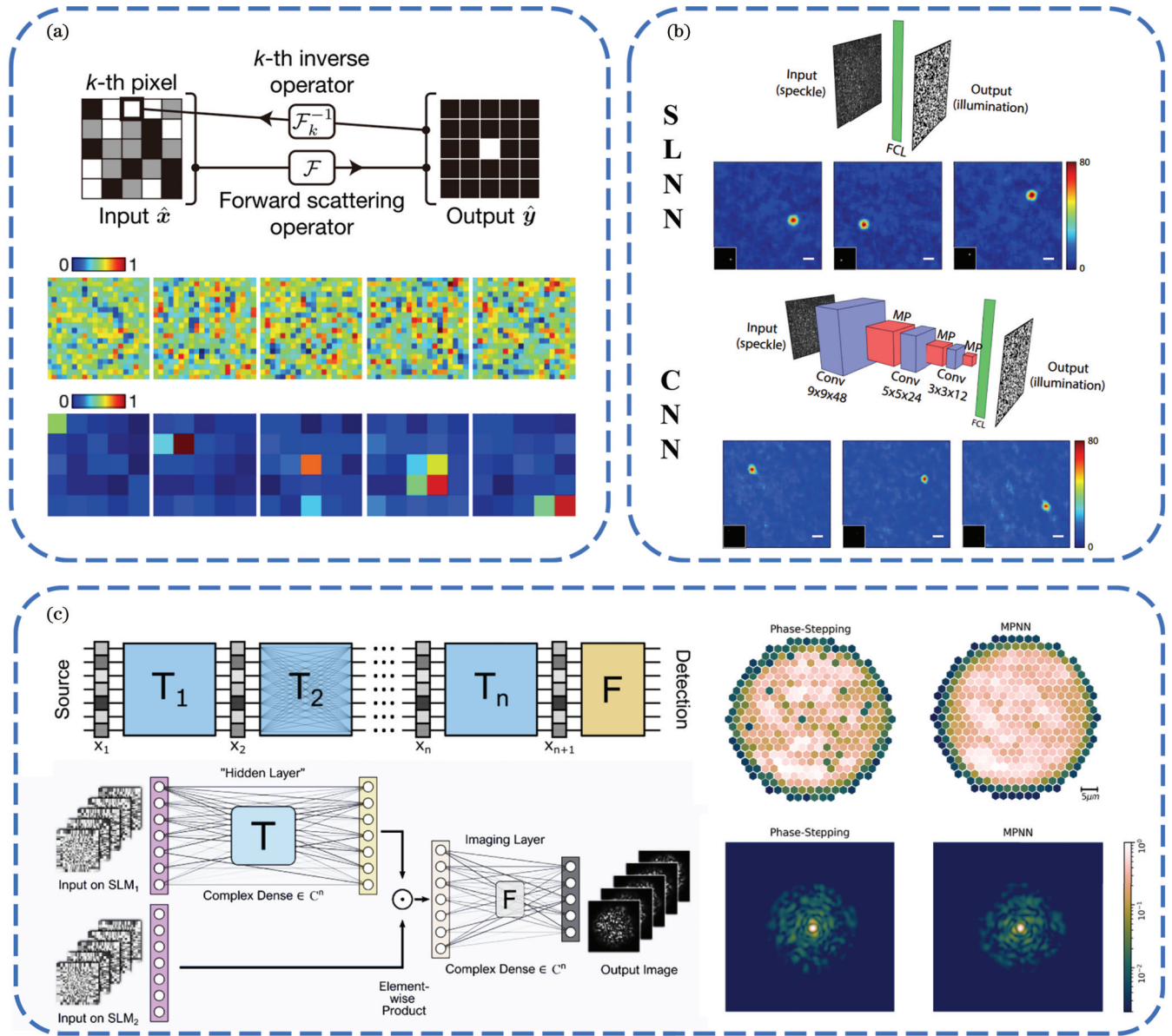


图 4 机器学习算法的原理图与聚焦结果。(a)支持向量回归<sup>[38]</sup>;(b)单层神经网络与卷积神经网络<sup>[39]</sup>;(c)多平面神经网络<sup>[40]</sup>  
 Fig. 4 Schematic and focusing results of machine learning algorithms. (a) Support vector regression<sup>[38]</sup>; (b) single-layer neural network and convolutional neural network<sup>[39]</sup>; (c) multi-plane neural network<sup>[40]</sup>

焦结果。相比于图像处理领域更为常见的 CNN, 网络结构更加简洁轻量的 SLNN 在聚焦的表现中更胜一筹, 相同训练集大小的条件下可以实现更高 PBR 的光聚焦。并且得益于 SLNN 的线性网络结构, 在多点聚焦中相比 CNN 更具优势。

而随着研究人员对散射过程和神经网络结构理解的深入, 考虑实际散射模型构建出了更符合散射规律的神经网络模型。2023 年, Goel 等<sup>[40]</sup>提出了一种基于实际散射光传输物理模型的多平面神经网络 (MPNN), 通过分层模型建立了与实际散射传输过程类似的神经网络模型, 在无需相位测量的情况下, 仅依靠输入-输出强度对训练网络, 相比于利用相位测量建立传递函数的方法实现了更高的聚焦效率, 其网络结构和聚焦结果如图 4(c) 所示。

而单一的算法往往在某一方面表现优异但也同时具有其局限性, 在发展新算法的同时, 利用已有算法进行算法组合, 使得不同算法取长补短, 同样具有重要研究意义。前述的两类算法中, 智能优化算法的优化过程有落入局部最优的风险, 并且当改变目标聚焦点的位置时通常需要重新开始优化, 面对复杂优化任务时效果不够理想; 神经网络算法的鲁棒性较好, 并行优化能力强, 却常常需要很大规模的训练集, 训练过程耗时巨大。2020 年, Luo 等<sup>[41]</sup>提出了一种混合优化算法, 巧妙地实现了两类算法的优势互补, 算法原理及优化结果如图 5(a) 所示。该混合算法仅使用少量训练集训练深度卷积神经网络 (DCNN) 以获得初步聚焦的优化波前, 将这一预测结果用于指导 GA 的迭代优化, 以避免其落入局部最优。实验结果表明, 使用了 DCNN 预

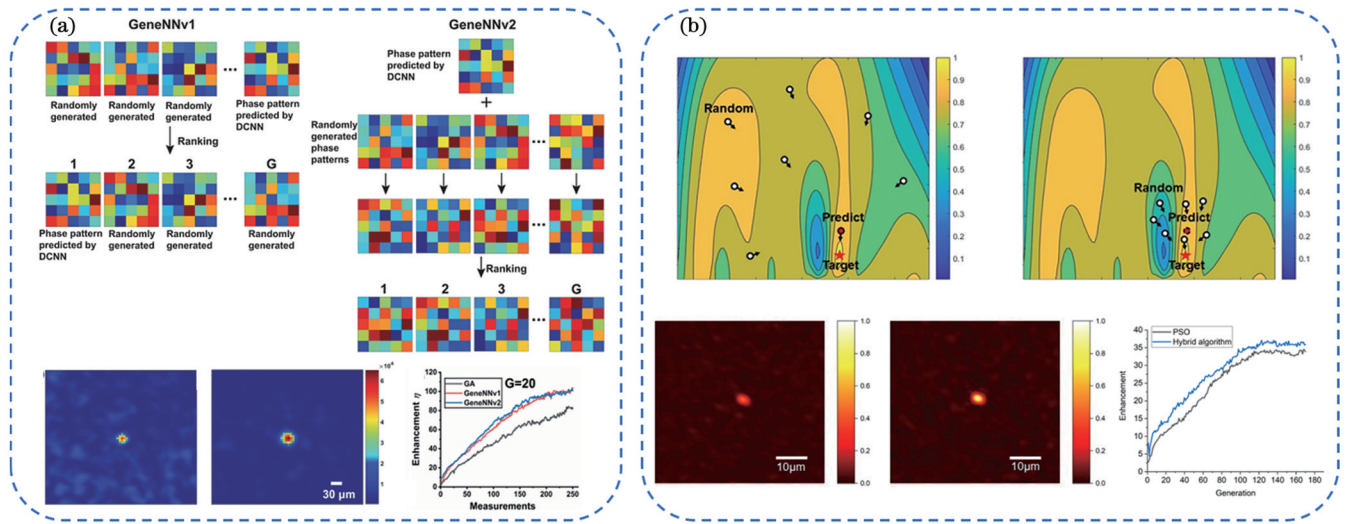


图 5 混合优化算法的原理和聚焦结果。(a) DCNN 与 GA 组合<sup>[41]</sup>; (b) SLNN 与 PSO 组合<sup>[42]</sup>

Fig. 5 Principles and focusing results of hybrid optimization algorithms. (a) Combination of DCNN and GA<sup>[41]</sup>; (b) combination of SLNN and PSO<sup>[42]</sup>

测结果后,GA 的收敛速度得到了提升,同时避免了迭代初期由于初始猜想不合理导致落入局部最优的风险,最终优化实现的聚焦 PBR 也更高。2021 年,本课题组将 SLNN 与粒子群优化 (PSO) 算法组合,利用 SLNN 的简单结构在聚焦上的优势,进一步减少了神经网络的训练时间,算法原理和实验结果如图 5(b) 所示<sup>[42]</sup>。除此之外,将 SLNN 与多像素编码结合可以进一步提升神经网络的优化效果,获得接近理论值的聚焦 PBR<sup>[43]</sup>;将 GA 与蚁群优化相结合可以快速实现大范围搜索,获得好的优化效果,同时避免出现局部收敛<sup>[44]</sup>;将 GA 与 PSO 算法结合,引入动态的变异因子大大提升了迭代的抗干扰能力<sup>[33]</sup>。

前述工作着眼于迭代算法本身,研究人员致力于提升优化效果、收敛速度以及稳定性。而迭代优化型波前整形技术中另一个关键因素是反馈信号,它直接决定了算法的应用场景。前述工作中设定的目标聚焦点均处于散射介质之后,实验中可以直接测定输出面的光强分布来提供反馈信号。但是如果希望在散

射介质内部进行聚焦,往往无法直接进行强度测量,需要借助其他辅助手段进行反馈信号的获取。基于光与物质相互作用的机制,可以将散射介质内部目标位置处的光强度信息转化为其他类型的信号传递至散射介质外部的接收器,进而参与迭代优化的反馈循环中。

最常见的一类方法是采用荧光信号。2008 年, Vellekoop 等<sup>[45]</sup>报道了基于荧光反馈信号的迭代优化光聚焦研究,其实验装置如图 6(a) 所示。散射样品为 32  $\mu\text{m}$  厚的 ZnO 散射片,其中随机嵌入直径为 300 nm  $\pm$  15 nm 的荧光微球。入射进入散射样品内部的光束在经过荧光微球时,会激发出与入射光不同波长的荧光,通过测定荧光强度可以得到在荧光微球位置处的激发光强度,即是该位置处散斑场的强度。进而将该荧光强度作为迭代优化的反馈信号,优化入射波前提高接收到的荧光信号强度。实验中荧光信号最终提升到了初始的 22 倍,可以认为在散射介质内部荧光微球处实现了光聚焦。

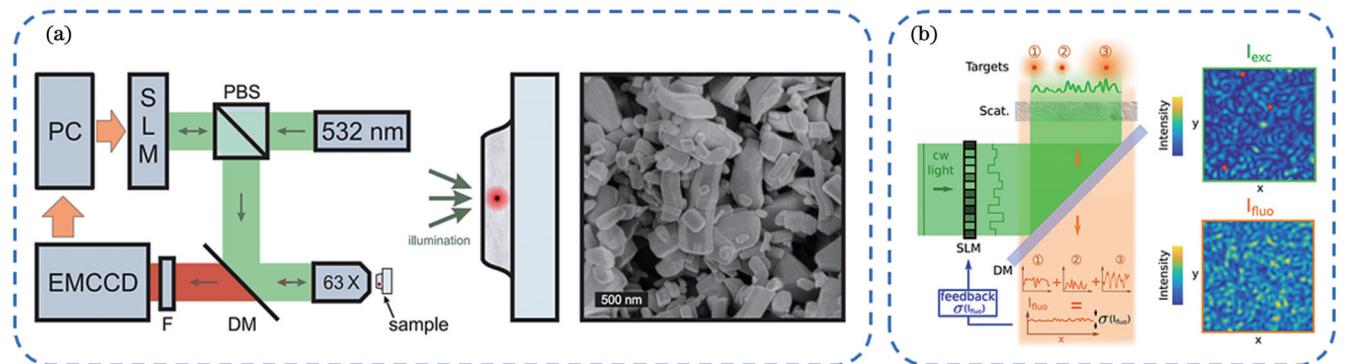


图 6 使用不同反馈信号的依赖荧光激发的迭代优化系统。(a) 荧光强度<sup>[45]</sup>; (b) 荧光强度方差<sup>[46]</sup>

Fig. 6 Iterative optimization system dependent on fluorescence excitation with different feedback signals. (a) Fluorescence intensity<sup>[45]</sup>; (b) fluorescence intensity variance<sup>[46]</sup>

然而当介质内部的荧光颗粒密度较大时,不同颗粒同时激发形成的非相干的荧光散斑会在接收端强度叠加,导致单个荧光颗粒的激发光的对比度下降,从而难以区分不同荧光颗粒的荧光信号总强度。为了解决散斑非相干叠加的问题,2019年,Boniface等<sup>[46]</sup>报道了一种新的荧光信号反馈机制,其原理如图 6(b)所示。此项研究以荧光散斑的强度方差作为反馈信号,不同的荧光颗粒上的激发光强度差异越大,形成的荧光散斑场的强度方差就越大,因此提高该强度方差值意味着增大了不同荧光微球上的光强差。当强度方差达到最大时,此时几乎所有的激发光都会聚到了某一个荧光颗粒上,即实现了散射介质内部的光聚焦。

利用荧光微球的方法虽然实现了在散射介质内部

的光聚焦,但是聚焦的位置难以自由调整,取决于荧光微球的位置。为了得到更高的聚焦自由度,2011年,Kong等<sup>[27]</sup>首次报道了利用光声信号作为反馈信号的迭代优化光聚焦,其原理如图 7(a)所示。短脉冲激光照射吸收型介质时,介质的热弛豫效应会产生超声信号,称为光声效应。超声信号在散射介质传输穿透性强,几乎不受散射效应的影响,因此可以利用超声换能器测量光声信号作为反馈信号。超声换能器的焦点位置即光声效应的发生位置,可以借由移动超声换能器的位置来改变,进而接收不同位置处的光声信号,实现在不同空间位置的迭代反馈与光聚焦。实验中将  $10\ \mu\text{m}$  直径的石墨颗粒置于散射介质后,吸收激光产生光声信号。通过优化入射波前使光声信号增长至最高,即引导光聚焦到了石墨颗粒处。

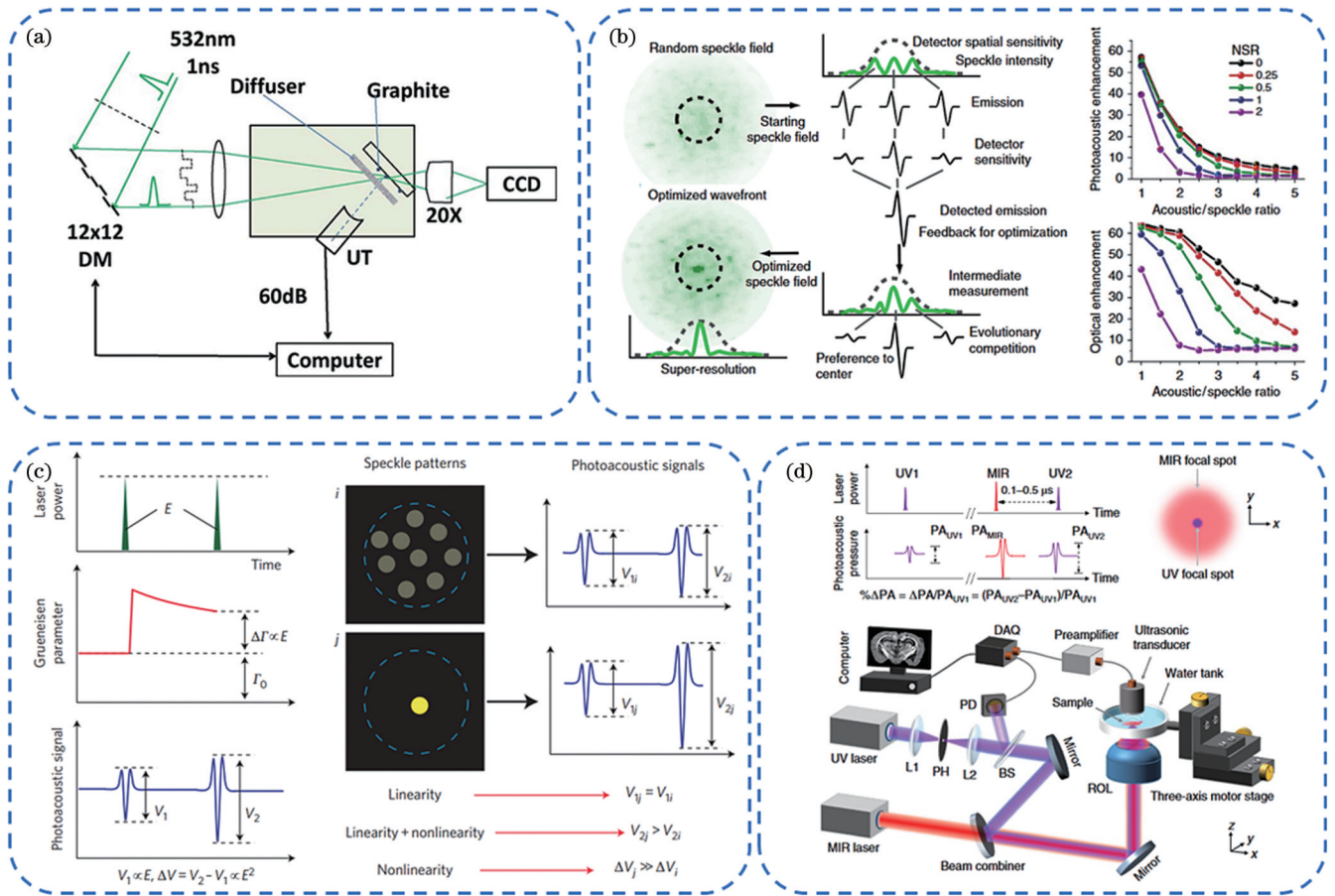


图 7 使用光声信号作为反馈的迭代优化系统。(a) 光声辅助的迭代优化光聚焦原理图<sup>[27]</sup>; (b) 基于非均匀检测灵敏度光声探测的原理图<sup>[47]</sup>; (c) 基于非线性光声的迭代优化原理图<sup>[20]</sup>; (d) 基于 Grüneisen 弛豫的非线性光声原理图<sup>[48]</sup>

Fig. 7 Iterative optimization system using photoacoustic signals as feedback. (a) Schematic diagram of iterative optimization for optical focusing assisted by photoacoustics<sup>[27]</sup>; (b) schematic diagram of photoacoustic detection based on non-uniform detection sensitivity<sup>[47]</sup>; (c) schematic diagram of iterative optimization based on nonlinear photoacoustics<sup>[20]</sup>; (d) schematic diagram of nonlinear photoacoustics based on Grüneisen relaxation<sup>[48]</sup>

在大尺寸吸收型介质中利用光声作为反馈信号实现聚焦时,聚焦精度由超声换能器的焦点尺寸限制,而超声焦点尺寸通常为光散斑颗粒尺寸的 10 倍左右。迭代反馈时所使用的声信号是由超声焦点内的光场

作用产生的叠加信号,通常包含了多个散斑颗粒,因此迭代优化也将作用于区域内的平均强度,而无法精确聚焦到某一个散斑,难以实现光学精度的聚焦。2015年,Conkey等<sup>[47]</sup>采用高灵敏度的超声换能器,利用其

信号的高斯曲线分布创造了空间上距离换能器中心不同距离的不均匀超声信号贡献,从而优先筛选距离换能器中心更近的散斑,实现了亚声学量级的光聚焦,其原理如图 7(b)所示。同年,Lai 等<sup>[20]</sup>报道了利用非线性光声信号提升聚焦精度的方法,其原理如图 7(c)所示。非线性光声信号由双脉冲构成的脉冲串激发得到,它的强度与激发光强具有平方关系,这种转化关系下,在单个散斑颗粒处的能量增强所带来的反馈信号的提高会远大于区域内散斑能量的平均提升,因此,通过迭代优化将非线性光声信号提升至最高时,超声焦点处的光能也将会聚到区域内单个散斑颗粒上,实现光波长衍射极限的高精度聚焦。

2019年,Shi 等<sup>[48]</sup>利用紫外波段的基于 Grüneisen 弛豫效应的光声检测,在中红外波段的成像中实现了比衍射极限精细一个数量级的分辨率。脉冲中红外激光器在焦点处热激发样品,共聚焦脉冲紫外激光束光声检测由此产生瞬态温升,从而显示样品吸收中红外光的量,通过两个波长协作,将中红外成像的分辨率压缩到了紫外的衍射极限水平,其原理如图 7(d)所示。

除了荧光信号和光声信号之外,非线性光学信号<sup>[28, 49]</sup>、超声调制光信号<sup>[50]</sup>、热形变信号<sup>[51]</sup>、拉曼散射信号<sup>[52]</sup>等也被用作反馈信号,指导迭代优化光聚焦。

上面分别叙述了迭代优化型波前整形技术在优化算法和反馈信号两个方面的进展。除此之外,该技术也形成了一些其他的重要发展方向。例如,为了提高聚焦速度,目前已有高刷新率数字微镜器件(DMD)波前整形技术<sup>[53]</sup>、并行优化技术<sup>[54]</sup>、一维-二维变换技术<sup>[55]</sup>等被陆续报道。而从应用角度来说,目前迭代优化波前整形技术已和光学相干断层扫描(OCT)、荧光显微等技术相结合,在生物成像领域得到应用<sup>[56-62]</sup>。

### 3 传输矩阵方法

静态散射介质中的线性光传输是具有确定性的物理过程,这决定了散射介质的输入和输出光场存在确

定的响应关系,甚至可以通过代数化形式定量表述。而在波前整形技术中,散射介质的输入通常是经过调制的优化波前,输出强度由相机接收并数字化,因此输入和输出光场都具有离散化的空间分布,可以抽象表述为输入与输出向量,而连接输入和输出向量空间的函数此时可以写作矩阵的形式,称为散射介质的传输矩阵。一旦建立传输矩阵,任意的输出分布都可以通过矩阵运算求解其对应的输入条件,从而实现光场通过散射介质在任意输出位置处的光聚焦<sup>[63]</sup>。

此外,传输矩阵描述了散射介质对于光束传输的作用方式,在理论研究层面也具有重要意义。目前已经被应用到了波前整形技术聚焦 PBR 理论值<sup>[53]</sup>、散射介质能量输送规律<sup>[64-67]</sup>、散射介质记忆效应<sup>[68-69]</sup>等理论研究中,成为研究散射问题有力的理论工具。

2010年,Popoff 等<sup>[70]</sup>首次在实验上测量了传输矩阵并将其应用到散射介质后的光聚焦中,其实验装置和聚焦结果如图 8 所示。为了建立输入输出两个空间之间的线性联系,传输矩阵的计算需要测量一组输入空间的完备正交基底在输出空间的响应。这里 Popoff 等采用了哈达玛(Hadamard)基底,可以保证输出光场具有高的信噪比。而传输矩阵测量需要输出光场的复振幅分布,此实验中采用了干涉的方法进行相位测量,在 SLM 表面划分出调制区域和参考区域,参考光和调制光会共路通过散射介质,在输出平面干涉,再利用相移的方法对调制光的相位信息进行测量得到光场的复振幅分布。完成对传输矩阵的测量后,通过对传输矩阵的时间反演操作,可以得到实现目标输出(单点或多点聚焦)所需的输入调制波前。

除去振幅和相位,散射光束还具有偏振、波长、时域等方面的自由度,后续的研究中,更多的自由度被引入传输矩阵测量并带来了全新的应用场景和控制能力。

2012年,Tripathi 等<sup>[71]</sup>提出了矢量传输矩阵模型。具有偏振特性的光束在强散射介质中传输时,其偏振

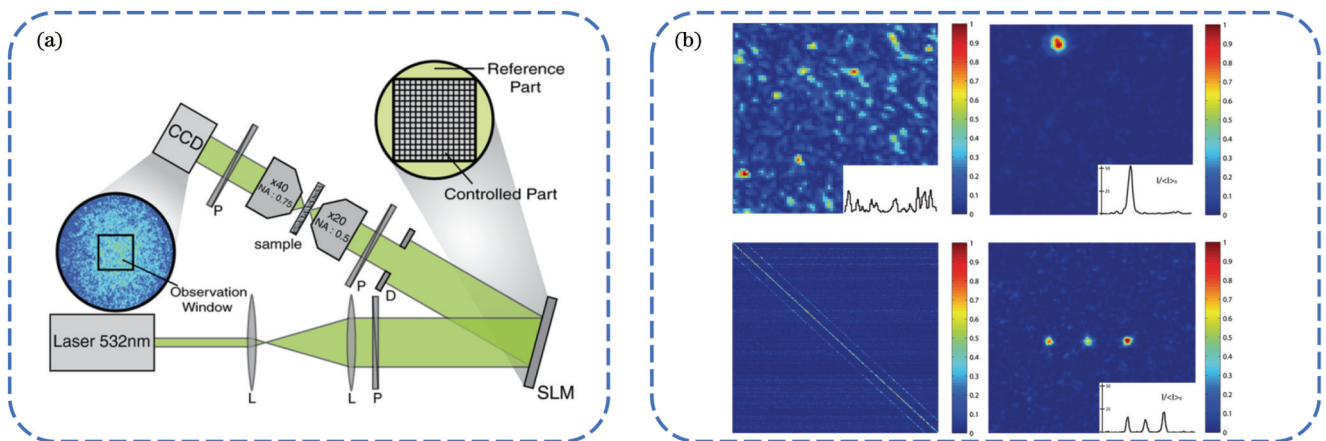


图 8 基于传输矩阵方法的透过散射介质聚焦<sup>[70]</sup>。(a)实验光路;(b)聚焦结果

Fig. 8 Focusing through turbid medium based on transmission matrix method<sup>[70]</sup>. (a) Experimental setup; (b) focusing results

方向也会遭到扰乱,形成的散斑光场中各个散斑点具有不同的偏振状态。沿横纵两个偏振方向对光场进行偏振分解构建传输矩阵,可以将偏振态加入传输矩阵的可控物理量中。根据输入输出偏振态的不同,建立了包括  $x$ - $x$ ,  $x$ - $y$ ,  $y$ - $x$  以及  $y$ - $y$  四种标量传输矩阵,并组合形成矢量传输矩阵。实验中,利用矢量传输矩阵实

现了透过散射介质的光聚焦和对焦点偏振分量的比例控制。2018年, Xiong 等<sup>[23]</sup>将偏振传输矩阵应用到多模光纤中,实现了对多模光纤输出光斑偏振状态的完全控制。2023年, Ding 等<sup>[72]</sup>报道了基于偏振传输矩阵的空间全自由度的散射调控,实现了 PBR 5 倍于二元调制方法的光聚焦,原理图如图 9(a)所示。

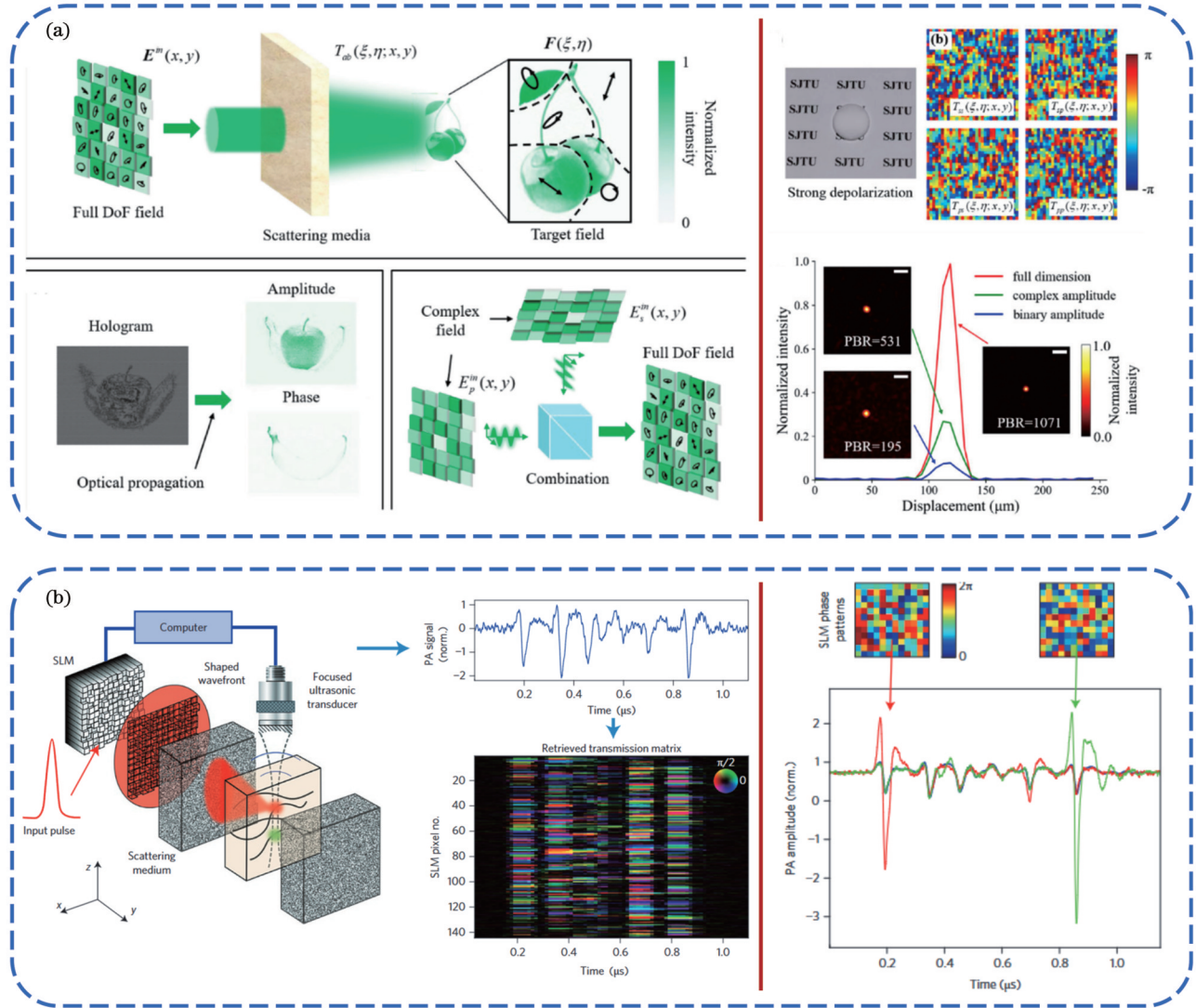


图 9 传输矩阵控制不同的物理量。(a)偏振传输矩阵<sup>[72]</sup>;(b)光声传输矩阵<sup>[73]</sup>

Fig.9 Transmission matrix controlling different physical quantities. (a) Polarization transmission matrix<sup>[72]</sup>; (b) photoacoustic transmission matrix<sup>[73]</sup>

为了使用传输矩阵方法进行散射介质的内部聚焦,2013年, Chaigne 等<sup>[73]</sup>提出光声传输矩阵模型,建立了输入相位调制与光声反馈之间的响应关系。图 9(b)为光声传输矩阵实验测量装置的示意图和聚焦结果图,光束穿透散射介质后到达吸收层,层内各目标的光声响应信号由散射介质外的超声换能器记录。实验中使用测算的光声传输矩阵实现了在吸收层的选择性聚焦。

2015年, Andreoli 等<sup>[74]</sup>提出了多光谱传输矩阵模型,用于对散射介质中宽谱激光的传输进行相干

控制。测量多光谱传输矩阵的实验装置如图 10(a)所示,首先对宽谱光源的不同光谱成分分别测量单色传输矩阵,然后以光谱为新的维度,将所有单色传输矩阵堆叠构成三维多光谱传输矩阵。多光谱传输矩阵增加了对宽谱光不同光谱成分的独立控制能力,利用其可实现包含在其光谱范围内的单色光的聚焦和宽谱光的聚焦。另外可以利用多光谱传输矩阵将宽谱光不同光谱成分聚焦至不同空间位置,此时散射介质表现出分光光栅的作用。2016年, Mounaix 等<sup>[75]</sup>研究了光谱与时域的关联关系,将多光谱传输



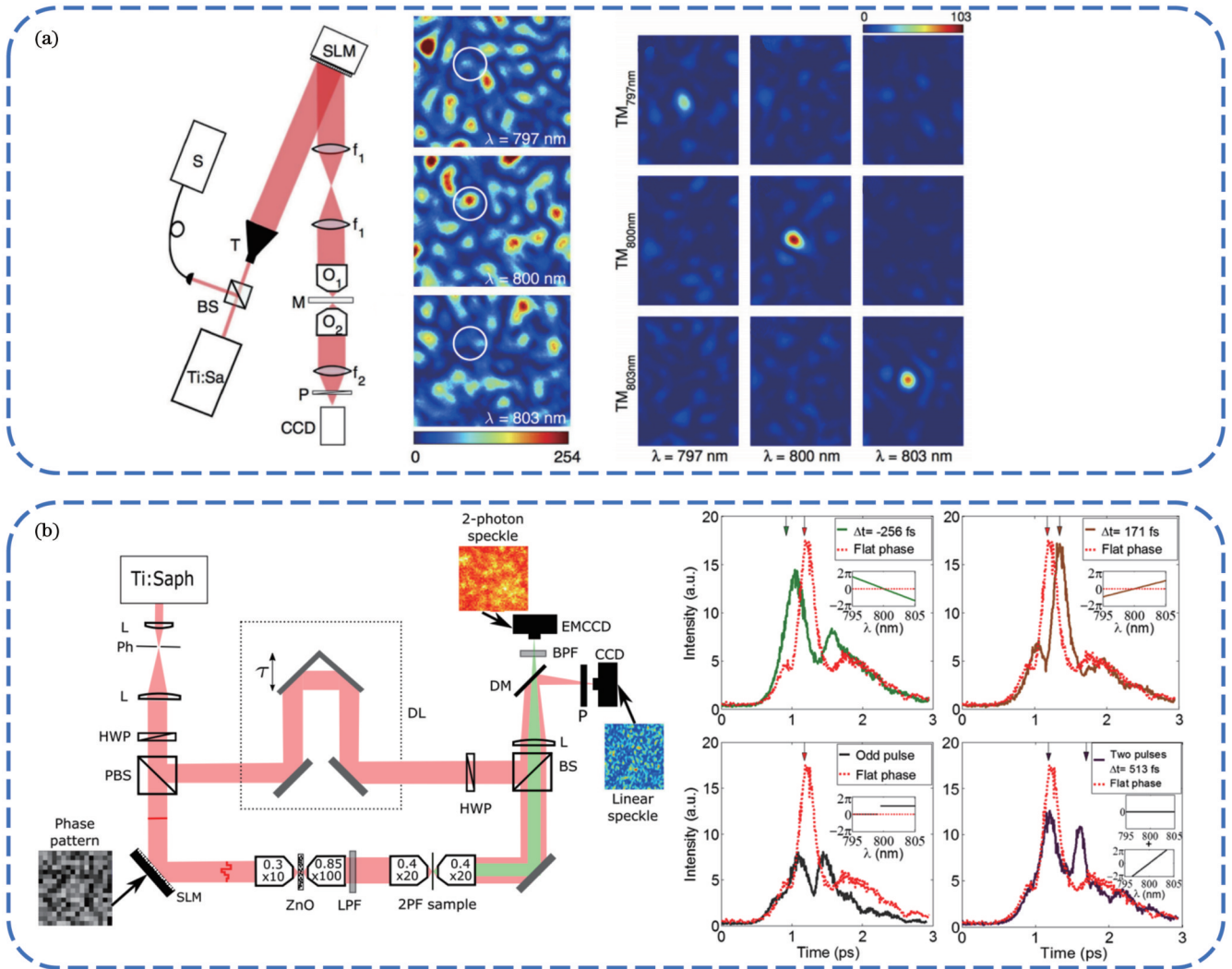


图 10 多光谱传输矩阵的应用。(a)光聚焦<sup>[74]</sup>；(b)时域整形<sup>[75]</sup>

Fig. 10 Applications of multispectral transmission matrix. (a) Optical focusing<sup>[74]</sup>; (b) time-domain shaping<sup>[75]</sup>

矩阵应用到时域整形中。实验测量装置和聚焦结果如图 10(b)所示。建立多光谱传输矩阵后,通过对不同光谱成分进行相位控制,可以任意设计光谱的相位延迟,进而在时域上实现了脉冲的提前、延迟以及脉冲峰个数的增加,实现了对光束时域包络的控制。

2020年,本课题组提出了轨道角动量(OAM)基底传输矩阵,建立了输入的OAM空间与输出模式之间的联系,实验上实现了散射介质后的单点、多点聚焦以及OAM光焦点,其实验装置及结果如图 11(a)所示<sup>[76]</sup>。2022年,本课题组利用OAM基传输矩阵实现了透过散射介质的数据传输,可以将大量的OAM通道复用实现大容量的光通信,对彩色图像的传输误码率仅为0.01%,其实验结果如图 11(b)所示<sup>[77]</sup>。

传输矩阵描述了入射光与散射光的线性响应关系,不仅可以用于上述工作中的点聚焦,同样可以用于研究光场能量输送的规律,即考虑的能量不局限于焦点处而是所有输出模式的总和。通过对传输矩阵进行

奇异值分解(SVD),可以得到散射介质的特征通道,每个特征通道所对应的特征值的平方即为该通道的能量传输效率<sup>[66]</sup>。特征通道所对应的特征向量即是输入光场分布,通过波前整形的调制可以将光束耦合进指定能量通过率的特征通道内,控制能量在散射介质内部的流动方向<sup>[78-79]</sup>。

2010年,在Popoff等<sup>[70]</sup>首次报道光学传输矩阵的实验测量时,也对测得的传输矩阵的奇异值统计分布进行了分析。2011年,Choi等<sup>[66]</sup>首次对光学特征传输通道的性质进行了探索,通过数值模拟,研究了特征传输通道在散射介质内的光场分布。此后,研究人员利用特征传输通道实现散射介质内能量传输的增强<sup>[79]</sup>和背向散射的减弱<sup>[80]</sup>,以及等离子体器件<sup>[81]</sup>或微观孔径结构内的能量耦合<sup>[82]</sup>。

2019年,Katz等<sup>[83]</sup>报道了基于特征传输通道的散射介质内部聚焦,其原理和聚焦结果如图 12(a)所示。在测量传输矩阵的过程中,加入了超声的作用,在散射介质内部产生超声焦点,与之作用的光波成分将产

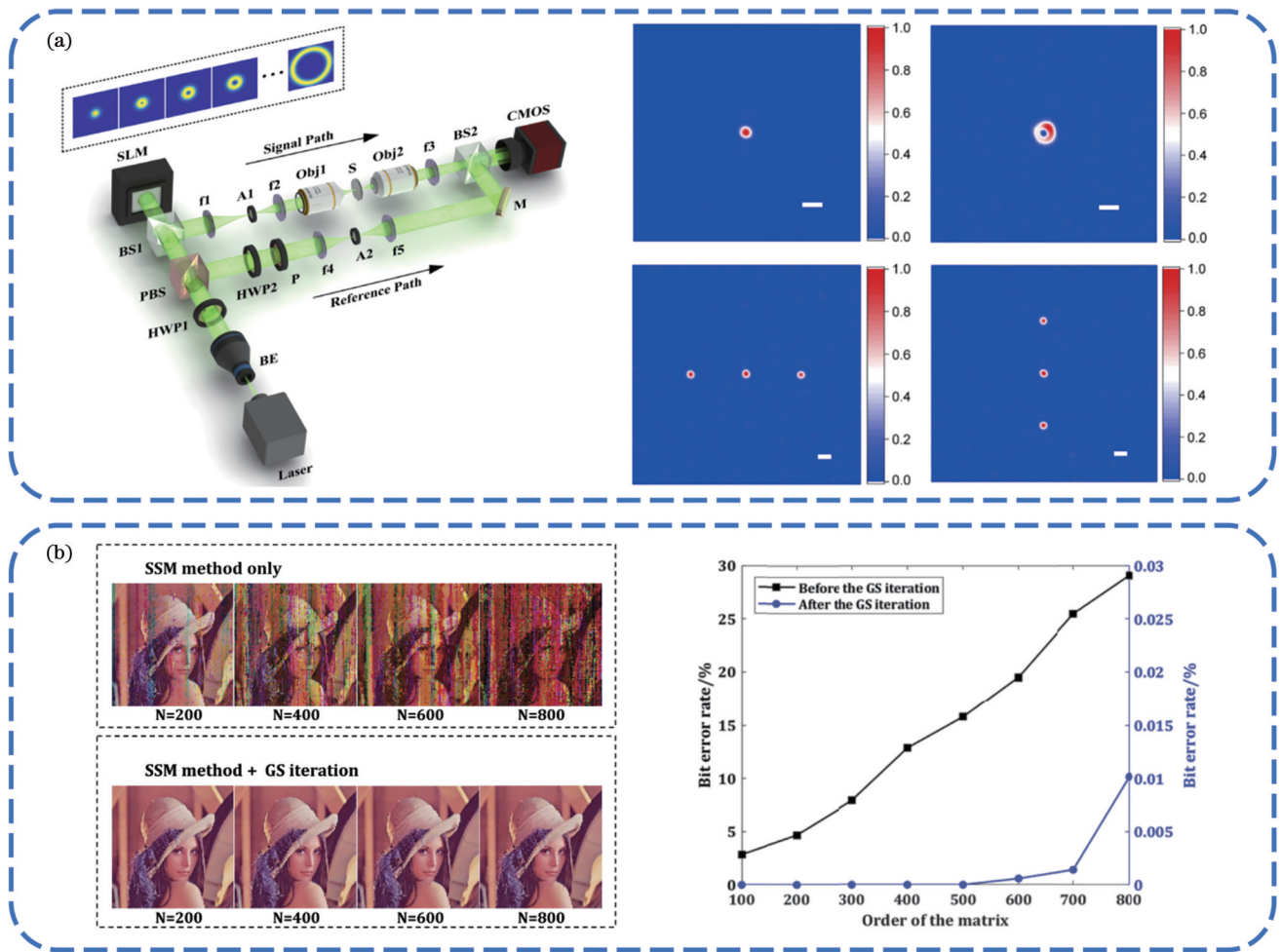


图 11 OAM 基传输矩阵的应用。(a) 透过散射介质聚焦<sup>[76]</sup>；(b) 数据传输<sup>[77]</sup>

Fig. 11 Applications of OAM based transmission matrix. (a) Focusing through scattering medium<sup>[76]</sup>；(b) data transmission<sup>[77]</sup>

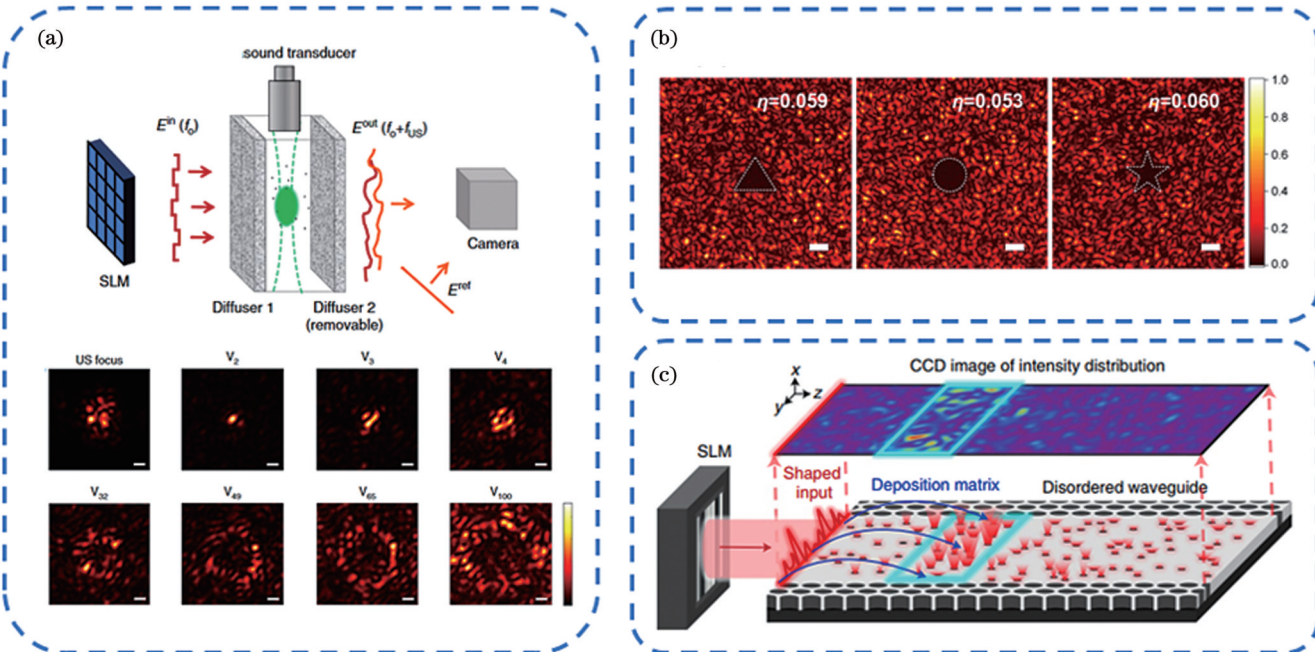


图 12 特征传输通道的应用。(a) 超声辅助光聚焦<sup>[83]</sup>；(b) 散斑抑制<sup>[64]</sup>；(c) 指定深度能量输送<sup>[65]</sup>

Fig. 12 Applications of transmission eigenchannels. (a) Ultrasound-assisted optical focusing<sup>[83]</sup>；(b) glare suppression<sup>[64]</sup>；(c) energy delivery to specified depth<sup>[65]</sup>

生频移,可以在输出场加以区分。此时计算得到的传输矩阵再进行SVD得到特征传输通道,其中最大能量通过率的特征通道即对应了能量经过超声焦点的最大化,即在散射介质内部超声焦点处实现了光聚焦。2021年,本课题组通过将光耦合进传输矩阵的低特征值特征传输通道实现了对散斑场特定区域的散斑抑制,实验中将包含100个散斑的区域强度抑制到仅6.3%,其实验结果如图12(b)所示<sup>[64]</sup>。2022年,Bender等<sup>[65]</sup>利用平行于光束传输方向的平面的强度分布进行了传输矩阵测量,称为沉积矩阵,实验装置

及结果如图12(c)所示。基于该传输矩阵的特征通道实现了在指定深度区域的能量最大化,即在散射介质内特定深度处的能量输送。

传输矩阵对于散射光强大的控制能力使得其具备应用到更多更复杂的应用场景的能力。在光聚焦和能量的输送之外,2018年,Mounaix等<sup>[84]</sup>利用多光谱传输矩阵对超短脉冲在散射介质中的传输进行控制,实现了被光散射展宽的超短脉冲的脉宽重新压缩,实验结果如图13(a)所示。2019年,Gong等<sup>[10]</sup>利用传输矩阵,由散射光场测量结果恢复OAM编码后的入射光

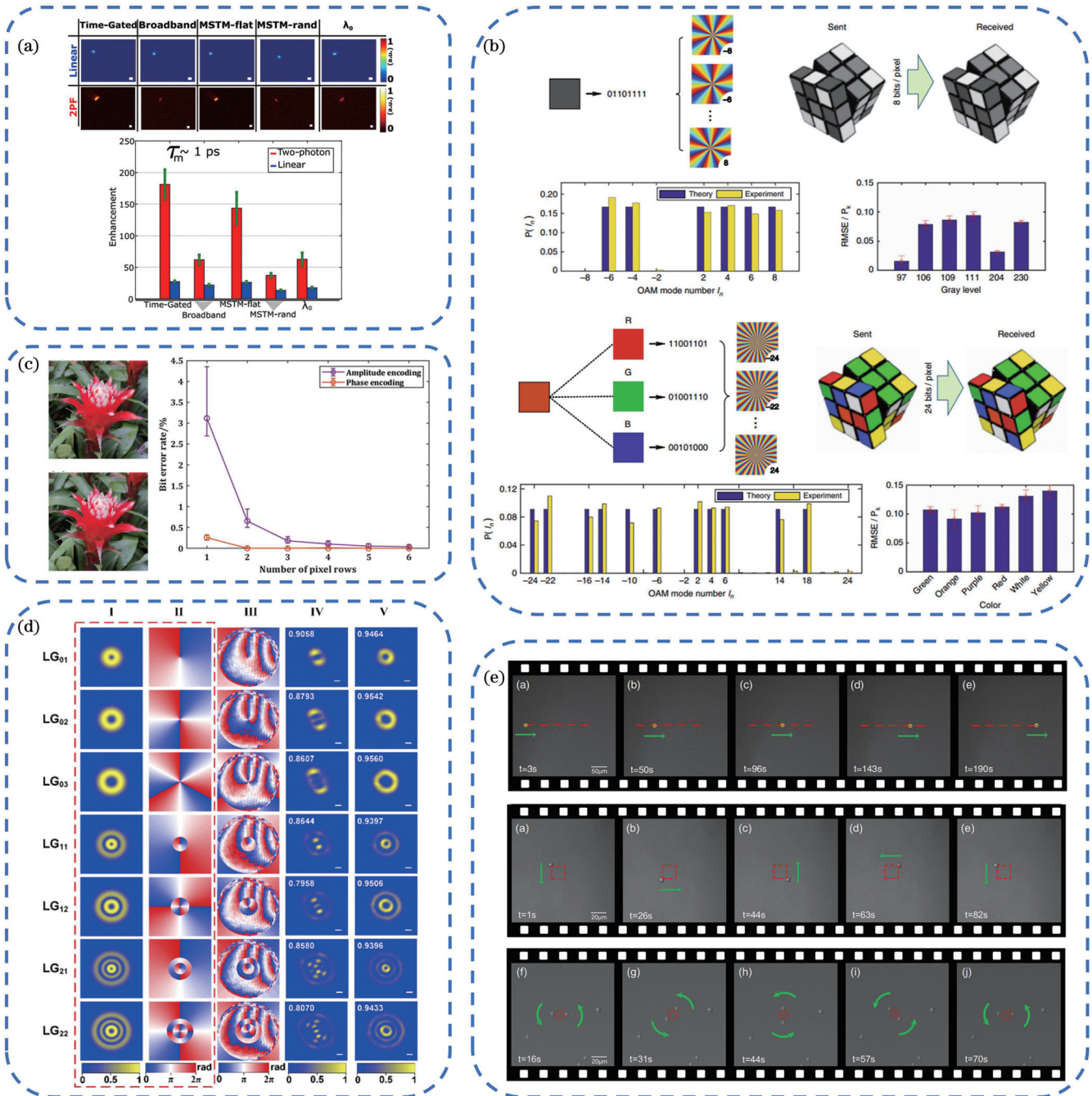


图 13 传输矩阵的应用。(a)脉宽压缩<sup>[84]</sup>;(b)OAM光通信<sup>[10]</sup>;(c)多模光纤通信<sup>[85]</sup>;(d)像差校正<sup>[86]</sup>;(e)粒子操控<sup>[18]</sup>

Fig. 13 Applications of transmission matrix. (a) Pulse width compression<sup>[84]</sup>; (b) OAM optical communication<sup>[10]</sup>; (c) multimode fiber optical communication<sup>[85]</sup>; (d) aberration correction<sup>[86]</sup>; (e) particle manipulation<sup>[18]</sup>

场并进行信息解调,实现了透过散射介质的 OAM 复用光通信,实验结果如图 13(b)所示。2023 年,本课题组利用 OAM 基传输矩阵进行相位编码的信息传输,实现了穿过多模光纤的低误码率的图像传输,实验结果如图 13(c)所示<sup>[85]</sup>。2022 年,本课题组利用传输矩阵,实现了对光学系统像差的校正,实验结果如图 13(d)所示<sup>[86]</sup>。同年,本课题组利用强度传输矩阵,实现了散射介质后的大范围高自由度的粒子操控,实验结果如图 13(e)所示<sup>[18]</sup>。

此外,随着调制器件的发展和计算技术的进步,传输矩阵方法也拥有了应用到动态场景的可能性。利用快速的一维空间光调制器和散射介质的一维-二维转化实现了 2.4 ms 内的聚焦<sup>[55]</sup>;而利用相位恢复算法,可以将传输矩阵的测量次数大幅压缩<sup>[87-88]</sup>,甚至在 0.1 s 内即可完成传输矩阵的恢复<sup>[89]</sup>;结合递归最小二乘算法,可以在线地测量动态的散射介质的传输矩阵,进而实现在动态散射环境下的聚焦<sup>[90]</sup>。

#### 4 相位共轭方法

相位共轭型波前整形技术的核心在于光路可逆原

理,点光源发出的光经过散射介质传输后在调制平面处会形成散斑光场,该散斑场的相位分布的共轭会沿原传输路径在散射介质中逆向传输,最终在点光源的位置处形成光焦点。这种思路下,可以利用强度较弱的点光源作为引导,将更强功率的光束聚焦到目标位置。并且由于相位共轭的光聚焦仅需要计算点光源通过散射介质的相位分布,而无需迭代或传输矩阵的计算,可以大幅减少聚焦所需要的时间,有潜力成为最快实现聚焦的方法并应用至动态散射介质中,如活体生物组织等。

相位共轭型的波前整形技术的核心在于对散斑场相位的测量,通过信号光与参考光干涉记录相位的方法最为常用。2008 年, Yaqoob 等<sup>[91]</sup>首次将光学相位共轭(OPC)用于透过散射介质的图像重构。实验装置如图 14(a)所示,散射光与参考光在 LiNbO<sub>3</sub>晶体内干涉,通过光折变效应以折射率调制的形式记录散射光波前信息。之后,共轭参考光经过 LiNbO<sub>3</sub>晶体,受晶体调制形成散射光的相位共轭光。相位共轭光经过散射介质后,实现了散射效应的补偿和图像信息

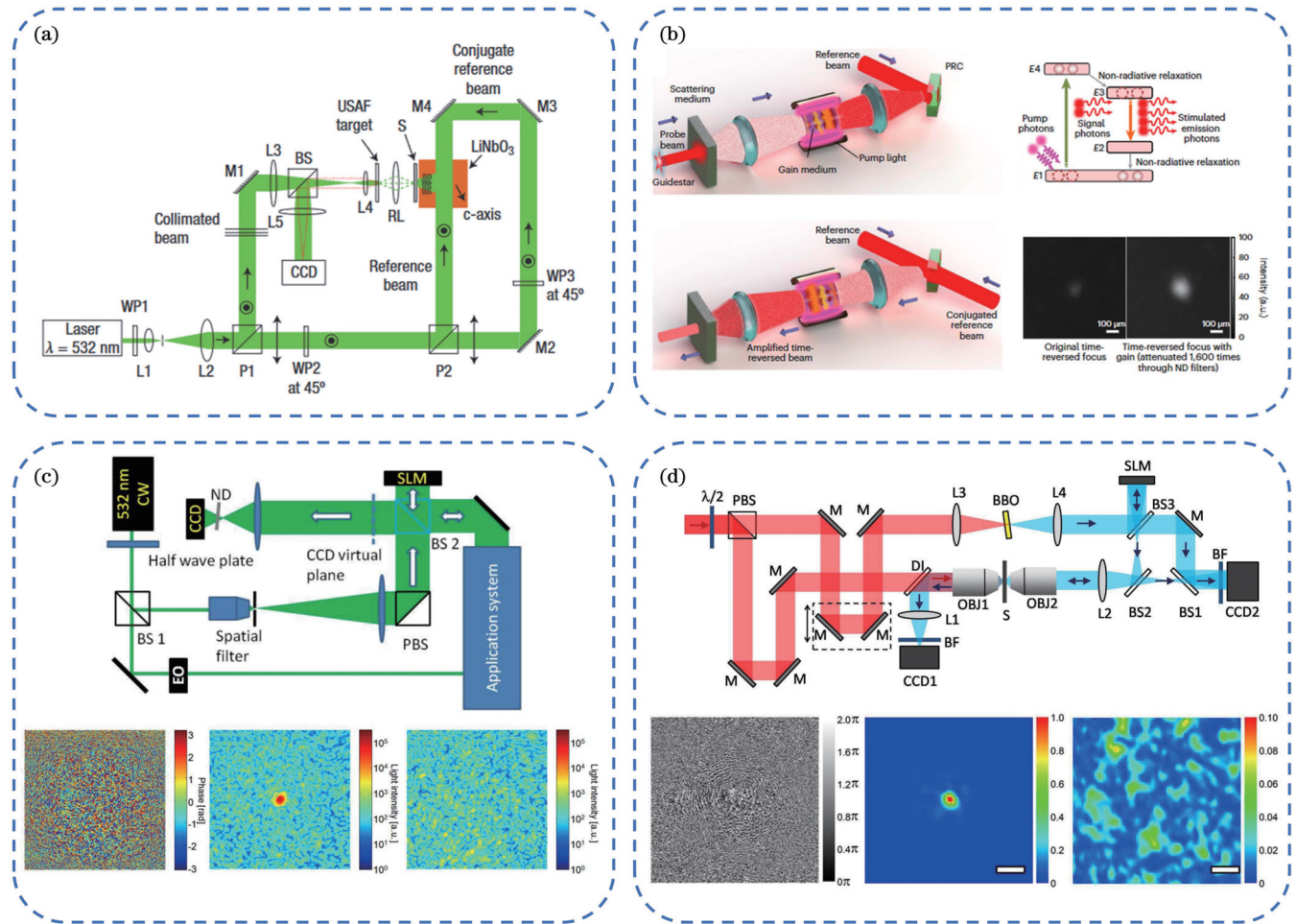


图 14 不同原理的 OPC 技术。(a)、(b)基于光折变效应的 OPC 技术<sup>[91-92]</sup>; (c)、(d)数字 OPC 技术<sup>[93-94]</sup>

Fig. 14 OPC technologies with different principles. (a), (b) OPC technology based on photorefractive effect<sup>[91-92]</sup>; (c), (d) digital OPC technology<sup>[93-94]</sup>

结合,实现了高速、高增益和高自由度的聚焦,其实验装置和聚焦结果如图 14(b)所示。对于  $10^6$  个控制单元的优化仅需  $\sim 10 \mu\text{s}$ ,实现了接近 4 个数量级的能量增益提升。

2010 年, Cui 等<sup>[93]</sup>对相位共轭系统进行了改进,提出了效率更高、同时通用性更强的数字光学相位共轭 (DOPC) 技术,其实验装置及光束传输结果如图 14(c) 所示。此系统中,相位共轭模块由相机和 SLM 共同构成,信号光和参考光在相机处干涉,对信号光进行全息测量。然后,将相位测量结果共轭之后加载到 SLM 上,调制参考光形成信号光的相位共轭光。同年, Hsieh 等<sup>[94]</sup>首次利用 DOPC 系统实现了透过散射介质的光聚焦,实验装置及聚焦结果如图 14(d) 所示。在散射介质前放置 300 nm 尺寸的 BaTiO<sub>3</sub> 纳米晶体,信号光经过晶体后形成二次谐波点光源。相位共轭模块对二次谐波散射光进行全息记录,其生成的相位共轭光回到纳米晶体处形成聚焦。

2012 年, Vellekoop 等<sup>[95]</sup>报道了一种无参考的 DOPC 系统,使用了荧光微球的激发荧光作为点光源,

实现了在微球处局部光强提升两个数量级以上。同年, Papadopoulos 等<sup>[96]</sup>首次使用多模光纤实现了 DOPC 系统,通过将聚焦光束耦合至光纤中并探测另一端散斑场的相位分布,得到用于聚焦的共轭相位,实现了对比度超过 1800 的透过多模光纤的聚焦。2017 年, Yang 等<sup>[97]</sup>报道了偏振型 DOPC 系统,从测量得到的散斑场中提取偏振态的空间分布,进而使用更加廉价和常见的偏振型 SLM 进行光聚焦,达到了与相位调制型 SLM 相同的聚焦效果。

上述工作需要依赖主动发光的点光源,为了获得透过散射介质后可探测到的散斑能量,散射介质的厚度和散射的强度受到了极大的限制。为了进一步提升聚焦深度,研究者将目光放到了穿透能力更强的其他类型的信号上,如磁场、超声等。2017 年, Ruan 等<sup>[98]</sup>报道了使用磁性颗粒作为“引导星”的 DOPC 系统,提出了场减法和调频法两种方法选择性地检测与磁性粒子作用的光场成分,实现了将光聚焦在磁性粒子标记的细胞上,原理图和聚焦结果如图 15(a) 所示。而得益于磁性微球可以通过磁场进行外部控制, 2018

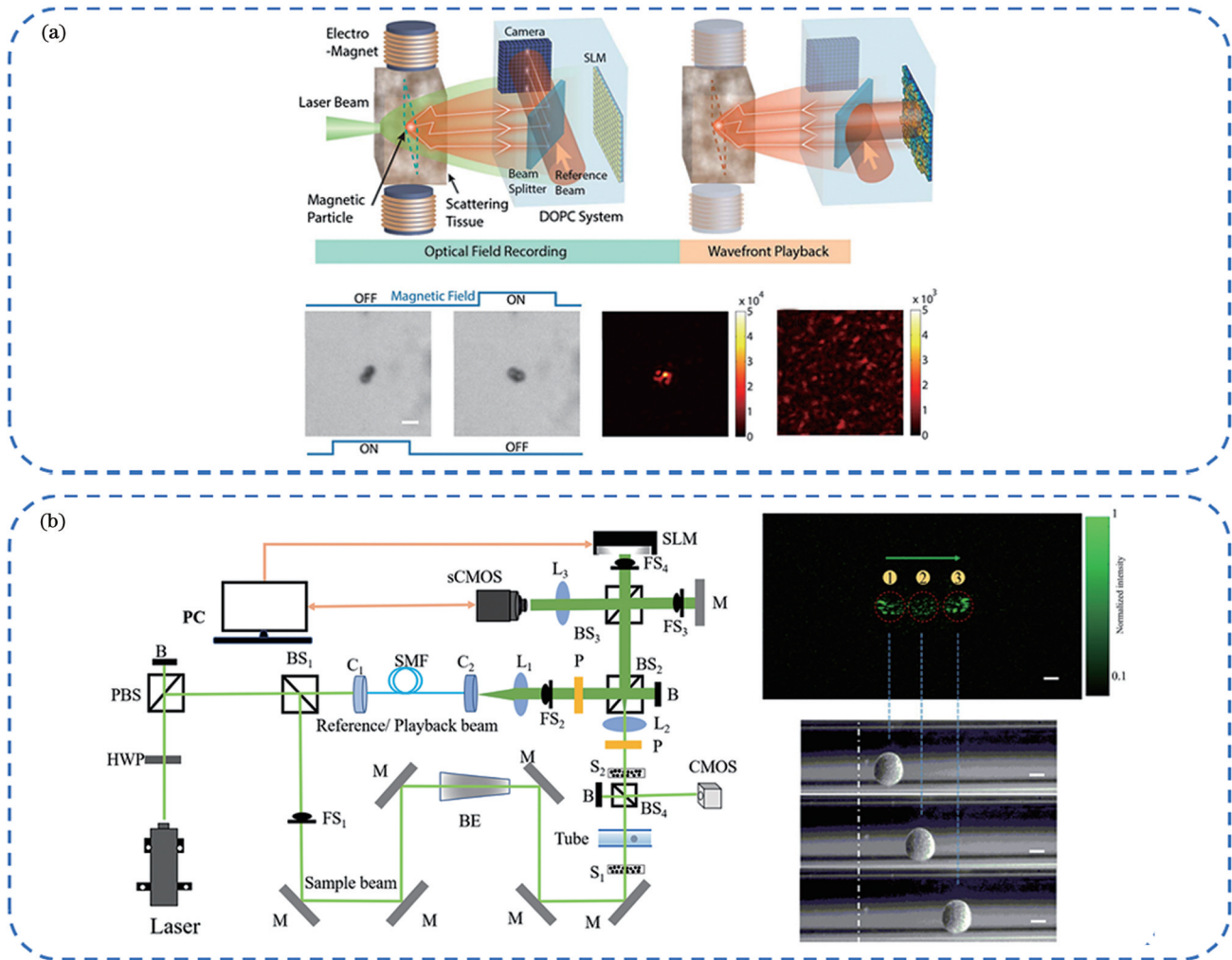


图 15 磁性粒子引导的 DOPC 系统的应用。(a) 散射介质内部聚焦<sup>[98]</sup>; (b) 动态光聚焦<sup>[99]</sup>

Fig. 15 Applications of DOPC system guided by magnetic particle. (a) Focusing inside turbid medium<sup>[98]</sup>; (b) dynamic light focusing<sup>[99]</sup>

年, Yu 等<sup>[99]</sup>报道了在散射介质内部的动态光聚焦, 焦点轨迹可由磁场外部扫描来规定, 实验装置和焦点扫描结果如图 15(b) 所示。

虽然运用磁性微球的方法可以实现较大的穿透深度和方便的外部操控, 但是需要在散射介质内部放置磁性微球, 难以实现非侵入式的散射介质内部光聚焦。2011 年, Xu 等<sup>[100]</sup>提出了时间反演超声编码光聚焦 (TRUE) 技术, 采用超声焦点作为虚拟的点光源, 其实实验装置和聚焦结果如图 16(a) 所示。实验中利用超声换能器在散射介质内部指定位置进行超声聚焦, 而经

过超声焦点的光场成分会受到声光调制而产生频移, 探测时仅筛选出这部分光场。由于这部分光场都经过了超声焦点, 那么相当于超声焦点位置处存在一个点光源, 这部分光场即这个点光源所形成的散斑场。利用  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_2$  晶体进行相位记录, 进而利用相位共轭可以在超声焦点处实现聚焦。2012 年, Wang 等<sup>[101]</sup>进一步报道了基于 DOPC 系统的 TRUE 技术, 图 16(b) 为其原理示意图。该团队将这项技术应用到了深层生物组织的成像中, 在 52.657 mm 的穿透深度下实现了  $2\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  的横向分辨率和  $36\ \mu\text{m}$  的轴向分辨率。

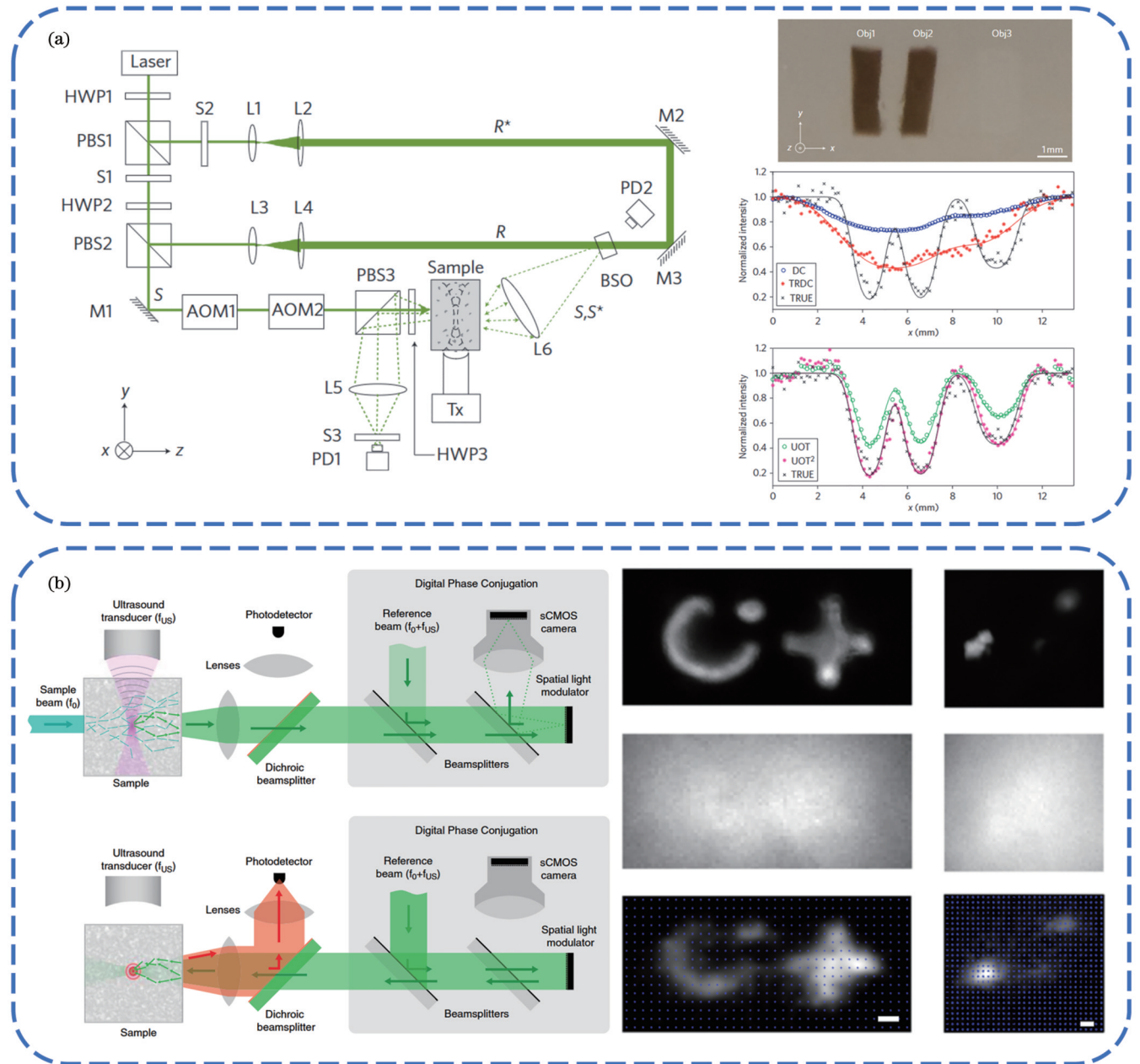


图 16 TRUE 技术应用到不同系统。(a)OPC 系统<sup>[100]</sup>; (b)DOPC 系统<sup>[101]</sup>  
 Fig. 16 TRUE method applied to different systems. (a) OPC system<sup>[100]</sup>; (b) DOPC system<sup>[101]</sup>

此项技术同时具备非侵入式内部聚焦和快速聚焦的能力, 受到了广泛关注, 大量关于 TRUE 技术的研究工作被陆续报道, 主要着眼于聚焦精度、速度的进一

步提升和应用场景的拓展上。2011 年, Lai 等<sup>[102]</sup>提出了反射式 TRUE 技术, 在穿透深度较深的位置处, 利用强度更大的背向散射光进行相位共轭, 实现了超过

160 倍散射自由程的往返穿透深度。2012 年, Si 等<sup>[103]</sup>提出了迭代式 TRUE 技术, 突破了超声焦点尺寸(一般约为数十微米)对聚焦精度的限制, 将聚焦精度提升三倍左右。2013 年, Judkewitz 等<sup>[104]</sup>提出了方差编码光的时间反转(TROVE)技术, 通过方差编码将超声焦点内大量的光场空间模式进行区分, 选择性地聚焦到目标输出模式处, 将聚焦的精度提升到了 5  $\mu\text{m}$  左右。2015 年, Liu 等<sup>[105]</sup>将响应时间在毫秒量级的光折变材料  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6:\text{Te}$  用于全息记录, 将单次聚焦所需时间压缩至 50 ms, 经测试, 在退相关时间为 5.6 ms 的动态样品内仍可有效实现聚焦。快速高质量的散射介质内部光聚焦让 TRUE 技术拥有了在深层生物组织内部应用的可能。2017 年, Ruan 等<sup>[106]</sup>首次将 TRUE 技术应用到活体生物组织的内部聚焦中, 实现了在 2 mm 厚度的活脑组织切片中的光聚焦, 并进一步应用到了神经放电的光遗传学研究中。2021 年, Cheng 等<sup>[107]</sup>提出了超声诱导的场扰动光学聚焦(UFP), 利用超声导星衍射的更亮的零阶光子作为信息载体来引导光学聚焦, 可以方便灵活地发展为双脉冲实现甚至单脉冲实现, 获得了优于传统 TRUE 技术的聚焦效果。2022 年, Luo 等<sup>[108]</sup>提出了四元相位编码的单次曝光 TRUE 技术, 将聚焦深度进一步提升到了 5.1 mm(约 40 倍平均自由程), 并且平均模式时间仅为 29 ns。

## 5 总结与展望

本文整理并介绍了基于波前整形技术的散射介质聚焦的研究进展, 主要包括了迭代优化方法、传输矩阵方法和相位共轭方法三种技术路线。其中迭代优化方法的散射介质聚焦依赖设定的反馈物理量, 通过改变输入条件提升评价价值, 最终实现目标位置处的光聚焦, 在复杂优化场景及动态散射介质中发挥重要作用; 传输矩阵方法则依赖传输矩阵的测量, 建立起输入的优化波前与目标聚焦平面上的散斑光场之间的关联, 使用时间反演操作计算实现聚焦的优化波前, 该方法为研究散射介质中光传输和聚焦的机理提供了有力的理论研究工具; 相位共轭方法则依赖目标聚焦位置处的点光源, 利用光路可逆的原理, 对接收到的散斑光场求解相位, 并将共轭相位作为输入条件实现聚焦, 这种方法所需要的计算次数最少, 目前已经应用到了动态散射介质的内部聚焦中。

通过本文的梳理可以看出, 利用波前整形技术, 散射介质已经可以被视为一类特殊的光学器件, 使用散射光甚至可以完成许多弹道光无法实现的应用需求。本文所提到的三种技术路线的发展大多围绕着算法性能、反映光场强度的反馈信号类型以及不同的应用场景开展。但是为了实现更快速、更深层和更通用的散射聚焦, 仍然面临许多挑战:

1) 迭代优化方面, 优化的耗时仍远大于活体生物组织的退相干时间, 需要进一步提升算法的收敛速度

和单次迭代中调制器件的刷新频率并降低探测器件的响应时间, 另外, 光镊、扫描式成像等应用对大视场并行优化能力也提出了更高的要求;

2) 传输矩阵方面, 随着矩阵阶数提升测量次数也成倍增长, 实现高精度的调制往往需要消耗巨大的测量时间, 需要研究在通用场景下仅利用少量数据获得高阶传输矩阵的方法;

3) 相位共轭方面, 目前非侵入式的内部聚焦仍主要依赖超声引导, 难以实现精准定位且达到衍射极限的光聚焦, 需要探索新的引导信号或反馈机制。

发展至今, 基于波前整形的散射介质聚焦已经成功实现了在散射介质内部或者穿透散射介质的动态聚焦, 为包括光操控、远距离通信、深层生物组织成像等领域的应用提供了有力的技术支持。在未来的发展中, 研究人员需要进一步完善散射介质内部的光场传输机制, 建立更精细化的物理模型, 同时探索更多维度可控制的物理量, 实现更广义的散射聚焦和光场调控, 拓展波前整形技术在光学领域中的应用范围。此外, 结合新兴的光计算、人工智能等技术, 有望实现更紧凑的光路结构和更快速高效的优化。总之, 在前沿探索的牵引和技术革新的推动下, 基于波前整形的散射介质聚焦技术将不断突破传统光学散斑的限制, 为强散射环境下的光学应用提供全新的可能。

## 参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Speckle Phenomena in optics: theory and applications[M]. Colorado: Roberts and Company Publishers, 2007.
- [2] Ma C J, Di J L, Zhang Y, et al. Reconstruction of structured laser beams through a multimode fiber based on digital optical phase conjugation[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3333-3336.
- [3] N'Gom M, Norris T B, Michiels E, et al. Mode control in a multimode fiber through acquiring its transmission matrix from a reference-less optical system[J]. Optics Letters, 2018, 43(3): 419-422.
- [4] Li S H, Saunders C, Lum D J, et al. Compressively sampling the optical transmission matrix of a multimode fibre[J]. Light, Science & Applications, 2021, 10(1): 88.
- [5] Wang L, Jacques S L. Use of a laser beam with an oblique angle of incidence to measure the reduced scattering coefficient of a turbid medium[J]. Applied Optics, 1995, 34(13): 2362-2366.
- [6] Volpe G, Kurz L, Callegari A, et al. Speckle optical tweezers: micromanipulation with random light fields[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18159-18167.
- [7] Čizmár T, Mazilu M, Dholakia K. In situ wavefront correction and its application to micromanipulation[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 388-394.
- [8] Gieseler J, Gomez-Solano J R, Magazzù A, et al. Optical tweezers: from calibration to applications: a tutorial[J]. Advances in Optics and Photonics, 2021, 13(1): 74-241.
- [9] Lee K, Park Y. Exploiting the speckle-correlation scattering matrix for a compact reference-free holographic image sensor[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13359.
- [10] Gong L, Zhao Q, Zhang H, et al. Optical orbital-angular-momentum-multiplexed data transmission under high scattering[J]. Light, Science & Applications, 2019, 8: 27.
- [11] Zhu L, Soldevila F, Moretti C, et al. Large field-of-view non-

- invasive imaging through scattering layers using fluctuating random illumination[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1447.
- [12] Yoon S, Kim M, Jang M, et al. Deep optical imaging within complex scattering media[J]. *Nature Reviews Physics*, 2020, 2: 141-158.
- [13] Turtaev S, Leite I T, Altwegg-Boussac T, et al. High-fidelity multimode fibre-based endoscopy for deep brain *in vivo* imaging [J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 92.
- [14] 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.
- [15] Freund I. Looking through walls and around corners[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1990, 168(1): 49-65.
- [16] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [17] Peng T, Li R Z, An S, et al. Real-time optical manipulation of particles through turbid media[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4858-4866.
- [18] Liu K G, Zhang H K, Du S S, et al. Particle manipulation behind a turbid medium based on the intensity transmission matrix[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(10): 2293-2301.
- [19] 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: 116-123.
- [20] Lai P X, Wang L D, Tay J W, et al. Photoacoustically guided wavefront shaping for enhanced optical focusing in scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(2): 126-132.
- [21] Vellekoop I M, Lagendijk A, Mosk A P. Exploiting disorder for perfect focusing[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4: 320-322.
- [22] Matthès M W, del Hougne P, de Rosny J, et al. Optical complex media as universal reconfigurable linear operators[J]. *Optica*, 2019, 6(4): 465-472.
- [23] Xiong W, Hsu C W, Bromberg Y, et al. Complete polarization control in multimode fibers with polarization and mode coupling [J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 54.
- [24] Wang D, Sahoo S K, Zhu X W, et al. Non-invasive super-resolution imaging through dynamic scattering media[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3150.
- [25] Cao J, Yang Q, Miao Y S, et al. Enhance the delivery of light energy ultra-deep into turbid medium by controlling multiple scattering photons to travel in open channels[J]. *Light, Science & Applications*, 2022, 11(1): 108.
- [26] Feng Q, Zhang B, Liu Z P, et al. Research on intelligent algorithms for amplitude optimization of wavefront shaping[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3240-3244.
- [27] Kong F T, Silverman R H, Liu L P, et al. Photoacoustic-guided convergence of light through optically diffusive media[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2053-2055.
- [28] Qiao Y Q, Peng Y J, Zheng Y L, et al. Second-harmonic focusing by a nonlinear turbid medium via feedback-based wavefront shaping[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1895-1898.
- [29] Vellekoop I M, Mosk A P. Phase control algorithms for focusing light through turbid media[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(11): 3071-3080.
- [30] 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.
- [31] Wang Z Q, Zhao Q, Yu P P, et al. Bat algorithm-enabled binary optimization for scattered light focusing[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(10): 102002.
- [32] Fayyaz Z, Mohammadian N, Salimi F, et al. Simulated annealing optimization in wavefront shaping controlled transmission[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(21): 6233-6242.
- [33] Woo C M, Li H H, Zhao Q, et al. Dynamic mutation enhanced particle swarm optimization for optical wavefront shaping[J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 18420-18426.
- [34] Yang J M, He Q Z, Liu L X, et al. Anti-scattering light focusing by fast wavefront shaping based on multi-pixel encoded digital-micromirror device[J]. *Light, Science & Applications*, 2021, 10(1): 149.
- [35] Huang H L, Chen Z Y, Sun C Z, et al. Light focusing through scattering media by particle swarm optimization[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(10): 104202.
- [36] Rahmani B, Loterie D, Konstantinou G, et al. Multimode optical fiber transmission with a deep learning network[J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 69.
- [37] Tahir W, Wang H, Tian L. Adaptive 3D descattering with a dynamic synthesis network[J]. *Light, Science & Applications*, 2022, 11(1): 42.
- [38] Horisaki R, Takagi R, Tanida J. Learning-based focusing through scattering media[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4358-4362.
- [39] Turpin A, Vishniakou I, Seelig J D. Light scattering control in transmission and reflection with neural networks[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30911-30929.
- [40] Goel S, Conti C, Leedumrongwatthanakun S, et al. Referenceless characterization of complex media using physics-informed neural networks[J]. *Optics Express*, 2023, 31(20): 32824-32839.
- [41] Luo Y Q, Yan S X, Li H H, et al. Focusing light through scattering media by reinforced hybrid algorithms[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(1): 016109.
- [42] Liu K G, Zhang H K, Zhang B, et al. Hybrid optimization algorithm based on neural networks and its application in wavefront shaping[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15517-15527.
- [43] Fan M Y, Zhu J, Wang S T, et al. Light scattering control with the two-step focusing method based on neural networks and multi-pixel coding[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 46888-46899.
- [44] Woo C M, Zhao Q, Zhong T T, et al. Optimal efficiency of focusing diffused light through scattering media with iterative wavefront shaping[J]. *APL Photonics*, 2022, 7(4): 046109.
- [45] Vellekoop I M, van Putten E G, Lagendijk A, et al. Demixing light paths inside disordered metamaterials[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 67-80.
- [46] Boniface A, Blochet B, Dong J, et al. Noninvasive light focusing in scattering media using speckle variance optimization [J]. *Optica*, 2019, 6(11): 1381-1385.
- [47] Conkey D B, Caravaca-Aguirre A M, Dove J D, et al. Super-resolution photoacoustic imaging through a scattering wall[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7902.
- [48] Shi J H, Wong T T W, He Y, et al. High-resolution, high-contrast mid-infrared imaging of fresh biological samples with ultraviolet-localized photoacoustic microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 609-615.
- [49] Aulbach J, Gjonaj B, Johnson P, et al. Spatiotemporal focusing in opaque scattering media by wave front shaping with nonlinear feedback[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29237-29251.
- [50] Tay J W, Lai P X, Suzuki Y, et al. Ultrasonically encoded wavefront shaping for focusing into random media[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3918.
- [51] Tzang O, Niv E, Caravaca-Aguirre A M, et al. Thermal expansion feedback for wave-front shaping[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6122-6131.
- [52] Tian B X, Rauer B, Boniface A, et al. Non-invasive chemically selective energy delivery and focusing inside a scattering medium guided by Raman scattering[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2145-2148.
- [53] Akbulut D, Huisman T J, van Putten E G, et al. Focusing light



- through random photonic media by binary amplitude modulation [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4017-4029.
- [54] Cui M. Parallel wavefront optimization method for focusing light through random scattering media[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 870-872.
- [55] Tzang O, Niv E, Singh S, et al. Wavefront shaping in complex media with a 350 kHz modulator via a 1D-to-2D transform[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 788-793.
- [56] Jang J, Lim J, Yu H, et al. Complex wavefront shaping for optimal depth-selective focusing in optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2890-2902.
- [57] Katz O, Small E, Guan Y F, et al. Noninvasive nonlinear focusing and imaging through strongly scattering turbid layers[J]. *Optica*, 2014, 1(3): 170-174.
- [58] Park J H, Sun W, Cui M. High-resolution *in vivo* imaging of mouse brain through the intact skull[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(30): 9236-9241.
- [59] Wijethilake N, Anandakumar M, Zheng C, et al. DEEP-squared: deep learning powered de-scattering with Excitation Patterning[J]. *Light, Science & Applications*, 2023, 12(1): 228.
- [60] Bai B J, Li Y H, Luo Y, et al. All-optical image classification through unknown random diffusers using a single-pixel diffractive network[J]. *Light, Science & Applications*, 2023, 12(1): 69.
- [61] 章辰, 高玉峰, 叶世蔚, 等. 自适应光学在双光子显微成像技术中的应用[J]. *中国激光*, 2023, 50(3): 0307103.  
Zhang C, Gao Y F, Ye S W, et al. Application of adaptive optics in two-photon microscopic imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(3): 0307103.
- [62] 田冰心, 韩军, 刘丙才. 随机散射介质内非侵入式深度聚焦技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10): 1029001.  
Tian B X, Han J, Liu B C. Research on non-invasive deep focusing in random scattering medium[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): 1029001.
- [63] 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.
- [64] Zhang H K, Zhang B, Liu K G, et al. Large-scale, high-contrast glare suppression with low-transmittance eigenchannels of aperture-target transmission matrices[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1498-1501.
- [65] Bender N, Yamilov A, Goetschy A, et al. Depth-targeted energy delivery deep inside scattering media[J]. *Nature Physics*, 2022, 18: 309-315.
- [66] Choi W, Mosk A P, Park Q H, et al. Transmission eigenchannels in a disordered medium[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(13): 134207.
- [67] Ni F C, Liu H G, Zheng Y L, et al. Nonlinear harmonic wave manipulation in nonlinear scattering medium via scattering-matrix method[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(4): 046010.
- [68] Judkewitz B, Horstmeyer R, Vellekoop I M, et al. Translation correlations in anisotropically scattering media[J]. *Nature Physics*, 2015, 11: 684-689.
- [69] Shui Y Y, Wang T, Zhou J Y, et al. Scattered light imaging beyond the memory effect using the dynamic properties of thick turbid media[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(2): 026010.
- [70] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 100601.
- [71] Tripathi S, Paxman R, Bifano T, et al. Vector transmission matrix for the polarization behavior of light propagation in highly scattering media[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 16067-16076.
- [72] Ding C X, Shao R J, Qu Y, et al. Spatial full degree-of-freedom scattered optical field modulation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(9): 2300104.
- [73] Chaigne T, Katz O, Boccaro A C, et al. Controlling light in scattering media non-invasively using the photoacoustic transmission matrix[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 58-64.
- [74] 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.
- [75] Mounaix M, Andreoli D, Defienne H, et al. Spatiotemporal coherent control of light through a multiple scattering medium with the multispectral transmission matrix[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(25): 253901.
- [76] Zhang H K, Zhang B, Liu Q. OAM-basis transmission matrix in optics: a novel approach to manipulate light propagation through scattering media[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15006-15015.
- [77] Liu Z Q, Zhang H K, Liu K G, et al. Data transmission under high scattering based on OAM-basis transmission matrix[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(17): 4580-4583.
- [78] Rotter S, Gigan S. Light fields in complex media: Mesoscopic scattering meets wave control[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(1): 015005.
- [79] Kim M, Choi Y, Yoon C, et al. Maximal energy transport through disordered media with the implementation of transmission eigenchannels[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 581-585.
- [80] Kim M, Choi W, Yoon C, et al. Exploring anti-reflection modes in disordered media[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12740-12749.
- [81] Jo Y, Choi W, Seo E, et al. Maximizing energy coupling to complex plasmonic devices by injecting light into eigenchannels [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 9779.
- [82] Yamilov A G, Sarma R, Yakovlev V V, et al. Coherent injection of light into an absorbing scattering medium with a microscopic pore[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2189-2192.
- [83] Katz O, Ramaz F, Gigan S, et al. Controlling light in complex media beyond the acoustic diffraction-limit using the acousto-optic transmission matrix[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 717.
- [84] Mounaix M, Ta D M, Gigan S. Transmission matrix approaches for nonlinear fluorescence excitation through multiple scattering media[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2831-2834.
- [85] Liu Z Q, Zhang B, Zhang H K, et al. Multi-channel data transmission through a multimode fiber based on OAM phase encoding[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(21): 5615-5618.
- [86] Liu K G, Zhang H K, Liu Z Q, et al. Transmission matrix-based phase correction for optical systems[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(19): 5216-5219.
- [87] Cheng S F, Zhang X Y, Zhong T T, et al. Nonconvex optimization for optimum retrieval of the transmission matrix of a multimode fiber[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(6): 066005.
- [88] Zhong J S, Wen Z, Li Q Z, et al. Efficient reference-less transmission matrix retrieval for a multimode fiber using fast Fourier transform[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(5): 056007.
- [89] Ancora D, Dominici L, Gianfrate A, et al. Speckle spatial correlations aiding optical transmission matrix retrieval: the smoothed Gerchberg-Saxton single-iteration algorithm[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(10): 2349-2358.
- [90] Valzania L, Gigan S. Online learning of the transmission matrix of dynamic scattering media[J]. *Optica*, 2023, 10(6): 708-716.
- [91] 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.
- [92] Cheng Z T, Li C M Y, Khadria A, et al. High-gain and high-speed wavefront shaping through scattering media[J]. *Nature*

- Photonics, 2023, 17(4): 299-305.
- [93] Cui M, Yang C H. Implementation of a digital optical phase conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3444-3455.
- [94] Hsieh C L, Pu Y, Grange R, et al. Digital phase conjugation of second harmonic radiation emitted by nanoparticles in turbid media[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12283-12290.
- [95] Vellekoop I M, Cui M, Yang C H. Digital optical phase conjugation of fluorescence in turbid tissue[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(8): 081108.
- [96] Papadopoulos I N, Farahi S, Moser C, et al. Focusing and scanning light through a multimode optical fiber using digital phase conjugation[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10583-10590.
- [97] Yang J M, Shen Y C, Liu Y, et al. Focusing light through scattering media by polarization modulation based generalized digital optical phase conjugation[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(20): 201108.
- [98] Ruan H W, Haber T, Liu Y, et al. Focusing light inside scattering media with magnetic-particle-guided wavefront shaping [J]. Optica, 2017, 4(11): 1337-1343.
- [99] Yu Z P, Huangfu J T, Zhao F Y, et al. Time-reversed magnetically controlled perturbation (TRMCP) optical focusing inside scattering media[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2927.
- [100] Xu X, Liu H L, Wang L V. Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media[J]. Nature Photonics, 2011, 5(3): 154-157.
- [101] Wang Y M, Judkewitz B, Dimarzio C A, et al. Deep-tissue focal fluorescence imaging with digitally time-reversed ultrasound-encoded light[J]. Nature Communications, 2012, 3: 928.
- [102] Lai P X, Xu X, Liu H L, et al. Reflection-mode time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into turbid media[J]. Journal of Biomedical Optics, 2011, 16(8): 080505.
- [103] Si K, Fiolka R, Cui M. Breaking the spatial resolution barrier via iterative sound-light interaction in deep tissue microscopy[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 748.
- [104] Judkewitz B, Wang Y M, Horstmeyer R, et al. Speckle-scale focusing in the diffusive regime with time-reversal of variance-encoded light (TROVE) [J]. Nature Photonics, 2013, 7(4): 300-305.
- [105] Liu Y, Lai P X, Ma C, et al. Optical focusing deep inside dynamic scattering media with near-infrared time-reversed ultrasonically encoded (TRUE) light[J]. Nature Communications, 2015, 6: 5904.
- [106] Ruan H W, Brake J, Robinson J E, et al. Deep tissue optical focusing and optogenetic modulation with time-reversed ultrasonically encoded light[J]. Science Advances, 2017, 3(12): eaao5520.
- [107] Cheng Z T, Wang L V. Focusing light into scattering media with ultrasound-induced field perturbation[J]. Light, Science & Applications, 2021, 10(1): 159.
- [108] Luo J W, Liu Y, Wu D X, et al. High-speed single-exposure time-reversed ultrasonically encoded optical focusing against dynamic scattering[J]. Science Advances, 2022, 8(50): eadd9158.

## From Random Speckle to “Opaque Lens”—Scattered Light Focusing Technique Based on Wavefront Shaping (Invited)

Liu Kaige<sup>1,2</sup>, Zhang Hengkang<sup>3</sup>, Fu Xing<sup>1,2\*\*</sup>, Liu Qiang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Photonics Control Technology by Ministry of Education, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>3</sup>Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China

### Abstract

**Significance** Scattering medium is a substance commonly found in nature such as turbid atmosphere, smoke, and biological tissues. Coherent light beams propagating through scattering media will be disrupted due to random scattering effects. The wavefront will be destroyed, and the transmission direction will deviate from the original input direction and becomes chaotic. Random scattered light interference will form a particle-like intensity pattern, known as an “optical speckle”. In multi-mode fibers, due to mode dispersion and inter-modal interference, a similar scattering distribution will be formed. Thus, multi-mode fibers are also regarded as a special class of scattering medium.

Due to the scattering phenomenon, it is difficult to maintain the original spatial distribution of the light beam, and the energy is exponentially attenuated with the increasing penetration depth, which greatly limits the applications of advanced technologies such as optical tweezers, optical communications, and biomedicine in a strong scattering environment. However, in 1990, Freund proposed that light scattering in static scattering media is a deterministic linear process, a property that reveals the possibility of reutilizing the energy of the scattered light field. Due to the existence of a deterministic response relationship between incident and scattered lights, suitable input conditions can lead to the formation of the desired distribution of the output light field after passing through the scattering medium. In 2007, Vellekoop and

Mosk put forward the concept of optical wavefront shaping whereby optimizing the distribution of the incident light wavefront leads to an in-phase coherent superposition of the light field at the target point, which thus achieves a focused light field that reaches the diffraction limit after the scattering medium. The focusing spot that reaches the diffraction limit is realized after the scattering medium. The emergence of wavefront shaping technology makes it possible to effectively employ the scattered light, thereby overcoming the limitations of the scattering problem for the above optical applications.

With the development of modulation devices and computer technology in recent years, increasingly more wavefront shaping methods have been applied to scattering medium focusing, mainly including iterative optimization methods, transmission matrix methods, and phase conjugate methods. The focusing quality and speed have been continuously improved, and exciting progress has been made in the applications based on this. By adopting wavefront shaping techniques, precise light manipulation through strong scattering media has become possible. The intensity of fluorescence excitation in deep biological tissues can be greatly enhanced to expand the penetration depth of fluorescence imaging. Additionally, even the scattering media can be adopted to improve the numerical aperture of the focusing objective lens and thus achieve focusing beyond the diffraction limit. Thanks to the wavefront shaping technology, the scattering medium has become a new type of optical device with the ultra-high degree of freedom of operation, which can realize some special applications that cannot be accomplished by ballistic light, such as functional modules in optical computing, super-resolution imaging, and directional energy delivery. Therefore, it is necessary to sort out the representative studies of wavefront shaping-based optical focusing technology for scattering media in recent years and the outlook on the future development direction.

**Progress** Focusing through turbid medium based on wavefront shaping technique is mainly divided into three technical routes of the iterative optimization method, transmission matrix method, and phase conjugate method, with the basic principles shown in Fig. 1. Among them, the iterative optimization method relies on the set feedback physical quantities, improves the evaluation value by changing the input conditions, and finally realizes the light focusing at the target position. Meanwhile, this method plays an important role in complex optimization scenarios and dynamic scattering media. Currently, the most employed ones are intelligent optimization algorithms (Fig. 3) and neural network algorithms (Fig. 4). Diverse feedback signals further broaden the applications of this method (Fig. 7). On the other hand, the transmission matrix method relies on the measurement of the transmission matrix to establish a correlation between the input optimized wavefront and the scattered light field on the target focusing plane. Additionally, it employs the operation of time inversion to calculate the optimized wavefront for achieving focusing, which provides a powerful theoretical research tool for studying the mechanism of light transmission and focusing in scattering media (Fig. 8). By depending on the physical quantities of interest, various types of transport matrices have been developed (Figs. 9–11) and adopted in a variety of fields such as energy transport, optical communication, and particle manipulation (Figs. 12–13). The phase conjugate method relies on the light source placed at the target focusing position and utilizes the reversibility principle of the optical path to solve the phase of the received scattering light field. The utilization of the conjugate phase as the input condition can achieve focusing, which requires the fewest number of calculations and is currently applied to internal focusing of dynamic scattering media (Figs. 15–16).

**Conclusions and Prospects** Till now, scattering medium focusing based on wavefront shaping has successfully realized dynamic focusing inside or through the scattering medium, providing powerful technical support for applications including optical manipulation, long-distance communication, and deep biological tissue imaging. In future development, researchers should further improve the optical field transport mechanism inside the scattering medium, build a more refined physical model, and explore more dimensions of controllable physical quantities. Finally, broader scattering focusing and optical field modulation can be achieved, with the application scope of wavefront shaping technology in optics expanded. Additionally, combined with emerging optical computing, artificial intelligence, and other technologies, it is expected to achieve more compact optical path structure and faster and more efficient optimization. In conclusion, under the traction of cutting-edge exploration and the impetus of technological innovation, the scattering medium focusing technology based on wavefront shaping will continue to break through the limitations of traditional optical scattering and provide brand-new possibilities for optical applications in strong scattering environments.

**Key words** scattering medium; wavefront shaping; optical focusing; iterative optimization; transmission matrix; optical phase conjugation