



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Subwavelength Optics—Article

面向高分辨率非视距成像的矢量数智光学

郭迎辉^{a,b,c,d,#}, 雷云松^{a,b,c,d,#}, 蒲明博^{a,b,c,d,*}, 张飞^{a,b,c,d}, 张其^{a,b,c}, 李晓银^{a,b,c}, 张润哲^{a,b,c,d}, 赵郅斌^{a,b,c,d}, 周芮^e,
范玉龙^{a,b}, 罗先刚^{a,b,d,*}

^a National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

^b State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

^c Research Center on Vector Optical Fields, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

^d College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

^e Tianfu Xinglong Lake Laboratory, Chengdu 610299, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 April 2024

Revised 15 November 2024

Accepted 17 November 2024

Available online 28 November 2024

关键词

非视距成像
矢量数智光学
空间光调制器
数字光学
波前整形
超表面

摘要

视线外目标成像在机器人视觉、遥感、自动驾驶等诸多领域具有重要应用。非视距(NLOS)场景的图像重建是一个复杂的逆问题,它不仅需要成像设备具备超快的时间分辨能力,还需要大量计算,进而从多散射光中提取信息。因此,回波信号的强度及其分布往往会严重劣化,导致成像分辨率和对比度受限。本文提出矢量数智光学概念,用于高分辨率NLOS成像,以消除墙体散射影响,将光重新聚焦到隐藏目标上,从而增强回波信号。本方法通过反馈算法智能优化激光光斑的偏振态和波前,使光穿过随机散射墙后形成接近理想的聚焦模式。在墙体的光学记忆效应范围内,通过对目标表面的聚焦光斑进行光栅扫描,可获得接近衍射极限的NLOS图像,且信噪比得到增强。实验结果表明,在0.35 m距离处,成像分辨率达到0.40 mm,接近系统的衍射极限。此外,本方法在多种复杂NLOS场景中均可行。本研究有望为主动成像、通信和激光无线能量传输开辟新途径。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

随着探测技术的快速发展和计算能力的显著提升,智能算法和数字光学元件[如数字微镜器件(DMD)、空间光调制器(SLM)、超表面]在计算成像中的应用日益广泛[1–3]。这些数字光学领域的重要进展涉及二进制微纳结构、局部光场调控能力以及与互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容的制造工艺[4–5],正将工程光学推向新的发展阶段,即工程光学2.0[6]。在这些进展中,非视距(NLOS)成像

是一个迅速兴起的研究热点[7–10],它通过中继墙将目标图像信息间接传输给观察者。目前,NLOS成像技术主要分为两类:第一类依靠光子的飞行时间(TOF)重建目标图像[11–14];第二类采用波前整形技术校正中间表面散射引起的畸变[15–16],将光聚焦到目标上,增强回波信号的信噪比(SNR),从而实现高效成像。对于基于光子TOF的NLOS成像技术,要达到毫米级分辨率,探测器的时间分辨率需达到皮秒级,这对脉冲激光器和探测器提出了极高的技术要求[17]。相比之下,基于波前整形的NLOS成像对实验

* Corresponding authors.

E-mail addresses: pmb@ioe.ac.cn (M. Pu), lxg@ioe.ac.cn (X. Luo).

These authors contributed equally to this work.

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2025, 45(2): 70–78

引用本文: Yinghui Guo, Yunsong Lei, Mingbo Pu, Fei Zhang, Qi Zhang, Xiaoyin Li, Runzhe Zhang, Zhibin Zhao, Rui Zhou, Yulong Fan, Xiangang Luo. Vectorial Digitelligent Optics for High-Resolution Non-Line-of-Sight Imaging. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.013>

装置的要求较低，它可通过智能算法优化波前整形，实现衍射极限的聚焦光斑，进而进行扫描成像。系统分辨率由聚焦光斑的大小决定，成像对比度则取决于回波信号的SNR。

在实际NLOS成像应用中，回波信号经目标和中继表面多次反射后，其偏振态会自然紊乱。因此，多次反射最终会导致激光散斑和SNR降低，这对衍射极限成像和三维（3D）成像极为不利[18]。尽管在重聚焦技术方面已取得显著成就，但传统波前整形技术仅能优化相位调制，忽略了偏振的影响[19]，因此无法确保实现最优调制，尤其是在NLOS成像中的倾斜照明场景下。

近年来，矢量光场（VOF）整形技术通过预补偿相位畸变和优化入射偏振，在散射介质成像、通信、精密测量、激光制造等领域取得了重大进展[20–28]。VOF整形与超表面的结合在非线性光学领域发挥着重要作用。超表面是一种能够复杂调控入射光波的纳米结构，因其卓越的光与物质相互作用调控能力而显得尤为重要[29–30]。超表面在几何形状和材料组成方面的设计灵活性，使其能够有效调制非线性信号的相位和偏振。这种能力展现了超表面在张量相位控制[31]、红外上转换成像[32]等多个领域的巨大潜力。VOF整形与数智超表面的结合在矢量光场整形和计算成像方面显示出显著潜力，为矢量数智光学（VDO）的发展奠定了坚实基础[33–38]。然而，设计一个既能灵活高效地生成VOF，又能成功与NLOS成像系统集成的系统仍是一项重大挑战，需要进一步的研究和技术突破。

本文提出用于高分辨率NLOS成像的VDO概念。如图1所示，该系统能以数字方式精确灵活地控制光束的偏振态、相位和振幅。VDO中可实现的丰富VOF [展示于高阶庞加莱球（HOPS）中]是HOPS赤道处的局域线性偏振。

借助由带引导星智能反馈生成的可重构偏振和波前，该系统即使在弱光、湍流畸变、偏振敏感屏幕等恶劣条件下，也能实现衍射极限的空间分辨率和高SNR。该方法不仅为克服NLOS成像困难提供了新策略，还显著拓宽了VOF整形技术在光学成像和探测中的应用前景，推动了VDO的发展。

2. 方法

VDO赋能的NLOS成像系统示意图如图1所示。我们的目标是利用数字光学元件投射经过设计的矢量波前，以抵消中继墙引起的空间变化偏振和相移。该系统采用数字光学元件（如有源超表面或SLM）结合深度学习算法进行全局搜索，通过控制入射光的波前和偏振状态来调整HOPS赤道平面上的偏振状态。因此，我们的系统具备两个扫描自由度：光束的入射角 θ_1 和偏振角 θ_2 。这一过程可通过菲涅尔方程解释，假设入射光的入射角为 θ_1 、偏振角为 θ_2 ，可以用以下公式表示：

$$I_R = I_s R_{s\theta_1} + I_p R_{p\theta_1} = I \sin \theta_2 R_{s\theta_1} + I \cos \theta_2 R_{p\theta_1} \quad (1)$$

式中， I_R 表示反射光强度，可分解为S偏振光和P偏振光，对应强度分别为 I_s 和 I_p ； I 表示入射光强度； R_s 和 R_p 分别表示S偏振波和P偏振波的反射系数。对于给定的被测目标，入射角 θ_1 是固定的。因此，特定的偏振角 θ_2 可使反射光强度达到最大。因此，通过智能反馈控制偏振角 θ_2 ，能显著增强回波信号强度，提高整体SNR。

在相干偏振光束合成方法中，利用两个正交偏振态生成VOF [39–45]。通过对两束正交偏振态的光[如左旋圆偏振光（LCP）和右旋圆偏振光（RCP）]施加独立控制的相位，可产生VOF光束。生成的VOF的数学表达式如下：

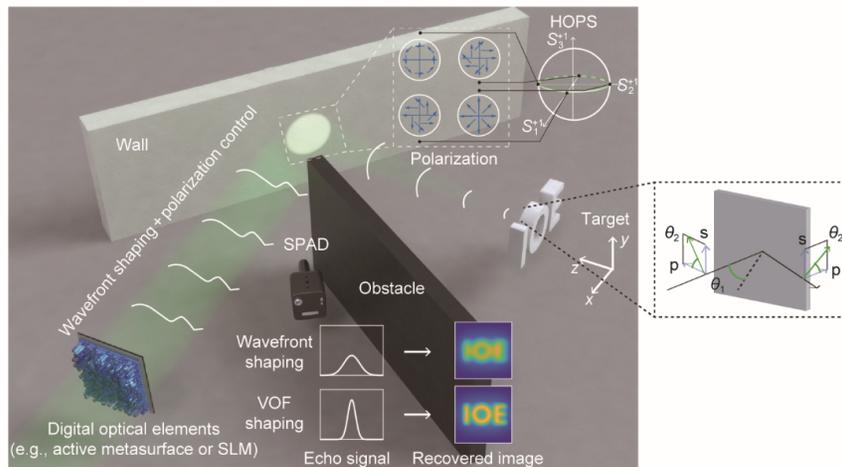


图1. VDO赋能的NLOS成像系统示意图。我们提出的VDO赋能的NLOS系统通过同时调制光波前和偏振状态，改进了传统方法。这种双调制技术显著提高了SNR，并增强了图像重建质量，特别适用于多目标、随机湍流相位板以及偏振敏感场景的复杂情况。HOPS：高阶庞加莱球；SPAD：单光子雪崩二极管； θ_1 ：光束入射角； θ_2 ：偏振角；s：S偏振；p：P偏振；S：庞加莱球中的偏振状态；x、y、z：笛卡尔坐标系。

$$E_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} e^{i\phi_L(x,y)} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} e^{i\phi_R(x,y)} = \frac{2}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi_L(x,y) - \phi_R(x,y)}{2} \\ \sin \frac{\phi_L(x,y) - \phi_R(x,y)}{2} \end{bmatrix} e^{i \frac{\phi_L(x,y) + \phi_R(x,y)}{2}} \quad (2)$$

式中, E_0 表示VOF; i 为虚数单位; $\phi_L(x,y)$ 和 $\phi_R(x,y)$ 分别表示由数字光学元件左、右部分施加的相位分布。该等式表明, 每个空间点的可调线偏振态和相位可独立控制, 以满足特定成像需求。图2 (a) 为生成VOF的实验装置概念图, 其中SLM被特意分为两部分, 以独立调制两束预先分

束的光。根据偏振敏感SLM的要求, 两束入射光的偏振需调整至与S偏振方向一致。光通过SLM后, 一束光的偏振经半波片(HWP)调至P偏振(与原始S偏振正交)。随后, 这两束正交线偏振光经四分之一波片(QWP)转换为LCP和RCP。两束光合并后, 成功生成VOF光束。图2 (b) 和 (c) 给出了示例, 其中前者为入射到SLM之前的激光光斑, 后者为施加到SLM上的相位分布。图2 (d) ~ (f) 的结果初步证明了该系统在生成径向柱矢量光方面的有效性, 展示了其生成VOF的基本能力。附录A中的第S1节提供了详细的实验结果和分析, 而附录A中的第S2节则详细描述了波前整形和扫描的操作流程。

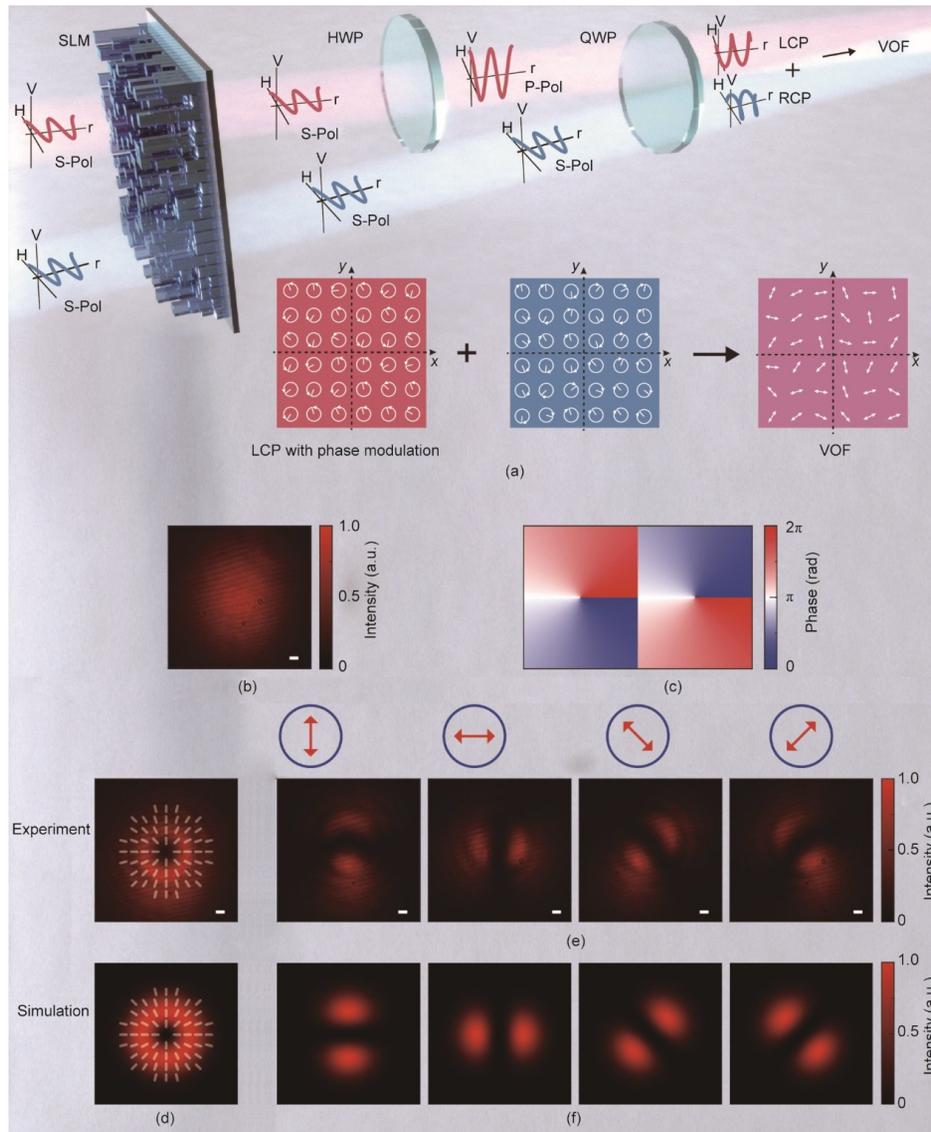


图2. VOF光束的生成。(a) 通过相干偏振光束合成方法生成VOF光束的概念图。起初, 两束预先分离的S偏振光被引导至SLM的左、右两部分, 以进行独立的相位调制。合并前, 利用HWP将其中一束光的偏振态转换为P偏振(与原始S偏振正交)。随后, 这两束正交线偏振光束通过QWP转换为LCP和RCP。最终, 通过合并这两束光, 成功生成VOF。(b) 未经任何调制、入射到SLM上的激光光斑。(c) 施加到SLM上的任意相位分布, 此处以拓扑序为 ± 1 的涡旋相位为例。(d) 生成的矢量光束模式, 白线表示局域线偏振方向。(e) 偏振分析仪在不同角度下对调制光斑的检测结果。(f) 偏振分析仪后光斑的模拟结果。双箭头: 偏振分析仪的偏振方向。比例尺: $220 \mu\text{m}$ 。HWP: 半波片; QWP: 四分之一波片; S-Pol: S偏振光; P-Pol: P偏振光; H: 水平; V: 垂直; r: 径向。

3. 结果

实验装置（图3）采用532 nm皮秒光纤激光器作为光源（掺镱单通倍频光纤激光器532 nm，上海频准激光科技股份有限公司）。首先，使用 $4f$ 系统（ f 为透镜焦距；图3中的透镜1和2）将激光束扩束至直径约3 mm的所需光斑。采用SLM（SLM-210，日本Santec公司）作为数字光学元件进行实验验证。HWP将光束偏振调整为P偏振，以匹配SLM的响应。随后，分束器将光束分为两路，经反射镜引导至空间光调制器的左、右区域进行相位调制。合并前，另一块HWP将一束光的偏振从P偏振改为S偏振。两束光经偏振分束器（PBS）合并后，再经QWP转换为LCP和RCP。接下来，第二个 $4f$ 系统（图3中的透镜3和4）将SLM调制后的光束成像到墙面。这束被SLM调制并从墙面反射的光线，将照亮目标物体。为简化实验，用漫反射镜（DG10-1500-P01，美国Thorlabs公司）代替墙面。从目标反射的光由单光子雪崩二极管（SPAD；FastGated-SPAD，意大利MPD公司）通过透镜（透镜5）捕获。

3.1. 单目标NLOS成像

我们使用粘贴在硬纸板上的反射胶带作为目标，周围环绕黑色漫反射胶带以增强回波信号的对比度。VDO优化前后的光斑分别如图4（a）和（b）所示。用于波前整形的相应相位分布如图4（c）所示。随后，通过在SLM的图案上添加倾斜相位，对目标进行扫描。本实验中，目标放置在距墙0.25 m处，SPAD放置在距墙0.1 m处。

需要注意的是，有个障碍物阻挡了目标和SPAD之间的直视路径。

本实验中，用相机替换目标后测得，目标上聚焦光斑的半峰全宽（FWHM）为0.42 mm，这与我们装置中约0.36 mm的理论衍射极限光斑大小非常接近，表明VDO确实能实现接近衍射极限的聚焦。图4（d）~（f）展示了成像目标的示意图。图4（g）~（i）的结果清楚地表明，我们的VDO技术可实现接近理想的聚焦。图4（j）~（l）的成像结果呈现出清晰的目标轮廓。为评估成像质量，采用峰值信噪比（PSNR）作为评价指标，如图4（m）所示。结果表明，经VDO处理后，扫描性能显著提升。以PSNR为参考，平行四边形的成像质量提升7.9倍，梯形提升7.3倍，字母“L”提升5.4倍，平均提升6.9倍，凸显出我们的技术在提高成像精度方面的潜力。

3.2. 多目标NLOS成像

为进一步验证成像能力，研究进行了多目标成像实验演示。由于我们的实验装置采用脉冲激光器和SPAD，因此可基于TOF重建目标的3D信息。由于SLM的刷新频率远低于SPAD的响应时间，因此每次扫描刷新前，需记录SPAD在每个位置的回波信号。SLM每次刷新时，SPAD都会接收一个标记信号。利用该标记信号，我们能准确提取每个像素对应的SPAD信号，并通过分析第一反弹和第二反弹光子确定TOF，从而获得轴向信息。如图5（a）和（b）所示，两个目标放置在不同位置，呈前后排列进行成像。成像结果如图5所示。

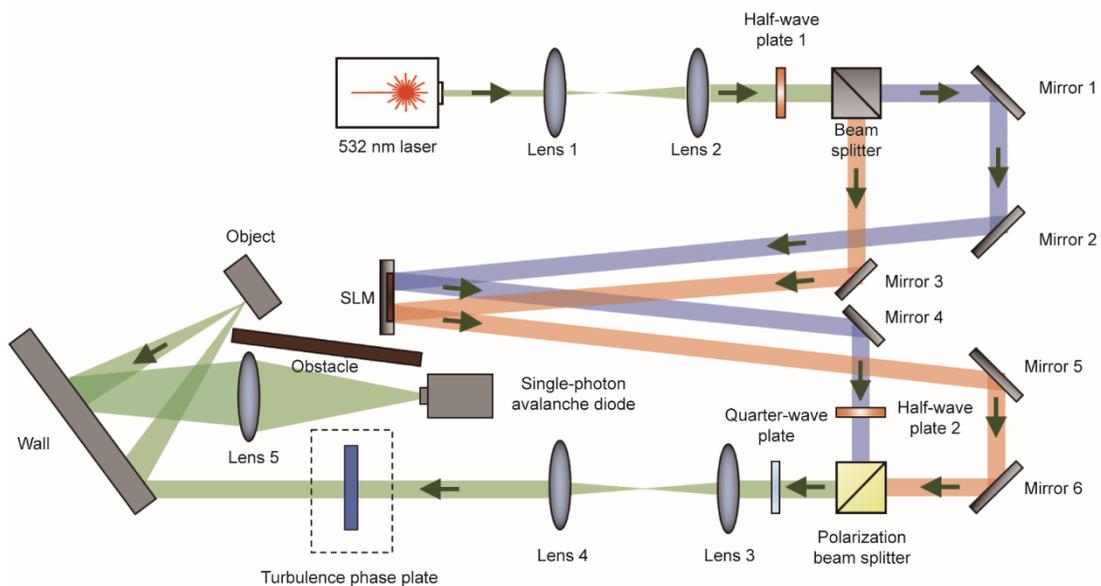


图3. VDO赋能的NLOS实验装置。主要组件包括透镜（1~5）、反射镜（1~6）、两个HWP、一个QWP、一个分束器、一个偏振分束器、一个SLM、一个障碍物、一个湍流相位板以及一个SPAD。

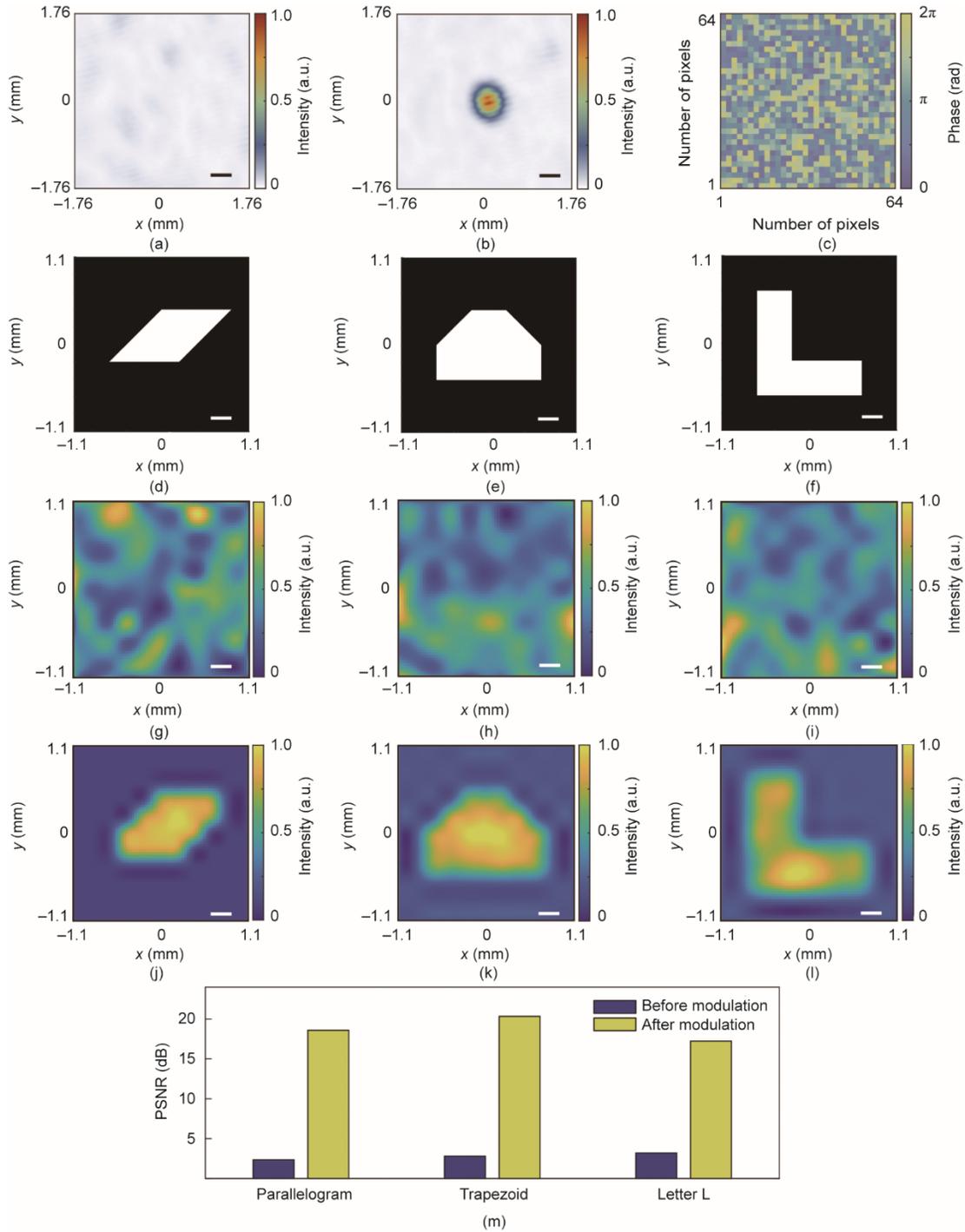


图4. 单目标NLOS实验结果。(a) 经墙面散射后的初始光斑；(b) 波前整形后的聚焦光斑；(c) 用于聚焦的空间光调制器调制相位图案；(d) ~ (f) 成像目标示意图；(g) ~ (i) 调制前的成像结果；(j) ~ (l) 调制后的成像结果；(m) 成像结果的峰值信噪比 (PSNR) 值。比例尺：(a)、(b) 中为 $220 \mu\text{m}$ ；(d) ~ (l) 中为 $260 \mu\text{m}$ 。

本实验中，两个目标之间的轴向距离约为 2.5 cm 。采用 TOF 法计算得到的实际轴向距离为 2.08 cm ，相对误差约为 16.8% 。系统的轴向分辨率主要受整体时序抖动限制，根据仪器响应函数测量显示，其时间分辨率约为 100 ps [46]，这对应光子飞行总距离的误差约为 3 cm 。通过计算这两个总距离的差值并除以 2，可确定目标之间的轴向距

离为 1.5 cm 。图 5 (c) 展示了重建目标的空间位置，每个点的颜色代表其强度。中心点强度较高，边缘点强度较弱。这种模式与光学记忆效应（即光强随焦点移动而变化）一致。尽管存在这种变化，但目标信息的整体重建并未受影响，能够准确重建其空间分布，如图 5 (d) 所示。

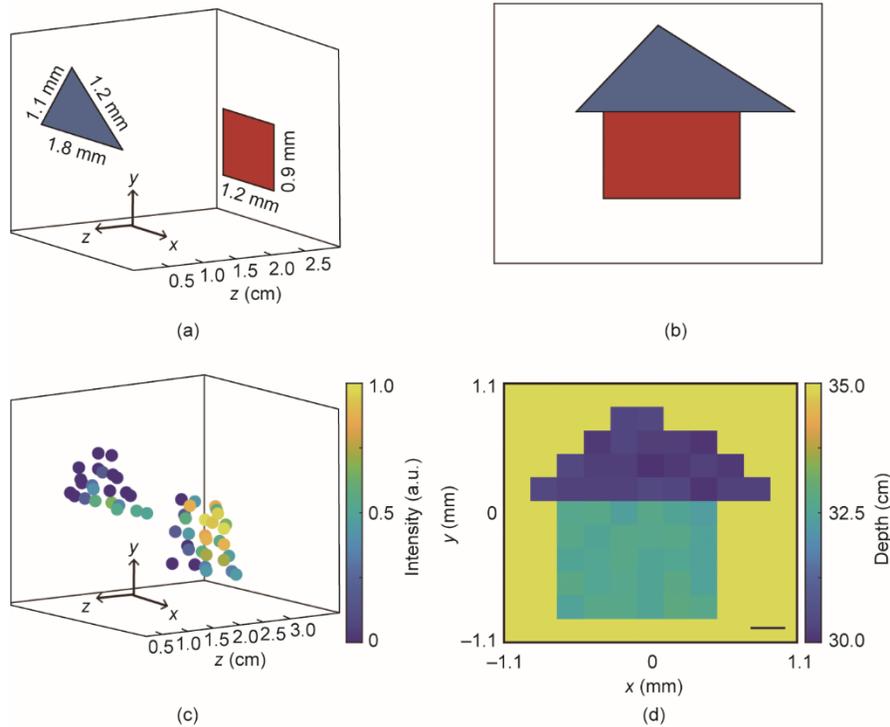


图5. 多目标NLOS成像实验结果。(a) 目标在空间中的布局示意图；(b) 目标的正视图示意图；(c) 重建的目标空间位置；(d) 带深度信息的目标重建图像。比例尺：(d)中为 $260\ \mu\text{m}$ 。

3.3. 偏振选择NLOS成像

在NLOS成像技术中，偏振特性对目标识别至关重要。利用偏振信息可显著增强复杂场景中的目标对比度，提高成像质量。特别是在城市或自然环境中，光经多次反射、折射和散射后，利用偏振特性能够有效区分直接反射和间接反射，提高成像精度和可靠性。此外，对于具有偏振选择性的目标，采用合适的偏振态进行探测可降低背景噪声，进一步增强目标信号的可见性[47–48]。

为验证入射偏振态对回波信号强度的影响，研究设计了专门的实验。本实验中，在目标上获得聚焦光斑后，根据等式(2)在SLM的左、右区域主动引入相位差。这种方法可在不影响波前分布的情况下改变入射偏振态。实验装置采用低功率激光器和大入射角条件，以类朗伯表面作为测试目标。投射光经类朗伯表面各向同性散射，因此可忽略朗伯散射角的影响。研究了回波信号强度与入射偏振态的关系，并在偏振选择前后均进行了扫描成像。评价指标纳入了皮尔逊相关系数(PCC)。实验结果如图6所示。

从图6(a)和(b)可以看出，选择入射光的偏振态后，回波信号中的光子数量显著增加，SNR提升11.38%。这种增强在扫描成像结果中也很明显，如图6(c)和(f)所示。偏振选择前，扫描图像在目标边缘存在明显的信息丢失，如图6(d)和(g)所示。偏振选择后，图像对比度增强，更准确地还原了目标细节，如图6(e)和(h)

所示。此外，如图6(i)所示，PSNR分别提升37.67%和10.01%，PCC分别提升30.12%和9.87%。由于该方法具有偏振选择性，我们在附录A中的第S3节讨论了其在矢量自适应光学中的应用，附录A中的第S4节提供了更多实验数据。

4. 讨论与结论

本研究展示了一种基于VDO的创新NLOS成像技术。本方法首先利用波前整形技术将粗糙表面反射的光聚焦到一点，然后主动调制入射光的偏振态，以最大化探测回波信号。此外，利用光学记忆效应，可移动该焦点对NLOS域内的目标进行扫描成像。在本方法中，成像分辨率由聚焦光斑的大小决定，可优化至衍射极限。此外，由于能够主动控制入射偏振态，因此即使在低激光功率照明条件下，也能获得高SNR的回波信号和高质量的目标成像。最重要的是，由于回波信号包含TOF信息，该技术还可实现目标的3D重建。

我们目前的研究尚未实现基于回波信号将墙体散射光直接聚焦到测试目标上，同时优化入射光的偏振态，主要原因是SPAD的实时信号读取存在技术挑战。为解决这一问题，我们考虑未来采用光电倍增管作为探测器，并探索DMD与SLM的结合使用[16]。此外，我们目前的VOF由

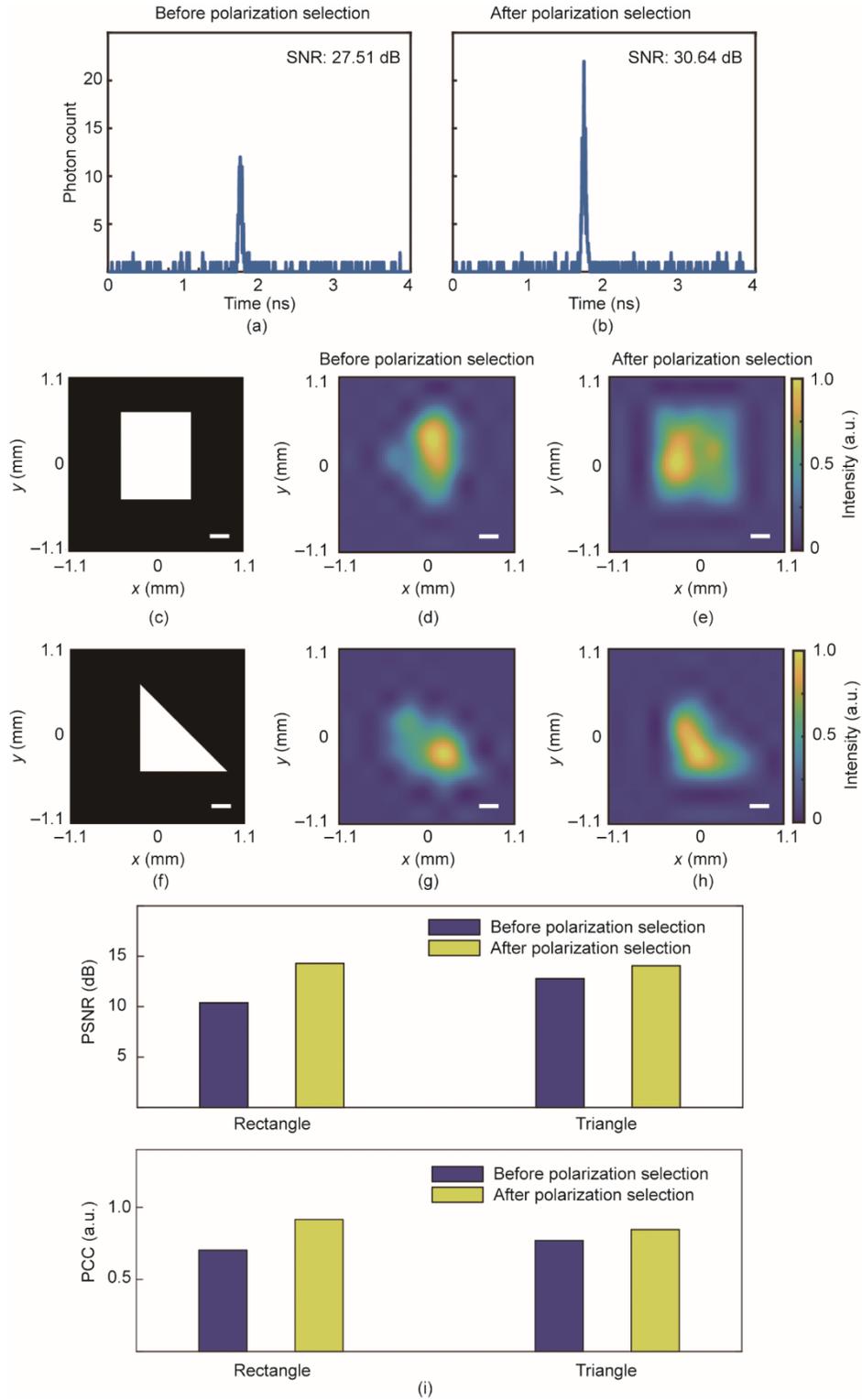


图6. 偏振选择NLOS成像实验结果。(a) 偏振选择前的回波信号强度图；(b) 偏振选择后的回波信号强度图；(c)、(f) 成像目标示意图；(d)、(g) 偏振选择前的成像结果；(e)、(h) 偏振选择后的成像结果；(i) 成像结果的PSNR和皮尔逊相关系数（PCC）值。比例尺：(c) ~ (h) 中为 $260 \mu\text{m}$ 。

SLM生成。不过，基于超表面的VOF调控技术近年来取得了显著进展，可实现更精简、紧凑的系统设计[36,49–50]。这种增强的VOF调控精度使激光无线电力传输成为可能。此外，超表面已被证明具有更强的光学记忆效应[51]。

在生物医学应用领域，超光学的偏振控制特性显著提升了各种生物成像技术的性能[52]。此外，利用超光学的超处理器在光学模拟图像处理中具有低功耗、高速处理的优势[53]。通过将超表面技术与深度学习、端到端设计等最新

NLOS 成像技术相结合[54–57], 有望进一步提升成像速度和质量。我们未来的研究可能会深入探索这些技术, 旨在全面解决NLOS 成像的挑战, 在该领域取得进一步突破。

致谢

本研究得到国家重点研发计划(2023YFB2805800、2021YFA1401003)和国家自然科学基金(62222513)的支持。

Compliance with ethics guidelines

Yinghui Guo, Yunsong Lei, Mingbo Pu, Fei Zhang, Qi Zhang, Xiaoyin Li, Runzhe Zhang, Zhibin Zhao, Rui Zhou, Yulong Fan, and Xiangang Luo declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.013>.

References

- [1] Edgar MP, Gibson GM, Padgett MJ. Principles and prospects for single-pixel imaging. *Nat Photonics* 2019;13(1):13–20.
- [2] Tseng E, Colburn S, Whitehead J, Huang L, Baek SH, Majumdar A, et al. Neural nano-optics for high-quality thin lens imaging. *Nat Commun* 2021;12:6493.
- [3] Yang Y, Forbes A, Cao L. A review of liquid crystal spatial light modulators: devices and applications. *Opto Electron Sci* 2023;2(8):230026.
- [4] Luo X. Multiscale optical field manipulation via planar digital optics. *ACS Photonics* 2023;10(7):2116–27.
- [5] Luo X. Metasurface waves in digital optics. *J Phys Photonics* 2020;2(4):041003.
- [6] Luo X. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics. *Adv Mater* 2019;31(4):1804680.
- [7] Zheng S, Liao M, Wang F, He W, Peng X, Situ G. Non-line-of-sight imaging under white-light illumination: a two-step deep learning approach. *Opt Express* 2021;29(24):40091–105.
- [8] Zhu S, Sua YM, Bu T, Huang YP. Compressive non-line-of-sight imaging with deep learning. *Phys Rev Appl* 2023;19(3):034090.
- [9] Wu C, Liu J, Huang X, Li ZP, Yu C, Ye JT, et al. Non-line-of-sight imaging over 1.43 km. *Proc Natl Acad Sci USA* 2021;118(10):e2024468118.
- [10] Huang X, Ye R, Li W, Zeng JW, Lu YC, Hu H, et al. Non-line-of-sight imaging and vibrometry using a comb-calibrated coherent sensor. *Phys Rev Lett* 2024;132(23):233802.
- [11] Velten A, Willwacher T, Gupta O, Veeraraghavan A, Bawendi MG, Raskar R. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging. *Nat Commun* 2012;3:745.
- [12] O’Toole M, Lindell DB, Wetzstein G. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform. *Nature* 2018;555(7696):338–41.
- [13] Xu Z, Bi S, Sunkavalli K, Hadap S, Su H, Ramamoorthi R. Deep view synthesis from sparse photometric images. *ACM Trans Graph* 2019;38(4):76.
- [14] Liu X, Guillén I, La Manna M, Nam JH, Reza SA, Huu Le T, et al. Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics. *Nature* 2019;572(7771):620–3.
- [15] Starshynov I, Ghafur O, Fitches J, Faccio D. Coherent control of light for non-line-of-sight imaging. *Phys Rev Appl* 2019;12(6):064045.
- [16] Cao R, de Goumoens F, Blochet B, Xu J, Yang C. High-resolution non-line-of-sight imaging employing active focusing. *Nat Photonics* 2022;16(6):462–8.
- [17] Wang B, Zheng MY, Han JJ, Huang X, Xie XP, Xu F, et al. Non-line-of-sight imaging with picosecond temporal resolution. *Phys Rev Lett* 2021;127(5):053602.
- [18] De Aguiar HB, Gigan S, Brasselet S. Polarization recovery through scattering media. *Sci Adv* 2017;3(9):e1600743.
- [19] He C, Antonello J, Booth MJ. Vectorial adaptive optics. *eLight* 2023;3:23.
- [20] Gong L, Zhao Q, Zhang H, Hu XY, Huang K, Yang JM, et al. Optical orbital-angular-momentum-multiplexed data transmission under high scattering. *Light Sci Appl* 2019;8:27.
- [21] Wang Z, Li X, Pu M, Chen L, Zhang F, Zhang Q, et al. Vectorial-optics-enabled multi-view non-line-of-sight imaging with high signal-to-noise ratio. *Laser Photonics Rev* 2024;18(6):2300909.
- [22] Yi X, Liu Y, Ling X, Zhou X, Ke Y, Luo H, et al. Hybrid-order Poincaré sphere. *Phys Rev A* 2015;91(2):023801.
- [23] Shvedov V, Davoyan AR, Hnatovsky C, Engheta N, Krolikowski W. A long-range polarization-controlled optical tractor beam. *Nat Photonics* 2014;8(11):846–50.
- [24] Bliokh KY, Rodríguez-Fortuño FJ, Nori F, Zayats AV. Spin-orbit interactions of light. *Nat Photonics* 2015;9(12):796–808.
- [25] Kagalwala KH, Di Giuseppe G, Abouraddy AF, Saleh BE. Bell’s measure in classical optical coherence. *Nat Photonics* 2013;7(1):72–8.
- [26] Wang J. Advances in communications using optical vortices. *Photon Res* 2016;4(5):B14–28.
- [27] Nape I, Singh K, Klug A, Buono W, Rosales-Guzman C, McWilliam A, et al. Revealing the invariance of vectorial structured light in complex media. *Nat Photonics* 2022;16(7):538–46.
- [28] Dorrah AH, Capasso F. Tunable structured light with flat optics. *Science* 2022;376(6591):eabi6860.
- [29] Gigli C, Leo G. All-dielectric $\chi^{(2)}$ metasurfaces: recent progress. *Opto Electron Adv* 2022;5(7):210093.
- [30] Wang JT, Tonkaev P, Koshelev K, Lai F, Kruk S, Song Q, et al. Resonantly enhanced second- and third-harmonic generation in dielectric nonlinear metasurfaces. *Opto Electron Adv* 2024;7(5):230186.
- [31] Gigli C, Marino G, Artioli A, Rocco D, De Angelis C, Claudon J, et al. Tensorial phase control in nonlinear meta-optics. *Optica* 2021;8(2):269–76.
- [32] Camacho-Morales MDR, Rocco D, Xu L, Gili VF, Dimitrov N, Stoyanov L, et al. Infrared upconversion imaging in nonlinear metasurfaces. *Adv Photonics* 2021;3(3):036002.
- [33] Jang M, Horie Y, Shibukawa A, Brake J, Liu Y, Kamali SM, et al. Wavefront shaping with disorder-engineered metasurfaces. *Nat Photonics* 2018;12(2):84–90.
- [34] Shen Z, Zhao F, Jin C, Wang S, Cao L, Yang Y. Monocular metasurface camera for passive single-shot 4D imaging. *Nat Commun* 2023;14:1035.
- [35] Li L, Wang S, Zhao F, Zhang Y, Wen S, Chai H, et al. Single-shot deterministic complex amplitude imaging with a single-layer metalens. *Sci Adv* 2024;10(1):eadl0501.
- [36] Zhang F, Guo Y, Pu M, Chen L, Xu M, Liao M, et al. Meta-optics empowered vector visual cryptography for high security and rapid decryption. *Nat Commun* 2023;14:1946.
- [37] Dorrah AH, Rubin NA, Zaidi A, Tamagnone M, Capasso F. Metasurface optics for on-demand polarization transformations along the optical path. *Nat Photonics* 2021;15(4):287–96.
- [38] Piccardo M, de Oliveira M, Toma A, Aglieri V, Forbes A, Ambrosio A. Vortex laser arrays with topological charge control and self-healing of defects. *Nat Photonics* 2022;16(5):359–65.
- [39] Gao Y, Chen Z, Ding J, Wang HT. Single ultra-high-definition spatial light modulator enabling highly efficient generation of fully structured vector beams. *Appl Opt* 2019;58(24):6591–6.
- [40] Liu S, Qi S, Zhang Y, Li P, Wu D, Han L, et al. Highly efficient generation of arbitrary vector beams with tunable polarization, phase, and amplitude. *Photon Res* 2018;6(4):228–33.
- [41] Moreno I, Davis JA, Cottrell DM, Donoso R. Encoding high-order cylindrically polarized light beams. *Appl Opt* 2014;53(24):5493–501.
- [42] Liu S, Li P, Peng T, Zhao J. Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer. *Opt Express* 2012;20(19):21715–21.

- [43] Chen S, Zhou X, Liu Y, Ling X, Luo H, Wen S. Generation of arbitrary cylindrical vector beams on the higher order Poincaré sphere. *Opt Lett* 2014; 39(18):5274–6.
- [44] Li P, Zhang Y, Liu S, Ma C, Han L, Cheng H, et al. Generation of perfect vectorial vortex beams. *Opt Lett* 2016;41(10):2205–8.
- [45] Zhang Y, Li P, Ma C, Liu S, Cheng H, Han L, et al. Efficient generation of vector beams by calibrating the phase response of a spatial light modulator. *Appl Opt* 2017;56(17):4956–60.
- [46] Becker W, Bergmann A, Biscotti GL, Rueck A. Advanced time-correlated single photon counting techniques for spectroscopy and imaging in biomedical systems. In: *Proceedings of Lasers and Applications in Science and Engineering*; 2004 Jan 25; San Jose, CA, USA. SPIE; p. 104–12.
- [47] Liang J, Ye Y, Gu F, Zhang J, Zhao J, Song Z. A polarized structured light method for the 3D measurement of high-reflective surfaces. *Photonics* 2023; 10(6):695.
- [48] Huang X, Wu C, Xu X, Wang B, Zhang S, Shen C, et al. Polarization structured light 3D depth image sensor for scenes with reflective surfaces. *Nat Commun* 2023;14:6855.
- [49] Guo Y, Zhang S, Pu M, He Q, Jin J, Xu M, et al. Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation. *Light Sci Appl* 2021;10:63.
- [50] Luo X, Pu M, Zhang F, Xu M, Guo Y, Li X, et al. Vector optical field manipulation via structural functional materials: tutorial. *J Appl Phys* 2022; 131(18):181101.
- [51] Valagiannopoulos C, Sarsen A, Alù A. Angular memory of photonic metasurfaces. *IEEE Trans Antennas Propag* 2021;69(11):7720–8.
- [52] Wang X, Wang H, Wang J, Liu X, Hao H, Tan YS, et al. Single-shot isotropic differential interference contrast microscopy. *Nat Commun* 2023;14:2063.
- [53] Wang Z, Hu G, Wang X, Ding X, Zhang K, Li H, et al. Single-layer spatial analog meta-processor for imaging processing. *Nat Commun* 2022;13:2188.
- [54] Metzler CA, Heide F, Rangarajan P, Balaji MM, Viswanath A, Veeraraghavan A, et al. Deep-inverse correlography: towards real-time high-resolution non-line-of-sight imaging. *Optica* 2020;7(1):63–71.
- [55] Liu X, Wang J, Li Z, Shi Z, Fu X, Qiu L. Non-line-of-sight reconstruction with signal-object collaborative regularization. *Light Sci Appl* 2021;10:198.
- [56] Willomitzer F, Rangarajan PV, Li F, Balaji MM, Christensen MP, Cossairt O. Fast non-line-of-sight imaging with high-resolution and wide field of view using synthetic wavelength holography. *Nat Commun* 2021;12:6647.
- [57] Huang L, Han Z, Wirth-Singh A, Saragadam V, Mukherjee S, Frösch JE, et al. Broadband thermal imaging using meta-optics. *Nat Commun* 2024;15:1662.