

用于快速光场调控的二值化计算全息法的研究进展

方兆翔^{1,2}, 赵娟^{1*}, 肖振中^{2**}, 师少光^{2,3}, 孙瑞³, 朱礼彦⁴

¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;

²奥比中光科技集团有限公司, 广东 深圳 518057;

³深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060;

⁴中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230026

摘要 在相干时间内, 研究迅速、灵活地完成波前测量和调控操作的光场调控系统意义重大。这种快速光场调控系统在生物医学和光通信等领域具有重要的应用价值, 它为相干光在急变散射介质中的有效应用提供了重要的研究基础, 而数字微镜器件与计算全息法则为这一技术的实现提供了切实可行的研究思路。介绍了快速光场调控技术的研究意义及其在光学相干领域中的应用进展, 并对当前用于数字微镜器件实现快速波前调控的多种二值化计算全息算法进行综述, 具体论述了它们的原理和特点, 同时对这些全息算法所存在的问题进行总结, 最后展望了计算全息法的未来发展趋势。

关键词 物理光学; 快速光场调控; 散射介质; 数字微镜器件; 二值化计算全息算法

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0200004

Recent Advances of Binary Computed Holography in High-Speed Wavefront Modulation

Fang Zhaoxiang^{1,2}, Zhao Juan^{1*}, Xiao Zhenzhong^{2**}, Shi Shaoguang^{2,3},
Sun Rui³, Zhu Liyan⁴

¹Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences,
Shenzhen, Guangdong 518055, China;

²Shenzhen Orbbec Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518057, China;

³College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University,
Shenzhen, Guangdong 518060, China;

⁴School of Information Science Technology, University of Science and
Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The wavefront modulation system, which swiftly and flexibly performed the wavefront measuring and shaping in a coherent time, is vital in biomedical and optical communications. This high-speed wavefront modulation system, in particular, sets the basis for the effective application of coherent beams in the rapidly-changing scattering media, and digital micromirror devices combined with computed holography are an efficient method for the implementation of this technology. In this study, first, the importance, research advancement, and the application

收稿日期: 2021-03-17; 修回日期: 2021-04-02; 录用日期: 2021-04-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61805162)、广东省重点领域研发计划资助(2019B010149002)

通信作者: *juan.zhao@siat.ac.cn; **xiaozhenzhong@orbbec.com

of high-speed wavefront modulation at coherent optical areas were introduced; thereafter, various binary computed holographic methods used in the current wavefront modulation technique were reviewed. The principles and the features of the holographic methods were specifically discussed, existing challenges in the holographic algorithm were summarized, and the trend of the binary computed holography was forecasted.

Key words physical optics; high-speed wavefront modulation; scattering media; digital micromirror device; binary computed holography

1 引 言

激光自发现以来,因拥有高相干性和方向性等优点受到了各界的广泛关注,极大地推动了光学的发展与进步。随着激光在不同领域应用的迅速发展,为实现特定功能的应用与效率的提升,光场波前调控技术被广泛运用于光束空间传输、调控与相关研究中。例如,光场调控技术被用于制备具有特殊传输性质和空间结构的新型光束,包括拥有相位奇点的涡旋光束^[1-5]、无衍射 Bessel 光束^[6-10]和自加速 Airy 光束^[11-14]等,从而实现了新奇功能及特定场景下的应用。与传统高斯光束相比,具有无衍射特性的结构光束在复杂介质中仍具备良好的保真度和传输性质。这种用于复杂场景的波前调控技术在相干光学领域得到了广泛的应用,是当今生物光学领域和空间光通信领域的研究热点^[15-19]。此外,当相干光束进入到大气、云雾与生物组织等介质中传输时,散射效应使得入射光所携带的波前信息受到极大的随机扰动,导致光束失去原来入射光场的性质(空间相干性和方向性),进而严重限制了相干光学领域的深度应用。光束在生物组织等强散射介质中传输时,足够的聚焦深度是进行有效的光学操控和治疗等应用的基础,但因散射效应导致传统的光学聚焦深度只有约 1 mm^[20-21],各类光学系统在生物体上的应用受到极大的限制;光的散射问题也是自由空间光通信领域的难题,它会导致光信息在散射条件下无法精确传输^[10,17]。针对此共性难题,波前调控同样也可以对光束在介质内的传播进行一定程度的有效调制,从而纠正光场的波前信息以抑制散射效应^[22-26]。

同时,在相关应用中,应当意识到所有的光散射作用都处于一个动态过程,如生物活体组织因本身呼吸、心跳和血液等生理运动,使得相干时间通常只有几个毫秒^[27],故需要波前调制操作能够在消相干效应发生之前快速完成。因此,搭建可灵活调制的超快波前调控系统对于光学相关应用至关重要,它为光学相干领域在急变散射介质中的深度应

用提供了可行的研究思路。值得注意的是,数字微镜器件(DMD)因具有可实时编码与高速响应等特点被广泛运用于快速波前调控的研究当中^[28-34];而基于 DMD 实现复杂光场调控的一个有效途径就是运用计算全息的方法,通过将计算的全息图加载于器件,再结合滤波系统,最终实现目标光场复振幅分布的重构;但若要对光场精度、时间与衍射效率等综合性能的稳定调控,需要开发符合 DMD 特性的二值全息图。近年来多种二值计算全息的提出及其性能优化引起学术界的深入研究^[35-41]。

本文围绕基于 DMD 的快速光场调控技术在生物光学和光通信等领域中应用的重要研究意义及其进展进行论述;根据国内外研究现状,重点论述 Lee 全息和超像素等多种新型二值全息法的原理和特点。这些用于 DMD 的二值全息法为快速光场调控技术在各种光学系统的有效应用提供了研究基础,从而为相干光学领域在急变散射介质中的深度应用提供了重要的研究价值。

2 基于 DMD 的快速光场调控技术

绝大多数激光器的输出模式是高斯光束,而随着应用的不断深入,基模高斯光束已很难满足需要。通过对初始光场振幅、相位和偏振态等空间分布进行调控,将传统的基模高斯光束调制为目标所需的结构光场,用以满足特定场景的应用需求,该技术被称为光场调控技术;而光场调制可通过传统的衍射光学元件和数字空间光调制器等实现。下面重点介绍具有高转换频率的 DMD 结构和工作原理、快速光场调控技术的应用意义,以及基于 DMD 实现快速光场调控的当前研究进展。

2.1 光场调控器件

空间结构光束的传统生成器件主要有螺旋相位板法^[42]、全息光栅法^[43]和柱透镜法^[44]等。其中,下面以传统衍射光学器件产生涡旋结构光束为例来说明。

图 1 列举了用于涡旋光束制备的几种传统衍射光学元件(DOE)。螺旋相位板是一个沿着中心方

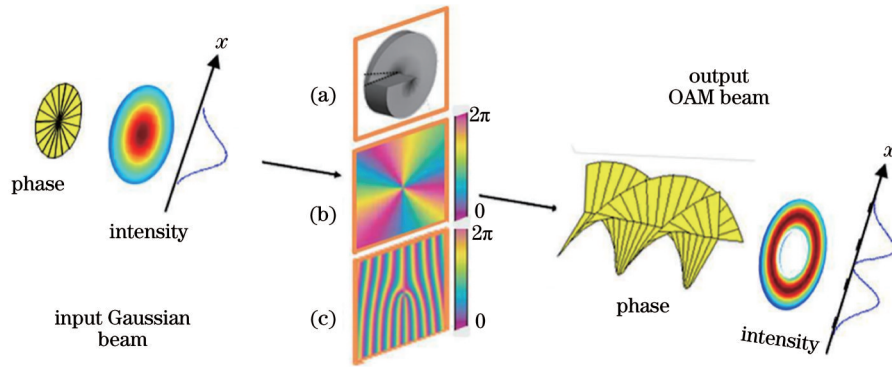


图 1 用于制备涡旋光的传统衍射光学元件。(a)螺旋相位板;(b)加载的相位图;(c)全息光栅

Fig. 1 Traditional diffractive optical elements used in the generation of vortex beam. (a) Spiraling phase plate; (b) simulated phase pattern; (c) holographic grating

位角逐渐变厚的透明板,它的厚度与方位角成正比,两端的表面结构分别为平面和螺旋曲面,螺旋曲面类似于一个旋转台阶,当高斯光束通过螺旋相位板时,由于螺旋形表面引起的厚度差异使透射相位板上的光束光程变化不同,进而导致相位改变量不同,故高斯光束被转换成具有螺旋相位波前的涡旋光束。在实验中,由这种方法生成的轨道角动量(OAM)光束携带的拓扑电荷数最高可以达到5050^[45]。全息光栅法是将参考光与目标光场干涉后的波前信息记录到感光材料中,再运用共轭参考光读取感光材料上的波前信息,然后通过衍射效应再现目标光场信息(包括振幅和相位),最后实现各种复杂光场的制备。

此外,随着科技的不断发展,空间光调制器因其动态灵活与可实时编码等特点被广泛应用于波前调控领域。通过加载计算得到的相位图或振幅型全息图,经过空间滤波系统后可实现对任意空间结构的目标光束的精确制备和灵活调制^[46-49]。相比需要精密复杂加工的衍射光学元件,可编程计算的空间光调制器因其具有可擦写能力,在动态光场调控中显得更加灵活方便,其损伤阈值高和响应速度快等特性在动态光信号处理系统中更是发挥着核心作用。图2所示的是常用的两种空间光调制器,即液晶空间光调制器(LC-SLM)和DMD,二者都是可编程的空间光调制器件。其中:LC-SLM对光束的调制是基于液晶分子对光束的相位延迟,具体来讲,它是通过扭曲向列液晶的双折射效应,使不同位置的光通过液晶层后,产生不同的光程差,从而实现相位的调制。此外,LC-SLM的衍射效率可以达到60%,但其刷新速率仅有100 Hz;由于液晶分子对光的相位延迟效果与波长有关,故使用前需要

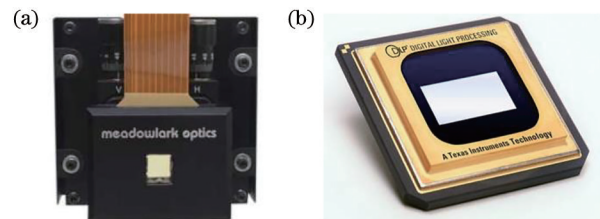


图 2 两种空间光调制器。(a)液晶空间光调制器;(b)数字微镜器件

Fig. 2 Real images for two spatial light modulators.

(a) Liquid-crystal spatial light modulator; (b) digital micromirror device

对其进行校准。DMD是一种振幅型调制器件,它由上百万个微镜阵列构成,每个微镜都有开、关和静态三种状态,经微机械系统控制可以进行独立的转动。DMD是一种能将电信号转换为光信号,实现光学信号处理功能的二进制光学器件。相较于LC-SLM,DMD缺点是衍射效率低,能量利用效率不高,约10%,其优点是波长响应范围大,激光耐受功率阈值(损伤阈值)高,它的最核心优势在于其响应速度较快,刷新频率可达32 kHz^[28]。其动态切换与可实时编码的特点为其在急变强散射介质中实现超快光场调控提供了技术基础,如:在光学操控与成像时,尤其在动态、复杂的动物呼吸和血液等系统中,通过运用DMD快速实现波前调控,可消除散射效应的影响;在云雾湍流等急变环境下实现高速光通信同样需要进行精确的调控。

图3反映的是DMD的工作原理、结构和功能示意图。DMD输入的是电子字符,输出的是光学信号,故DMD是一种光机械相结合的器件;DMD由百万个排列有序的微米量级的微镜片集成到内存芯片上形成,其中的每个微镜都是互相独立的,

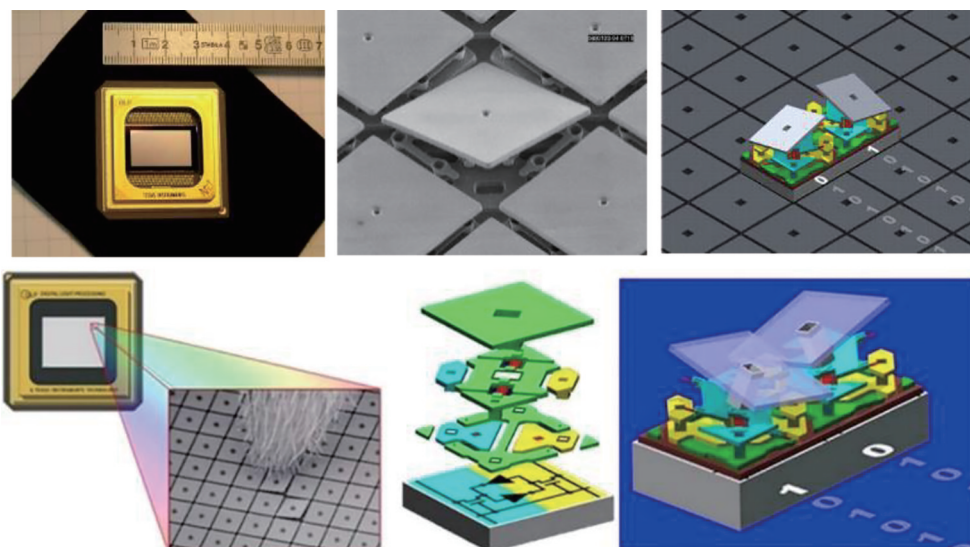


图 3 DMD 作为光开关的特性及其内部结构

Fig. 3 Trait of DMD as an optical switch and its inner structure

微镜机械部件的运动状态会随电信号驱动迅速改变,随之引起光信号的改变。具体来讲,微镜可以沿着自身对角线的两侧进行偏转,当DMD受到电信号的驱动时,微镜片则偏转 12° ,然后改变入射光的反射方向,使光线被反射到既定的方向;当受到无电信号的驱动时,微镜片则会偏转 -12° ,此时的微镜可理解为关状态;处于开状态下的微镜片将光线投射到目标光路上,而关状态下的微镜片反射光则被吸收器吸收,此时DMD可视作为一种二值化的光开关,二进制的光学信号“0”和“1”分别对应两个偏转方向的状态。此外,光场制备及波前调制则通过对DMD加载编码的全息图来实现,此时加载全息图的DMD

结构也可被认为一种反射型光栅元件^[28,33]。

2.2 快速光场调控技术

光场调控技术在生物操控、显微成像和空间光通信等领域有着广泛的应用。在相关应用中,当相干光束进入散射介质中传输时,散射效应使入射光波前信息受到随机扰动,而光场调控技术可在一定程度上实现扰动抑制。光场调控原理如图4所示,即未经调制的初始高斯光束在透过强散射介质后形成随机分布的散斑场,散斑场在介质内传播时经波前调控得到了有效调制,补偿了被散射介质扭曲的光场相位信息,最终透过散射介质后在目标区域形成有效的光学聚焦。

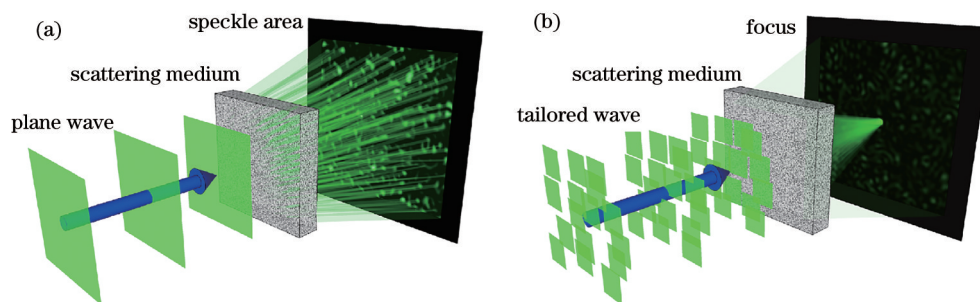


图 4 透过散射介质后的光学聚焦形成原理。(a)未调制光束透过散射介质后形成散斑;
(b)调制后光束透过散射介质后形成聚焦

Fig. 4 Principle of focusing light through scattering medium. (a) Random speckle formed by the unmodulated beam through scattering medium; (b) focusing light obtained by the modulated beam through scattering medium

有效聚焦是一切光学相干应用领域的前提,无法产生有效光学聚焦就无法进行深入应用。例如,在生物医学研究中,特别是在光学微操纵和显微成像方面,包括人体在内的动物活体组织,可看

作是一种复杂无序的强散射介质,传统光束无法在超过一定深度的活体内形成有效的光学聚焦,这极大地限制了光镊技术和各种成像技术在动物组织中的深度应用^[19]。此外,散射效应也是空间

光通信领域的共性难题,它会导致在急变的云雾湍流环境下无法精确传输光信息^[10,17]。在光通信应用中,当携带 OAM 的光束在空间中传输时,易受大气湍流、雾霾或空气中尘埃的影响,微粒的多重散射严重降低光束质量,导致接收端的光束成为随机散斑,这增加了通信的误码率。因此,在强散射条件下解决光信息的精确传输和恢复,对于光通信的研究和应用具有重要意义。所以,通过波前调制来精确调控光在散射介质中的传输是生物光学和光通信等领域深入应用的前提,成为了光学相干领域的研究热点。

同时,应注意在空间光通信和生物光学等应用中,所有的光散射作用基本都处于一个动态过程。

我们可通过自相关函数定义一个相干时间来量化这个动态散射过程。这个相干时间与散射介质的运动状态和散射次数是直接相关的,而散射过程在相干时间内可被认为是一个准静态过程。例如,光在动物组织等强散射介质中传播时,活体组织因本身呼吸、心跳和血液等生理运动,使得相干时间只有几个毫秒^[27],这就需要波前测量和调制操作在相干时间内快速完成。以透过急变介质实现聚焦的系统为例,系统若响应不够快,则会记录下模糊的全息图[图 5(a)],读取该全息图时,在目标位置将无法形成光学聚焦[图 5(c)];而超快光学系统可在相干时间内完成全息图的记录[图 5(b)],对其进行读取可形成有效聚焦[图 5(d)]。

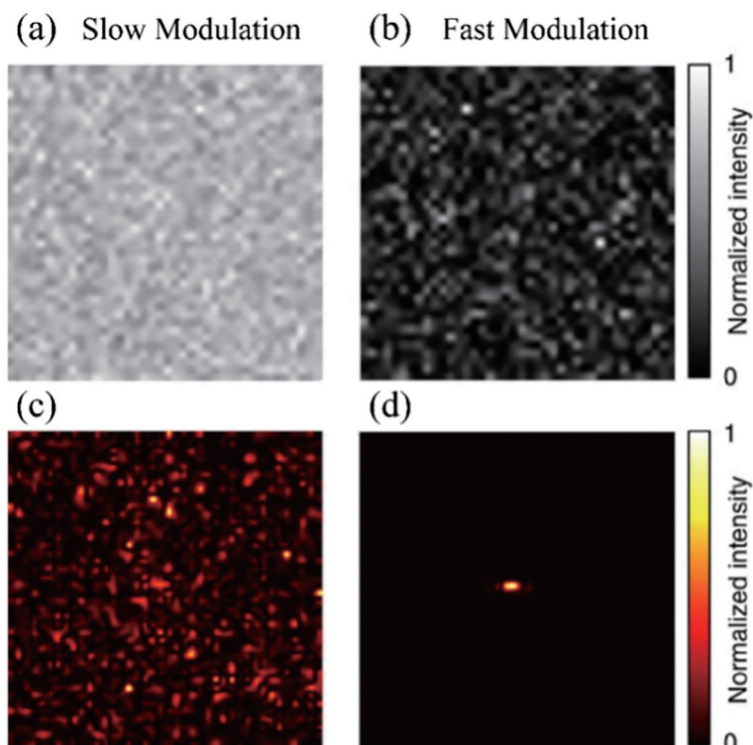


图 5 光透过急变介质时较慢和超快光学系统的聚焦效果对比^[27]。(a)(b)在较慢和超快光学系统下所记录的全息图;(c)(d)全息图读取后对应的光强分布

Fig. 5 Comparison of focusing effect between slow and high-speed wavefront modulation systems when light travels through a transient medium^[27]. (a) (b) Holograms recording in a low or high-speed wavefront modulation system; (c) (d) intensity profiles after optically reading the corresponding holograms

因此,上述应用不仅需要进行光场调控,更要实现灵活和快速的波前调控。同时搭建具有高速响应速度的快速波前调控系统至关重要,它是对光在急速变化的散射介质内传输进行实时和精确调控的前提。值得注意的是,DMD 因具有可实时编码与高速响应等特点,与计算全息法相结合被广泛用于波前调控的研究中。近年来,基于 DMD 的快

速光场调控系统在光声成像、高速光通信和散射介质聚焦等领域得到了广泛的应用^[50-59]。例如,2017 年 Yang 等^[31,34]将基于 DMD 的快速光场调控技术运用于光声成像领域,提升了活体动物组织成像的轴向分辨率;2019 年 Gong 等^[17]将该技术应用于 OAM 光通信,实现了在强散射环境下的高质量光通信。2017 年 Liu 等^[59]在散射介质聚焦研究中实

现了毫秒级别的波前调控系统,现阶段基于 DMD 的波前调制系统的最快响应速度可达到 5.3 ms(如

图 6 所示)^[32],这些研究为各种光学系统的有效与深入应用提供了重要的研究价值。

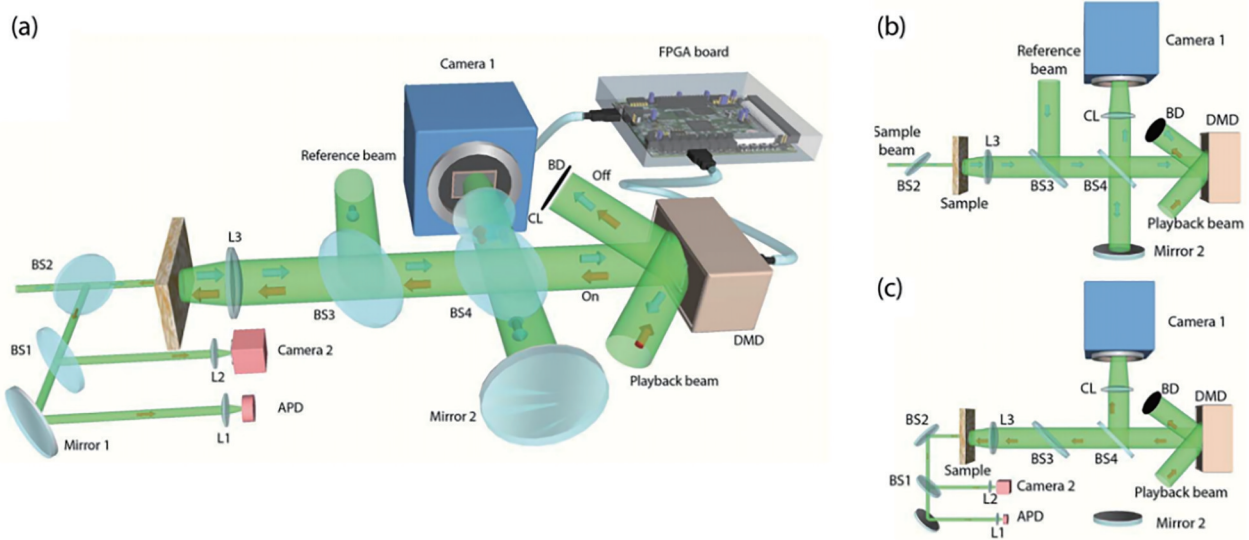


图 6 基于 DMD 的快速波前调控系统^[32]。(a)原理图;(b)记录操作的光路;(c)调控操作的光路示意图

Fig. 6 DMD-based high-speed wavefront modulation system^[32]. (a) Simplified schematic; (b) optical path schematic of the recording step; (c) optical path schematic of the playback step

然而,当前用于 DMD 的全息算法在波前调控中存在一些关键性技术问题,如:超像素法是将相邻多个像素构造成一个组合像素,以实现高质量的调控,但调控速度较慢且调制精度较低;干涉全息法则是通过计算目标场和平面波的干涉而生成灰度全息图,二值化 DMD 器件进行脉宽调制方式时,会呈现出光衍射效率不足等难题^[49]。这些问题一定程度上限制了快速光场调制系统在光学相干领域中的有效应用。下一章节将重点论述当前多种用于 DMD 实现快速光场调控的计算全息法,并对原理和特点进行系统性的介绍和论述。

3 用于 DMD 实现光场调控的多种二值化全息法

实现光场调控的一个有效途径就是运用全息法。传统全息术是指将信号光和参考光干涉时的强度信息记录在感光材料上,再通过另一束共轭参考光读出该材料上所记录的波前信息,最后重构出信号光波前信息这一过程。随着科技发展和高性能空间光调制器的广泛运用,数字全息术被提出并用于到光束的调控和制备当中;与传统全息法相比,数字全息具有动态灵活和可实时编程等特点。通过将计算的全息图加载于器件,再结合滤波器件,最终实现对目标光场分布的重构。具体而言,数字全息图通常由两种方法

编码生成:一种是通过迭代法求出计算全息图,并且目标图像是已知的,如相位恢复算法(Gerchberg-Saxton 算法)和直接二元搜索法等^[60-65];另一种通常是计算目标物光光场和参考光的干涉全息图。前者需要进行反复多次优化,尽管重建图像的质量相对较高,但全息图需相对更长的计算时间,很难满足动态急变的调控场景的需求。后者计算生成的全息图通常是灰度型分布的,二值化 DMD 也可通过脉宽调制的方式实现固定积分时间内的平均强度调制,但这种调制方法得到的光场不够精确与稳定^[41]。

因此,若想实现稳定和快速的光场调控,需开发非迭代且适合 DMD 特性的振幅型二值化全息图;而灰度全息图转化为二值全息图可通过直接阈值法实现。直接阈值化原理是通过某一个阈值直接对灰度全息图进行二值化处理,但这会带来很大的转化误差^[66],我们可通过误差扩散算法减小误差来提高图像重建的质量^[67]。除了这种二值化处理灰度图的方法外,近年来出现了一些能更精确地对目标光场进行波前调控的新型二值化全息编码方法^[67-75],这些新型全息法被广泛应用于生物医学成像、光学微操控与散射介质聚焦等领域中。结合本课题组近年来的研究成果,下面对当前几种新型的非迭代计算全息法,包括 Lee 全息^[70]、超像素算法^[71]以及其他全息法^[67,72]进行系统地介绍。

3.1 Lee 全息法

作为二值型空间光调制器, DMD 需加载符合其特性的二值化全息图才能实现对光场波前调制。若要调控的目标光场的复振幅分布为

$$E(x, y) = A(x, y) \exp[i\varphi(x, y)], \quad (1)$$

式中, $A(x, y) \in [0, 1]$ 是归一化的振幅分布, $\varphi(x, y) \in [-\pi, \pi]$ 表示光场相位分布, 则二值化全息图可被认为是一种二值化光栅结构。数学上, 这种光栅的透过率函数可通过傅里叶级数的展开形式表示, 即

$$T(x, y) = \sum_n \frac{\sin(\pi n w)}{\pi n} \times \exp\{in[2\pi(u_0 x + v_0 y) + 2\pi p]\}, \quad (2)$$

其中 (u_0, v_0) 为光栅的空间频率。光栅包含的矩形脉冲宽度为 $w (w \in [0, 1])$, 周期为 $T (u_0^2 + v_0^2 = 1/T^2)$, $p \in [-1/2, 1/2]$ 是光栅中每个结构单元的相对位置。考虑一束单位振幅的单色平行光照射在二值化光栅上, 光栅的一级衍射光场的复振幅分布为

$$U_1(x, y) = \frac{\sin(\pi w)}{\pi} \exp(i2\pi p). \quad (3)$$

需注意的是, 当 DMD 后的所有光学器件与第一衍射级次的光轴共轴时, 可忽略入射平面波和光栅倾斜所导致的常数相位, 使用该方法可准确编码光场的相位信息。

若 w 和 p 被设为与位置相关的函数, 当 $w(x, y)$ 和 $p(x, y)$ 相对于光栅周期变化很缓慢时, 结果也仍是准确的。通过设置两个函数, 即

$$w(x, y) = \frac{1}{\pi} \arcsin[A(x, y)], \quad p(x, y) = \frac{\varphi(x, y)}{2\pi}, \quad (4)$$

可以得到目标光场 $E(x, y)$ 。(4) 式中的两函数分别对应目标光场的振幅和相位的分布, 此时, 二值化振幅光栅的一级衍射场便是目标光场的分布。在 Lee 全息法中, 二值化光栅的透过率函数为

$$h(x, y) = H\left\{\cos\left[2\pi(u_0 x + v_0 y) - 2\pi p(x, y)\right] - \cos\left[\pi w(x, y)\right]\right\}, \quad (5)$$

其中, $H(x)$ 是 Heaviside 阶梯函数, 其定义为

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

通过(4)~(6)式, 可以通过编码目标光场的振幅和相位信息来生成二值化的振幅型光栅, 最终实现任意波前结构光场的制备。这种全息方法是由 Wai-Hon Lee 提出的, 因此又被称作 Lee 全息法, 计算产生的全息图被称为 Lee 全息图^[70]。

图 7 为用于制备结构光束的 4f 滤波系统图。当将对应的计算全息图加载至 DMD 上时, 经过透镜傅里叶变换作用之后的频谱面共有三项, 分别是 0, ± 1 三个衍射级次, 其中, $+1$ 级就是我们所要生成目标光场的衍射级次。通过小孔筛选出目标级次, 再通过透镜的傅里叶逆变换得到目标光场。

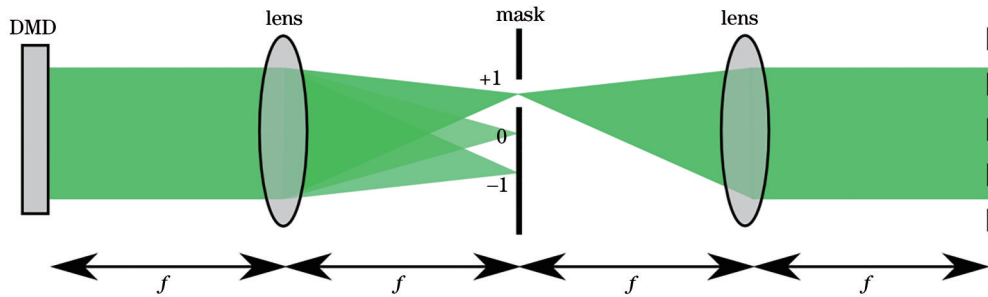


图 7 用于制备结构光束的 4f 滤波系统图

Fig. 7 4f optical system used for preparing the structured beams combined with a filter

3.2 优化 Lee 算法

在上述 Lee 算法中, 通过一个固定的阈值对连续分布的全息图进行二值化的强行截断, 这种处理方法在二值化过程中引入了较大的误差。为实现更精确的光场调制, 引入误差扩散算法来优化 Lee 全息的编码过程, 从而提高全息算法的精度。具体

用误差扩散算法取代 Lee 全息法中固定阈值二值化处理方式, 该算法源于“最小化平均误差”方法, 将像素变化的误差扩散开, 以减少此过程中二值化处理过程中的总误差^[69]。

如图 8(a) 所示, 先将要处理的灰度全息图的灰度值归一化, 灰色表示当前正在处理的像素, 相邻

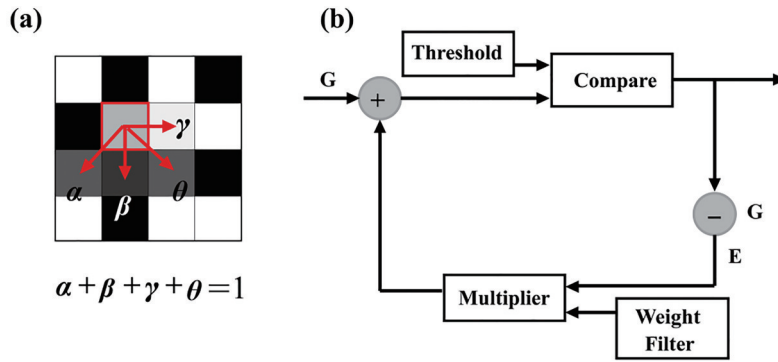


图 8 误差扩散法的原理^[69]。(a)灰度全息图灰度值归一化；(b)具体的算法执行过程

Fig. 8 Schematic diagram of error diffusion method^[69]. (a) Gray value normalization of grayscale hologram; (b) specific algorithm execution process

像素表示待处理的像素,量化误差被扩散到 4 个相邻像素。从灰色到待处理像素的扩散误差由给定的权重决定,所有权重之和为 1。图 8(b)给出了具体的算法执行过程,首先比较该像素值和阈值大小,若阈值取 0.5,如果像素值大于阈值,则设为 1,否则为 0;然后,将原始值与二值化后的值之差乘以给定的误差权重滤波函数,计算邻域的扩散误差;通常将权重系数设置为 4 个常数值:7/16、3/16、5/16 和 1/16 (Floyd-Steinberg 系数),最后将相邻像素的原始值和扩散误差相加,得到更新后的值。这样处

理之后,总体误差接近于零;相关参数可根据后续的仿真和实验结果进行反复优化,以达到最优效果。

运用误差扩散法代替固定阈值的二值化处理,可抑制原 Lee 全息图的多余衍射级次并引起的噪声,这为空间光场生成提供了一种更为准确的方法。图 9 给出采用不同全息法计算得到的高阶 Bessel 光束(拓扑荷为 1)的模拟结果,包括 Bessel 光束的二值化振幅图以及 Lee 方法和优化的 Lee 方法的编码效果。图 9(a)为编码 Bessel 光束的理论灰度全息图,图 9(b)和图 9(c)为理论上 Bessel 光束的

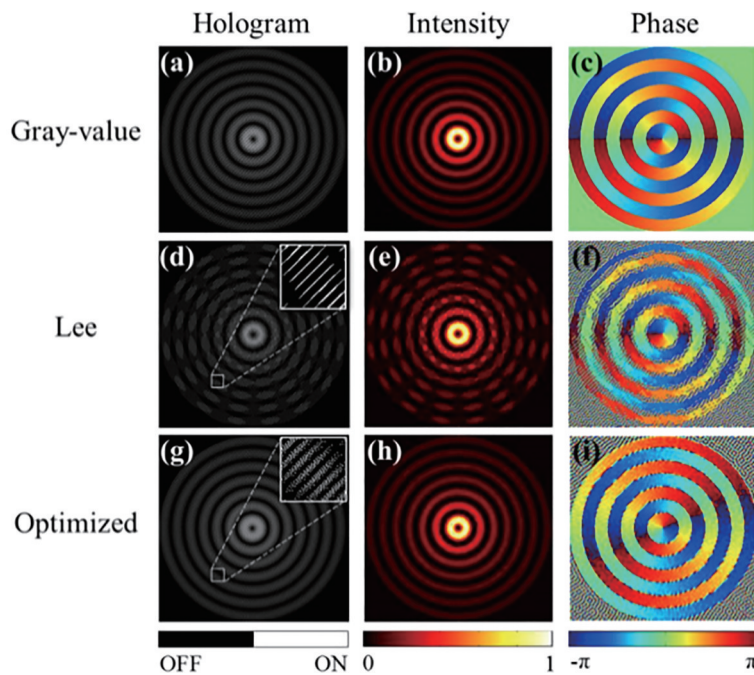


图 9 运用 Lee 及优化 Lee 算法对生成高阶 Bessel 光束(拓扑荷为 1)的模拟结果^[69]。(a)(b)(c)理论上的高阶 Bessel 光束;

(d)(e)(f) Lee 算法的编码结果;(g)(h)(i)优化 Lee 算法的编码结果

Fig. 9 Simulation of using Lee and optimized Lee method to generate high-order Bessel beam ($l=1$), respectively^[69].

(a) (b) (c) Theoretical high-order Bessel beams; (d) (e) (f) coding results of Lee algorithm; (g) (h) (i) coding results of optimized Lee algorithm

强度和相位分布;图 9(d)~(f)为 Lee 编码生成的二值化全息图,运用 Lee 全息法模拟计算的光束的强度和相位分布;图 9(g)~(i)为通过优化 Lee 全息编码的二值化全息图,运用优化的 Lee 全息法模拟光束的光强和相位分布。由图可知,优化后的 Lee 方法编码的图案更加精细,相应的编码振幅和相位也更接近理论分布,尤其是减小了光束在边界分布上的跃变^[69]。

此外,在以往的研究工作中,误差扩散法中的 4 个加权系数一般设置为 Floyd-Steinberg 系数,加权系数是根据经验确定的,为固定不变的常数。实际上,在运用误差扩散法处理后生成二值化全息图时,默认的 Floyd-Steinberg 系数一般是次优的。最近, Yang 等^[67]通过引入遗传算法在双向误差扩散方案中寻找最优的加权系数来生成二进制全息图,从而对不同全息图的参数实现了更精准的靶向优化,采用优化加权系数重建的二值全息图的图像质量优于运用传统系数重建的全息图。

3.3 超像素算法

超像素(Super-pixel)算法是另外一种能实现目标光场振幅和相位同时调制的新型编码方法。

2014 年, Goorden 等^[71]将计算机领域中的超像素概念引入到光学领域,并结合 DMD 的二进制振幅调制特点,提出了对目标光场波前信息进行精确编码的全息算法。其原理是把 DMD 上邻近的微镜组合成一个超像素,通过调控超像素中的任意像素调整组合,最终通过相干叠加成像面上的响应来获得更加准确的场编码,并且通过傅里叶平面的低通滤波,最后在成像面上调控目标光场。每个超像素都可独立调制光束的振幅和相位。和 Lee 全息法相比,超像素算法编码产生的光场具有更高的效率^[76],但其是以牺牲空间分辨率为代价的,不过 DMD 的百万级别像素的结构特点弱化了这一劣势。

DMD 对于光场复振幅的调制是基于 $4f$ 系统和傅里叶平面的低通滤波来实现的,和 Lee 方法类似。如图 10(a)所示, DMD 被均分成了多个超像素,每个超像素都是由 $n \times n$ 个微镜所组成的;前面透镜的后焦面为傅里叶平面,此平面的小孔被用于空间滤波,即选择目标光场所在的级次并滤除高阶衍射级次;第二个透镜的后焦面为成像面;令相位变化均分在 $[0, 2\pi]$ 之间,一个超像素在成像平面上的响应则是各个单独像素的响应的矢量叠加。

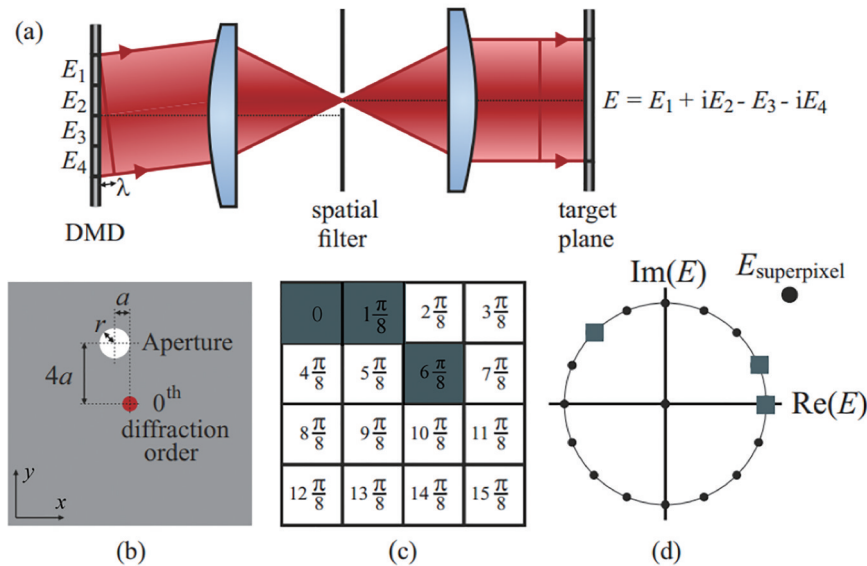


图 10 超像素方法的原理图^[71]。(a)在 DMD 平面内,光场 $E(x)$ 对应微镜的开关状态;(b)孔径在傅里叶平面上的位置;(c)三个示例像素分别对应的相位分布;(d)超像素在成像平面上的响应,其中 $E_{\text{superpixel}}$ 是三个示例像素之和

Fig. 10 Schematic diagrams of the super-pixel method^[71]. (a) In the DMD plane, the light field $E(x)$ corresponds to the off and on states of the micromirrors; (b) schmetic of aperture positioned on the Fourier plane; (c) phase responses of the three pixels indicated by grey squares; (d) response of superpixel in the target plane, in which $E_{\text{superpixel}}$ is the sum of the three pixels' responses

如图 10(b)所示,对于 $n \times n$ 个微镜组成的超像素,小孔滤波器和 0 级衍射光的相对位置为

$(x, y) = (-a, na)$, 其中 $a = -\lambda f / (n^2 d)$, λ 为激光波长, f 为第一个透镜的焦距, d 为微镜间距, n^2 个微

像素组成的超像素在目标平面上的响应均匀分布在复平面的圆上。图 10(c)~(d)表示当 $n=4$ 时目标平面的相位响应分布。一个超像素中所有像素单元在目标平面上的相位响应如图 10(c)所示,这 16 个像素在目标平面的相位响应如图 10(d)所示。根据上述原理,超像素方法可控制输出光场的复振幅分布。例如,图 10(c)中 3 个灰色像素(相位响应分别为 0 、 $\pi/8$ 和 $6\pi/8$)打开,而其他像素则保持关闭;该超像素在目标平面产生的光场 $E_{\text{superpixel}}$ (黑色点)等于图 10(d)中三个方框对应的矢量和。

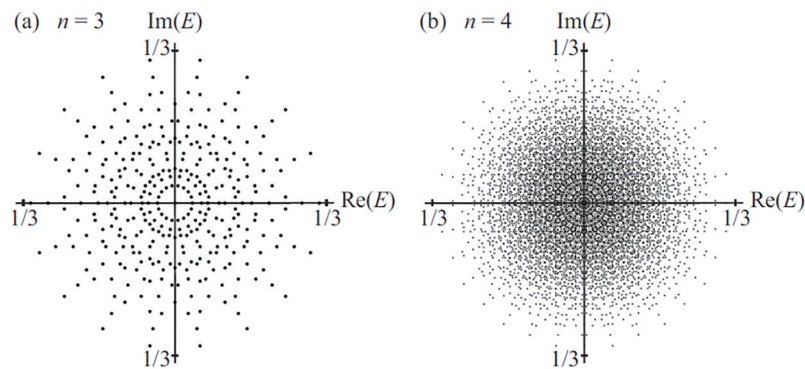


图 11 单个超像素在目标平面上的复振幅分布^[71]。(a) $n=3$; (b) $n=4$

Fig. 11 Electric field distribution of a single super-pixel in the target plane^[71]. (a) $n=3$; (b) $n=4$

3.4 基于深度学习的二进制全息法

深度学习(Deep Learning)近期被用于光学领域以实现二进制全息图的制备,利用输出模式和有监督的二进制模式之间的逆向传播关系,对神经网络进行优化,直接输出二进制模式;该技术基于深度卷积神经网络生成灰度全息图。该方法用神经网络代替传播计算,神经网络搭建完成后,将目标输入神经网络后即可生成其二进制全息图。

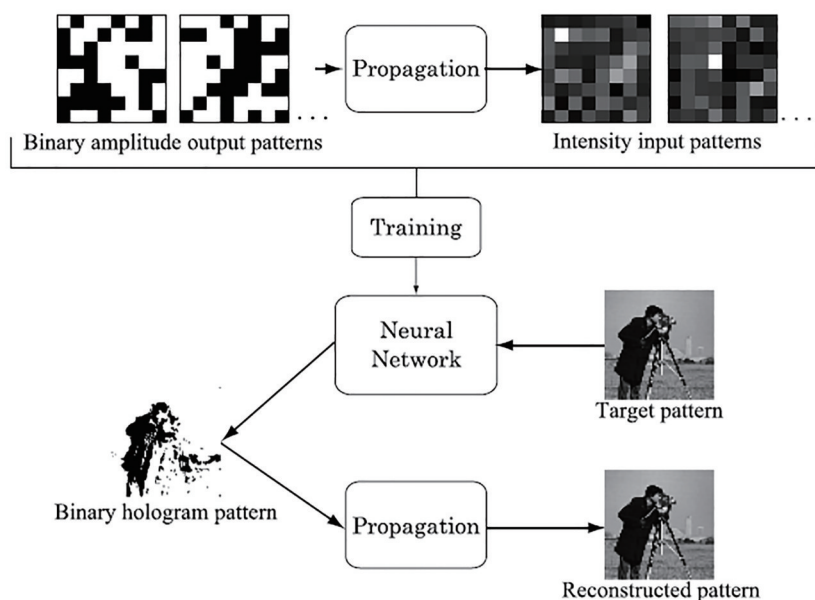
具体来讲,如图 12 所示,大量、随机的二进制全息图在计算机上生成,并计算其在菲涅耳衍射传播下的光强分布图;这些二进制全息图(输出模式)和空间传输的散斑光强图(输入模式)被用作该方法的训练集;同时,该方法将二值化这一导致重构图像质量下降的主要因素纳入到神经网络的训练过程中,从而使重建图像的质量退化减弱。此外,训练神经网络虽需要大量的时间,但当神经网络搭建完成之后,生成的二值全息图质量较高且响应速度达到毫秒量级^[73]。

4 结 论

快速光场调控技术在生物医学和光通信等领

域具有重要的应用价值,尤其为相干光在急变散射介质中的有效应用提供了重要的研究基础,而 DMD 与计算全息法则为这一技术的实现提供了切实可行的研究思路。本文介绍了快速光场调控的研究意义及其应用进展,综述了近年来用于 DMD 实现波前调控的多种非迭代二值全息算法。

综上所述,超像素算法在效率和保真率等性能上优于 Lee 全息法,而 Lee 全息法在空间分辨率和编码速度上更具优势;Lee 全息法运用误差扩散法优化后,其保真率等性能得到提升;经过神经网络训练后的二值全息图生成速度较快且质量较高,具有广泛的实际应用。这些用于 DMD 的新型二值化全息法各具特点,可根据实际的波前调控需求和具体的应用场景进行灵活运用,从而丰富波前调控的技术手段和应用范围。此外,随着快速光场调控技术的深入应用,具有高计算速度和高精度的全息算法将可大幅提升快速光场调控技术的综合性能,从而在光学相干领域的研究中发挥重要作用。

图 12 基于深度学习的二进制全息法的原理图^[73]Fig. 12 Schematic diagram of binary amplitude holography based on the deep learning^[73]

参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185.
- [2] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [3] Gomes R M, Salles A, Toscano F, et al. Observation of a nonlocal optical vortex[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(3): 033602.
- [4] Fang Z X, Chen Y, Ren Y X, et al. Interplay between topological phase and self-acceleration in a vortex symmetric Airy beam[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7324-7335.
- [5] Curtis J E, Grier D G. Structure of optical vortices [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(13): 133901.
- [6] Garcés-Chávez V, McGloin D, Melville H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 145-147.
- [7] McGloin D, Dholakia K. Bessel beams: diffraction in a new light[J]. *Contemporary Physics*, 2005, 46(1): 15-28.
- [8] Durmin J, Miceli J, Jr, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [9] Fahrbach F O, Simon P, Rohrbach A. Microscopy with self-reconstructing beams[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(11): 780-785.
- [10] Yuan Y, Lei T, Li Z, et al. Beam wander relieved orbital angular momentum communication in turbulent atmosphere using Bessel beams[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42276.
- [11] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating Airy beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- [12] Jia S, Vaughan J C, Zhuang X W. Isotropic three-dimensional super-resolution imaging with a self-bending point spread function[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 302-306.
- [13] Vettenburg T, Dalgarno H I C, Nylk J, et al. Light-sheet microscopy using an Airy beam[J]. *Nature Methods*, 2014, 11(5): 541-544.
- [14] Fang Z X, Lu R D. Vortex symmetric Airy beam[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10932: 109320C.
- [15] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [16] Ji N, Milkie D E, Betzig E. Adaptive optics via pupil segmentation for high-resolution imaging in biological tissues[J]. *Nature Methods*, 2010, 7(2): 141-147.
- [17] Gong L, Zhao Q, Zhang H, et al. Optical orbital-angular-momentum-multiplexed data transmission under high scattering[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-11.
- [18] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, et al. Twisted photon entanglement through turbulent air across

- Vienna[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(46): 14197-14201.
- [19] Zhong M C, Wei X B, Zhou J H, et al. Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers[J]. Nature Communications, 2013, 4: 1768.
- [20] Ntziachristos V. Going deeper than microscopy: the optical imaging frontier in biology[J]. Nature Methods, 2010, 7(8): 603-614.
- [21] Wang L V, Wu H I. Biomedical optics: principles and imaging[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [22] Xu X, Liu H L, Wang L H. Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media[J]. Nature photonics, 2011, 5(3): 154-157.
- [23] 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.
- [24] Yang J M, Li L, Shemetov A A, et al. Focusing light inside live tissue using reversibly switchable bacterial phytochrome as a genetically encoded photochromic guide star[J]. Science Advances, 2019, 5(12): eaay1211.
- [25] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [26] Rotter S, Gigan S. Light fields in complex media: Mesoscopic scattering meets wave control[J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89: 015005.
- [27] Liu Y, Lai P, 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.
- [28] Ren Y X, Lu R D, Gong L. Tailoring light with a digital micromirror device[J]. Annalen der Physik, 2015, 527(7/8): 447-470.
- [29] Fang Z X, Zhao H Z, Chen Y, et al. Accelerating polygon beam with peculiar features[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 8593.
- [30] Liang J, Kohn R N, Jr, Becker M F, et al. High-precision laser beam shaping using a binary-amplitude spatial light modulator[J]. Applied Optics, 2010, 49(8): 1323-1330.
- [31] Yang J, Gong L, Xu X, et al. Motionless volumetric photoacoustic microscopy with spatially invariant resolution[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 780.
- [32] Wang D, Zhou E H, Brake J, et al. Focusing through dynamic tissue with millisecond digital optical phase conjugation[J]. Optica, 2015, 2(8): 728-735.
- [33] Ding X Y, Ren Y X, Gong L, et al. Microscopic lithography with pixelate diffraction of a digital micromirror device for micro-lens fabrication[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5307-5311.
- [34] Yang J M, Gong L, Shen Y C, et al. Synthetic Bessel light needle for extended depth-of-field microscopy[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(18): 181104.
- [35] Cheremkhin P A, Kurbatova E A. Binarization of digital holograms by thresholding and error diffusion techniques[C]//Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019, May 19-23, Bordeaux, France. Washington, D.C.: OSA, 2019: Th3A.22.
- [36] Eschbach R. Comparison of error diffusion methods for computer-generated holograms[J]. Applied Optics, 1991, 30(26): 3702-3710.
- [37] Lee W H. III computer-generated holograms: techniques and applications[M]//Wolf E. Progress in optics. Amsterdam: Elsevier, 1978: 119-232.
- [38] Jiao S M, Zhang D F, Zhang C L, et al. Complex-amplitude holographic projection with a digital micromirror device (DMD) and error diffusion algorithm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(5): 1-8.
- [39] Fang Z X, Ren Y X, Gong L, et al. Shaping symmetric Airy beam through binary amplitude modulation for ultralong needle focus[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(20): 203102.
- [40] Min K, Park J H. Quality enhancement of binary-encoded amplitude holograms by using error diffusion [J]. Optics Express, 2020, 28(25): 38140-38154.
- [41] Gong L, Ren Y X, Xue G S, et al. Generation of nondiffracting Bessel beam using digital micromirror device[J]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4566-4575.
- [42] Sueda K, Miyaji G, Miyanaga N, et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3548-3553.
- [43] Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. Nature, 2001, 412(6844): 313-316.
- [44] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. Optics Communications, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [45] Shen Y, Campbell G T, Hage B, et al. Generation and interferometric analysis of high charge optical

- vortices[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(4): 044005.
- [46] Berkhout G C G, Lavery M P J, Courtial J, et al. Efficient sorting of orbital angular momentum states of light[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(15): 153601.
- [47] Fang Z X, Zhao J, Xiao Z Z, et al. Accelerating beam with multiple types of main lobes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11698: 116980M.
- [48] Lerner V, Shwa D, Drori Y, et al. Shaping Laguerre-Gaussian laser modes with binary gratings using a digital micromirror device[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4826-4828.
- [49] Fang Z X. Wavefront shaping technique and its study in focusing through scattering medium[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
方兆翔. 光场波前调控及其在散射介质中聚焦特性的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [50] Chen Y, Wang T C, Ren Y X, et al. Generalized perfect optical vortices along arbitrary trajectories[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(21): 214001.
- [51] Zhao T, Ourselin S, Vercauteren T, et al. High-speed photoacoustic-guided wavefront shaping for focusing light in scattering media[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1165-1168.
- [52] Liu Y F, Yu P P, Li Y M, et al. Exploiting light field imaging through scattering media for optical encryption[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(11): 2968-2975.
- [53] Zhao Q, Wang Z Q, Yu P P, et al. Vector focusing through highly scattering media via binary amplitude modulation[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(6): 062002.
- [54] 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.
- [55] Zhao Q, Wang Z Q, Hu X Y, et al. 3D focusing through highly scattering media using PSF modulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(19): 191104.
- [56] Hemphill A S, Shen Y, Liu Y, et al. High-speed single-shot optical focusing through dynamic scattering media with full-phase wavefront shaping[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(22): 221109.
- [57] Si K, Tang L M, Du J C, et al. Light focusing through scattering medium based on binary transmission matrix[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207038.
斯科, 汤黎明, 杜吉超, 等. 基于二值化传输矩阵透过散射介质的光聚焦[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207038.
- [58] Li Q Y, Zha X, Chen Z Y, et al. Focusing of laser through strong scattering media with different thicknesses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111016.
李琼瑶, 扎西巴毛, 陈子阳, 等. 激光通过不同厚度的强散射介质的聚焦[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111016.
- [59] Liu Y, Ma C, Shen Y, et al. Focusing light inside dynamic scattering media with millisecond digital optical phase conjugation[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 280-288.
- [60] Whyte G, Courtial J. Experimental demonstration of holographic three-dimensional light shaping using a Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *New Journal of Physics*, 2005, 7: 117.
- [61] Dresel T, Beyerlein M, Schwider J. Design of computer-generated beam-shaping holograms by iterative finite-element mesh adaption[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(35): 6865-6874.
- [62] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y, et al. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 209-218.
- [63] Seldowitz M A, Allebach J P, Sweeney D W. Synthesis of digital holograms by direct binary search[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(14): 2788-2798.
- [64] Kang J H, Leportier T, Kim M, et al. Non-iterative direct binary search algorithm for fast generation of binary holograms[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 122: 312-318.
- [65] Wyrowski F. Iterative quantization of digital amplitude holograms[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(18): 3864-3870.
- [66] Zhang E Y, Noehte S, Dietrich C H, et al. Gradual and random binarization of gray-scale holograms[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(26): 5987-5995.
- [67] Yang G, Jiao S M, Liu J P, et al. Error diffusion method with optimized weighting coefficients for binary hologram generation[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5547-5555.
- [68] Eickhoff K, Köhnke D, Feld L, et al. Tailored holograms for superimposed vortex states[J]. *New Journal of Physics*, 2020, 22(12): 123015.
- [69] Hu X, Zhao Q, Yu P, et al. Dynamic shaping of orbital-angular-momentum beams for information encoding[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1796-1808.

- [70] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza O S, Chen C, et al. Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30196-30203.
- [71] Goorden S A, Bertolotti J, Mosk A P. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17999-18009.
- [72] Horisaki R, Takagi R, Tanida J. Deep-learning-generated holography[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3859-3863.
- [73] Goi H, Komuro K, Nomura T. Deep-learning-based binary hologram[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(23): 7103-7108.
- [74] Xie X W, Hu J, Shen Y B. Phase imaging based on random coding modulation of digital micro-mirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2311001. 谢熙伟, 胡静, 沈亦兵. 基于数字微镜器件随机编码调制的相位成像[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2311001.
- [75] Chen D H, Gu S Y, Chen S C. Study of optical modulation based on binary masks with finite pixels [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106604.
- [76] Chen Y, Fang Z X, Ren Y X, et al. Generation and characterization of a perfect vortex beam with a large topological charge through a digital micromirror device[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8030-8035.