
基于像散超构透镜的大视场时空高分辨3D成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41019.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于像散超构透镜的大视场时空高分辨3D成像。 导读

从自动驾驶到无人机跟踪，激光雷达（LiDAR）作为三维成像核心技术，面临着大视场、高帧率、高分辨率难以兼得的瓶颈困境。传统机械扫描LiDAR视场虽宽但体积笨重、速率迟缓，无惯性扫描LiDAR速率提升却受限于窄视场与光束像散，且机械慢轴进一步限制成像帧率。近日，中国科学院光电技术研究所罗先刚院士、蒲明博研究员团队提出基于大视场像散超构透镜（AML）协同光谱-

声光扫描的创新方案——既突破慢轴速率限制，又解决扫描轴间协同难题，成功实现兼具36.6 MHz超高帧级点获取速率（FPAR）、 102° 大视场及 6.5 mrad 角分辨率的LiDAR新架构。

相关成果以 Spectral-acoustic-coordinated astigmatic metalens for wide field-of-view and high spatiotemporal resolution 3D imaging 为题发表于《Light: Science Applications》。中国科学院光电技术研究所龚舒健博士生、郭迎辉研究员、李晓银副研究员为论文的共同第一作者。

研究背景

作为机器人、自动驾驶等智能系统的眼睛，LiDAR的性能直接决定了环境感知的实时性与精准度。现有商用车载LiDAR呈现点获取速率（PAR，已提升至数MHz）、分辨率持续提升的发展趋势，高速、大视场、高分辨的应用需求日益迫切。但传统LiDAR仍面临三大核心瓶颈：一是尽管无惯性光谱扫描已能实现数十MHz的PAR，但现有双轴扫描机制存在轴间速率不匹配问题，限制有效成像帧率；二是双轴级联扫描带来的视场失配与光束像散问题，将显著降低空间分辨率；三是视场角与分辨率存在固有矛盾，传统光学系统难以兼顾大视场覆盖与高分辨探测，亟需通过新型光学设计理念与技术方案解决。

近年来，得益于微纳加工技术的持续发展，超构表面技术凭借高自由度多维光场调控能力及轻薄易集成的特性，为光学成像系统的多功能化、小型化发展提供了全新解决方案。

创新研究

（一）总体概念：基于时空谱协同调控突破LiDAR关键指标核心矛盾

此前，该研究团队已提出基于旋转—平移对称变换的二次相位超构透镜【Opt. Express, 2017, 25: 31471】，并成功实现 178° 大视场被动成像【Adv. Mater., 2021, 33: 2008157】。在此基础上，团队将这一技术进一步拓展至LiDAR这类主动激光成像场景，通过像散超构透镜（AML）协同光谱-

声光扫描的创新设计，同步提升大视场下的成像分辨率、速率并解决扫描轴间匹配问题，最终突破传统技术大视场、高帧率、高分辨率难以兼顾的核心矛盾。具体技术路线如下：(1) 利用二次相位的大视场角优势，以其作为AML的基础相位；(2) 创新性地在二次相位中引入高阶像散相位，以此抑制光束像散，提升大视场下的角分辨率；(3) 实现AML与光谱-声光扫描深度融合，既解决了级联扫描轴间的视场失配问题，又实现了高帧率成像，最终构建兼具大视场、高时间分辨率（高成像帧率）与高空间分辨率（高角分辨能力）的LiDAR新架构（图1）。

该架构以AML为核心光学元件，融合光谱-声光扫描模块，可捕捉大视场范围内高速运动目标（图1a）。为实现高速二维光束扫描，团队通过光谱扫描（快轴，像素级点获取速率PPAR达数十MHz）与声光偏转器（AOD，慢轴，MHz级点切换速率）的速率匹配设计，当慢轴切换与快轴扫描周期完全同步时，有效帧级点获取速率（FPAR）可与PPAR持平，实现全固态无冗余扫描（图1b）。针对光束像散与视场窄的痛点，AML通过独特的像散相位分布，既能校正色散元件引发的光束像散，又能扩展光谱扫描视场；而普通超构透镜（NML）因无像散补偿，无法在实现视场扩展的同时保持高分辨率（图1c）。该LiDAR架构最终实现了36.6 MHz超高FPAR、 102° 水平视场与 0.37° （6.5 mrad）空间分辨率，可分辨155 cm处1 cm线宽目标，亦可清晰捕捉高速旋转风扇的运动轨迹（图1d）。

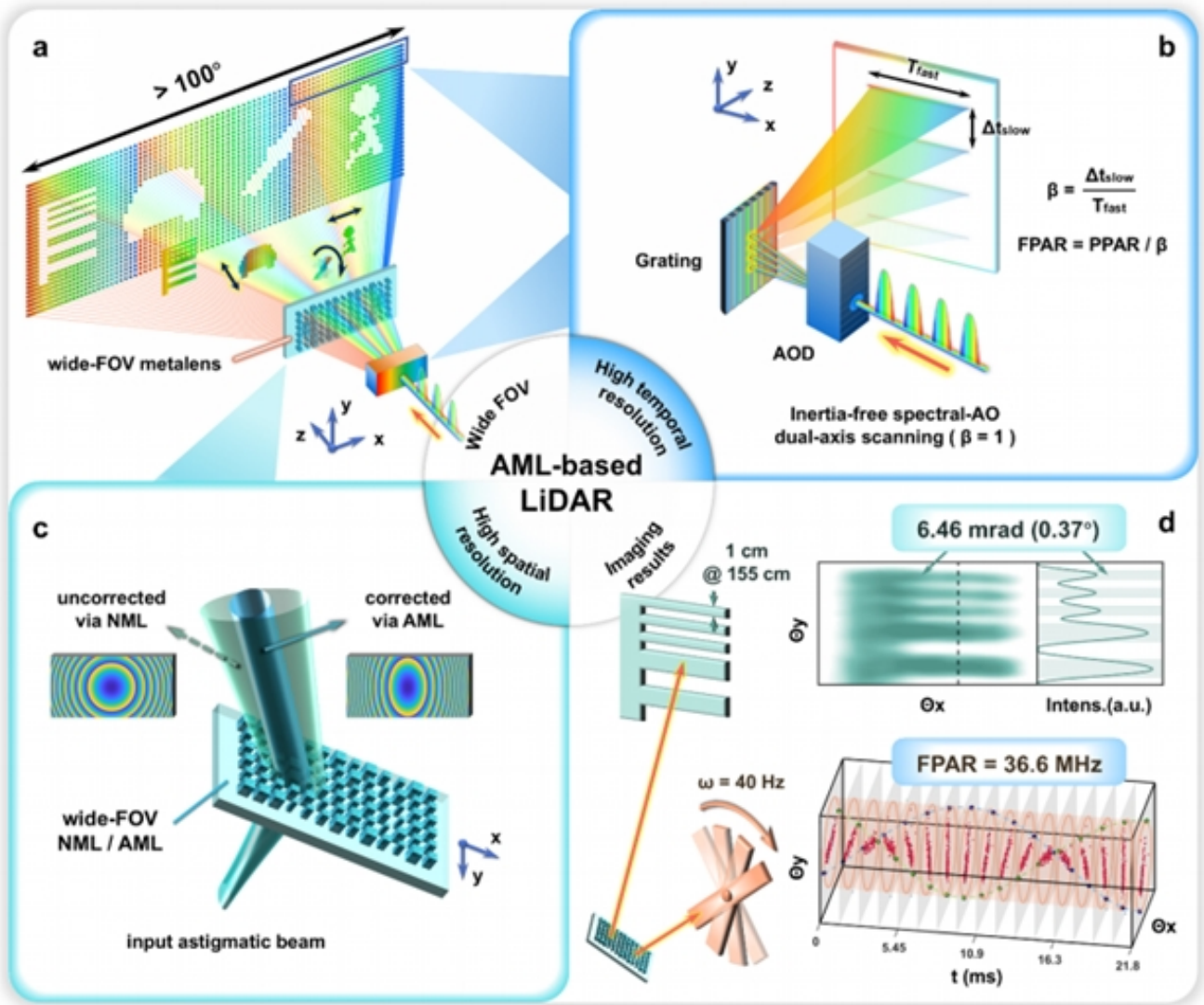


图1. 基于像散超构透镜（AML）的大视场时空高分辨LiDAR概念图

（二）系统架构：光谱-声光-超构透镜的协同设计

实验上，团队搭建了由光源编码-双轴扫描-光场调控-探测重建组成的完整LiDAR系统（图2a）：宽谱脉冲光经光谱-时间编码后转化为离散啁啾脉冲序列，将光谱扫描周期时间拉伸至AOD可响应的 μs 量级，再通过AOD和闪耀光栅（BG）完成光谱-声光级联扫描（图2b），以此实现速率匹配设计；系统后端集成基于AML的扩视场光学系统，在扩展视场的同时抑制光束发散；目标回波信号由光电倍增管（PMT）探测，基于脉冲飞行时间（TOF）信息重建3D场景。

作为系统核心器件，AML的独特设计提升了LiDAR的空间探测能力，与未经调制的0级光束相比，AML既能扩展视场，又能提升空间分辨率（图2c）。这是由于BG的各向异性造成了光束像散（光束在色散方向的发散角增大，在垂直于色散方向的发散角保持不变），即BG出射光束将呈椭圆-圆形-椭圆演化的像散特性。NML虽能扩视场却无法解决像散，发散角同步增大，而所提出的AML通过额外引入高阶像散相位可同时校正光束像散与扩展视场。

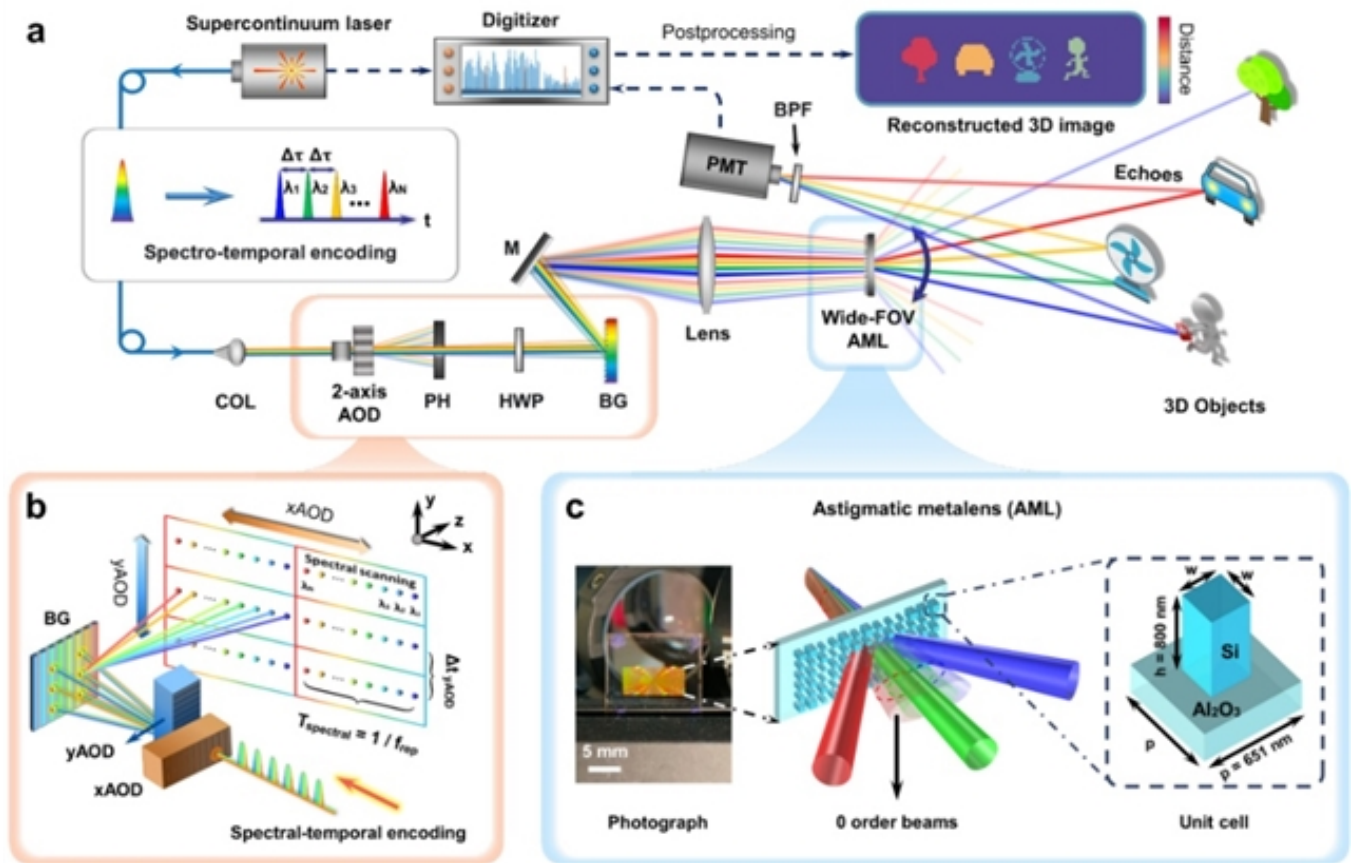


图2. (a) 实验装置示意图；(b) 光谱-声光级联扫描架构；(c) 像散超构透镜（AML）可同时扩展视场及提升空间分辨率（左：实物图；右：超原子单元结构），显著增强LiDAR的空间探测能力

（三）高时空分辨率3D成像

团队针对动态目标成像以验证高时间分辨率。实验场景包含F-A-S-T字母靶标与旋转风扇，目标视场覆盖 $\pm 40^\circ$ （图3a）。借助高达36.6 MHz的FPAR，系统实现了734 fps的成像帧率（每帧 600×83 扫描点数），图3b为对旋转风扇成像结果的时间切片；补充材料视频展现了最高实现的20.3 kfps超高帧率。此外，团队采用分辨率靶开展实验（图3c），最终实现了6.46 mrad空间分辨率（图3d,e）。

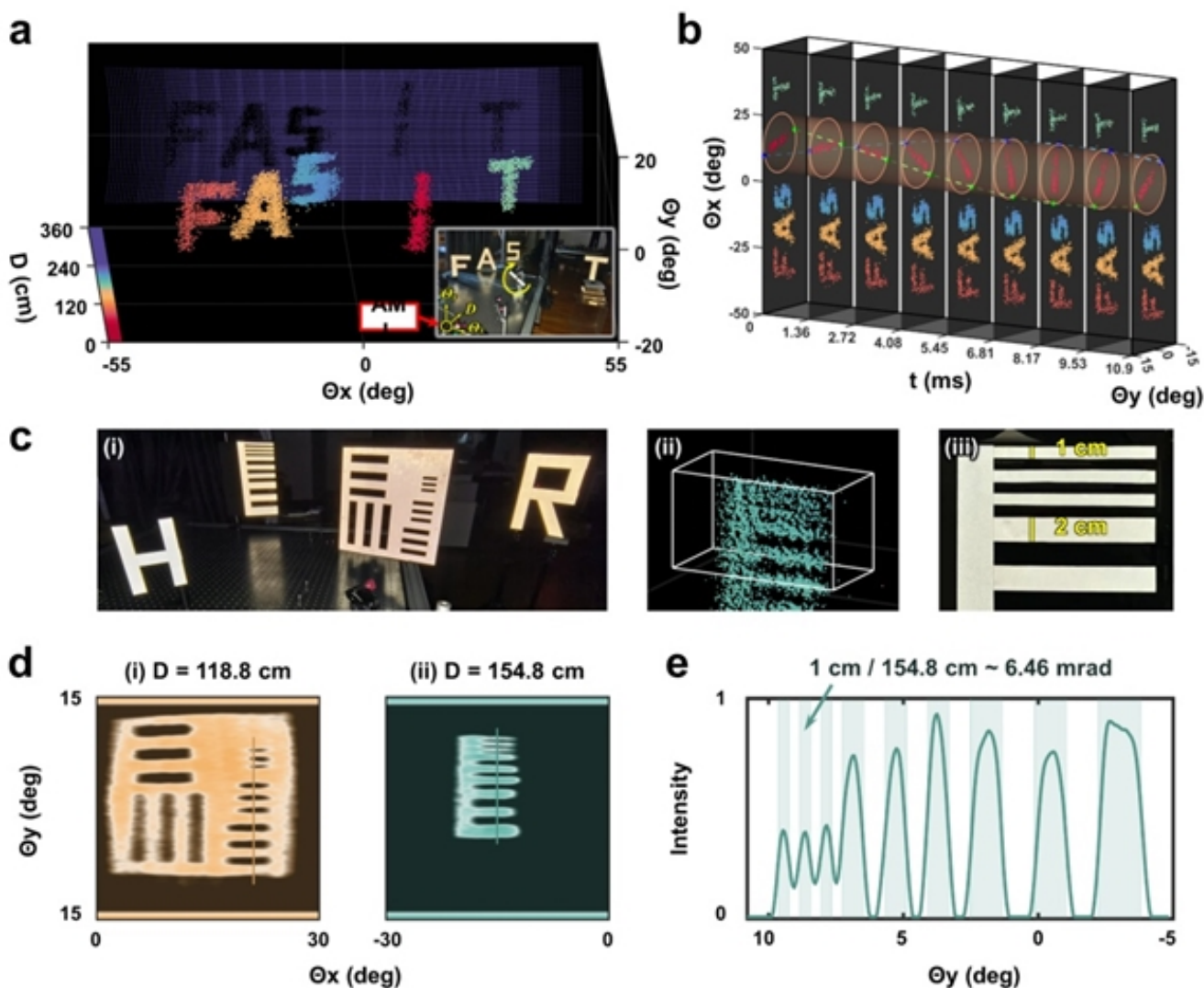


图3. (a) 动态3D成像场景及结果；(b) 风扇旋转的时间演化切片；(c) 静态场景及直接点云成像结果；(d) 经亚像素重建所得不同深度切片图像；(e) 图(d)(ii)中直线位置强度剖面

总结与展望

本研究通过像散超构透镜与光谱-声光协同扫描的创新融合，从原理上突破了LiDAR大视场、高帧率、高分辨率不可兼得的长期困境。该系统不仅具备36.6 MHz超高点获取速率、 102° 大视场、 0.37° 高分辨率的综合优势，还兼具集成化、小型化的工程化特性，在自动驾驶、无人机跟踪、集成通感一体化等领域具有广阔应用前景。未来，团队将进一步优化激光光源与编码技术，拓展探测距离与环境适应性，推动该技术从实验室走向产业化应用，为下一代光学智能体（OIA）的感知能力升级提供核心支撑。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02180-7>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权

等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们联系。
作者：罗先刚等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发