
基于二元相位超像素的高速复场调制技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33440.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！

基于二元相位超像素的高速复场调制技术。 导读

复场调制（CFM）在物理学、生物医学和仪器仪表等领域有着广泛的应用。在现有方法中，基于超像素的复场调制因高调制精度以及与高速空间光调制器（SLM）易兼容等优势而备受关注。然而，主流的基于二元幅度调制的方法在光学效率和动态范围上存在局限。为了克服这些挑战，加拿大魁北克大学国立科学研究院梁晋阳教授课题组等研究人员利用相位光调制器（PLM），开发了基于二元相位标刻（BiPE）超像素的复场调制技术。该技术达到了高达1.44kHz的高精度空间幅度和相位调制。此外，作者还基于BiPE超像素的复场调制实现了光束整形、高速投影和增强现实显示等方面的应用。

该文章近日发表在Light: Advanced Manufacturing，题为High-speed complex field modulation using binary phase-engraved superpixels，加拿大魁北克大学的Patrick Kilcullen为论文第一作者，第二作者刘晶丹现任中国科学院上海光学精密机械研究所研究员，梁晋阳教授为通讯作者，中国科学技术大学龚磊教授和Meta Platforms Youmin Wang博士为共同作者。

研究背景

复光场（幅度和相位）的完全调制目前在光通信、三维显示等方面得到广泛应用。对于复场调制光学仪器而言，高精度、高速和多功能性成为重要技术指标。仪器中多种性能的提升也催生了新的应用，如高精度激光束整形、自适应波前工程、高速图像投影、光图案化液晶（LCs）等。空间光调制器（SLMs）在复场调制（CFM）的整体性能中起着关键作用。目前，最常用于CFM的SLMs是硅基液晶（LCOS）器件，可通过调节液晶单元两端的偏压来改变相位。然而，由于液晶材料的粘弹性，目前最先进的基于LCOS的SLMs的刷新率限制在亚千赫兹。

为了解决速度上的限制，可以使用基于微机电系统（MEMSs）的SLMs，其中变形镜（DMs）是使用较为广泛的一种，但DM架构的复杂性限制了它们的小型化程度。数字微镜器件（DMDs）具有百万像素的帧尺寸和数十kHz级别的图案刷新率，可以消除基于MEMS的SLMs的像素数量限制，但是二元幅度调制无法将大部分能量衍射到所需的衍射级，限制了整体效率（低于10%）。

相位光调制器（PLM）是德州仪器（Texas Instruments）在研的一种新型SLM。由于使用了DMD制造的所有核心制造技术，PLM在很大程度上与现有的DMD驱动器和控制模块兼容，并具有相似的优点。然而，由于制造工艺的限制，现有的PLMs中的相位分布并不均匀，使得在实际应用中像素携带的信息减少到4 bit以下。因此，使用二元相位来补偿当前PLM设备中的不均匀性是一个较好的策略。

研究亮点

研究团队首先介绍了基于BiPE超像素的CFM实验装置，如图1所示。532 nm的激光经分光镜（BS1）反射后，以正常入射角照射PLM。由透镜L1和L2组成的4-f系统以及圆形光圈将加载到PLM上的二元相位图案成像到CCD摄像机上。L1安装在二维平移台上，以提供相对于空间滤波器的横向偏移。除了4-f成像系统外，还有一个用于干涉测量的辅助参考光束路径。通过BS1传输的光由两个反射镜M1和M2反射。置于L2之后的第二个分光镜（BS2）可使经PLM调制的场和参考光束形成一个干涉图样。

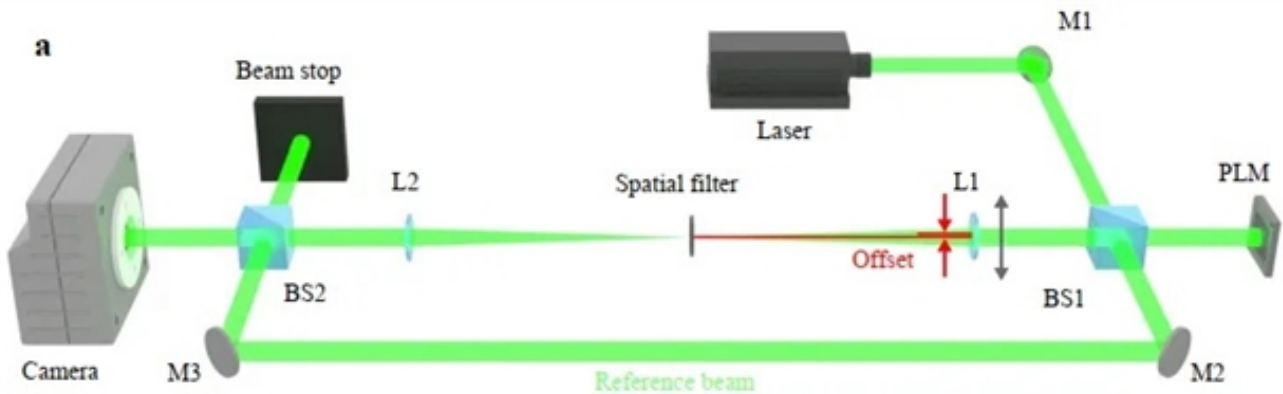


图1.基于BiPE超像素的CFM光路图

为了验证对目标场振幅和相位的独立控制能力，作者测试了振幅图案和相位图案的显示效果，这两种图案均设计为双向线性渐变形式。作者分别进行了幅度场的显示与重建实验实现了整个色域强度范围内的幅度调制、相位场的显示与重建实验且相位渐变平均轮廓与理论真值匹配良好（图2）。

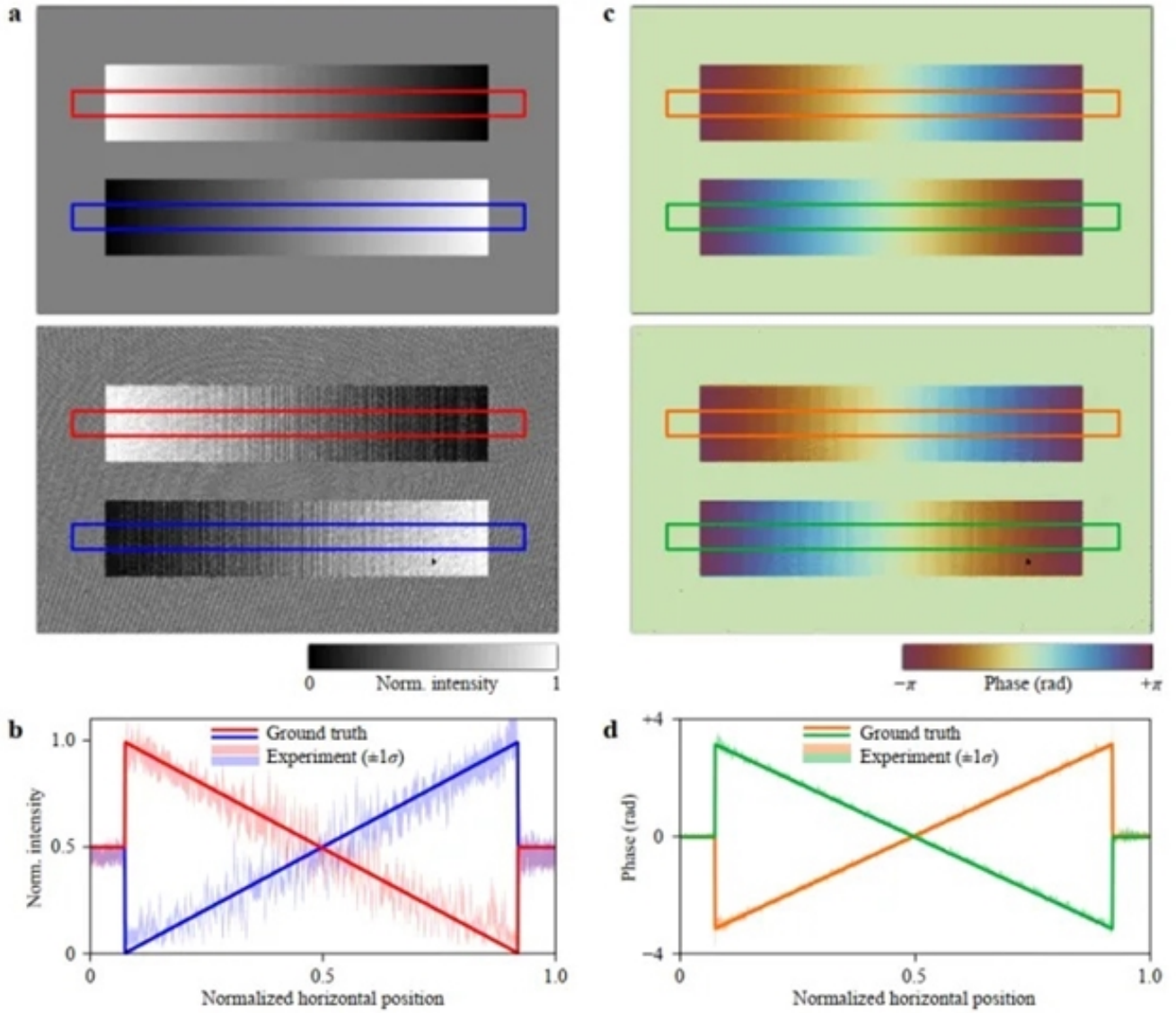


图2. 振幅和相位控制的验证

为了展示基于BiPE超像素的CFM在激光束整形方面的潜在应用，研究人员生成了贝塞尔光束和拉盖尔-高斯（LG）光束这两种单模目标场完成了实验测量（图3）。结果表明，实验生成的光束与预设的场幅度高度吻合，并且能够准确反映出由贝塞尔函数负向振荡所导致的相位反转现象。光束的振幅和相位分布也能与预设光束高度匹配。

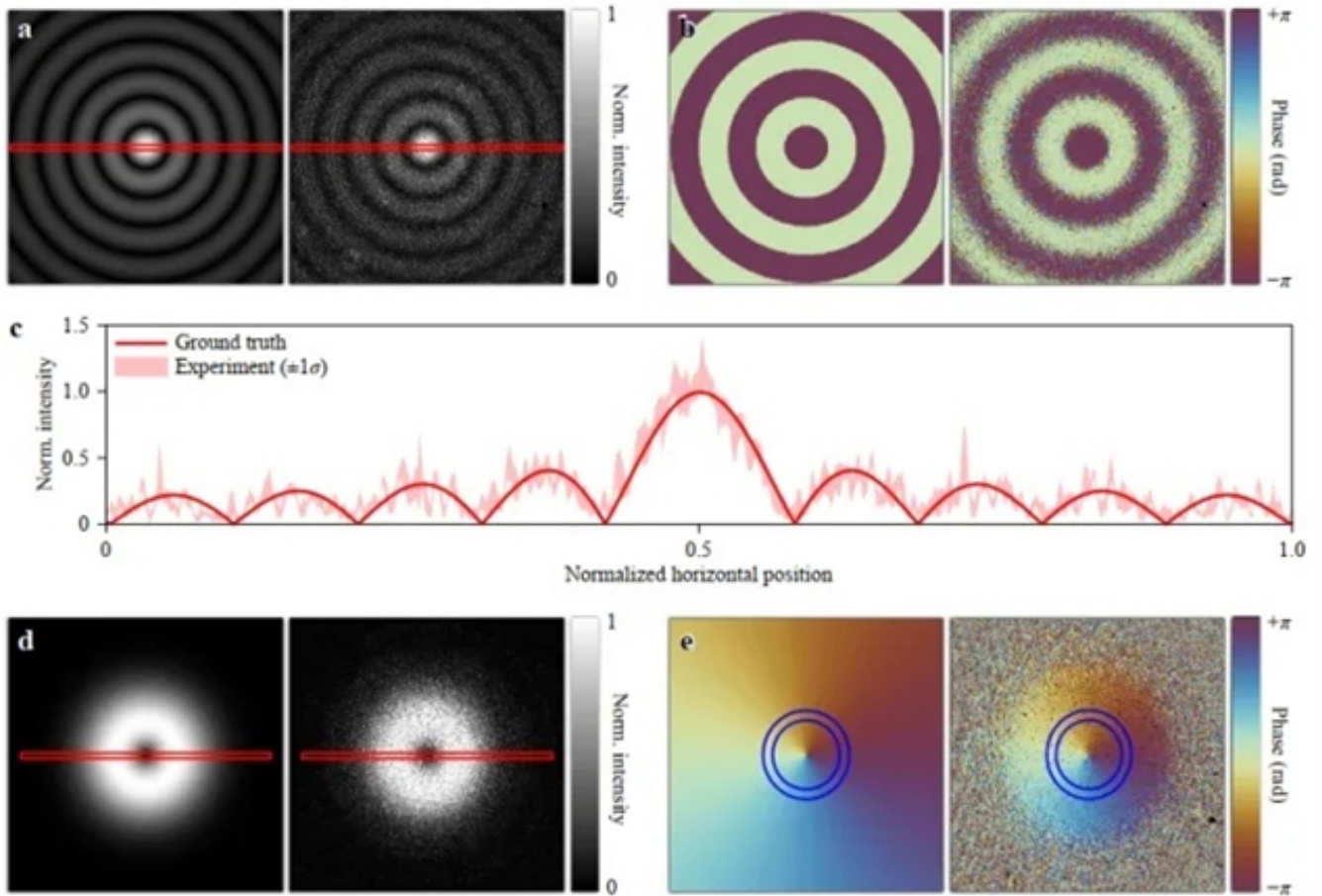


图3. 复光场的生成

为了展示基于BiPE超像素的CFM在先进显示领域的应用潜力，研究人员以不同速度展示了包含幅度和相位信息的24帧动画序列。首先，图4a和图4b展示了在PLM设备最高显示速率1.44kHz下，仅振幅和仅相位数字的典型显示结果。为了在设备全速运行时对复杂场进行表征，作者从单个C CD条纹图像中提取幅度和相位信息。并且为了获得更高的精度，作者还采用多帧处理方法，以60Hz的频率展示并表征了复场，结果如图4c所示。

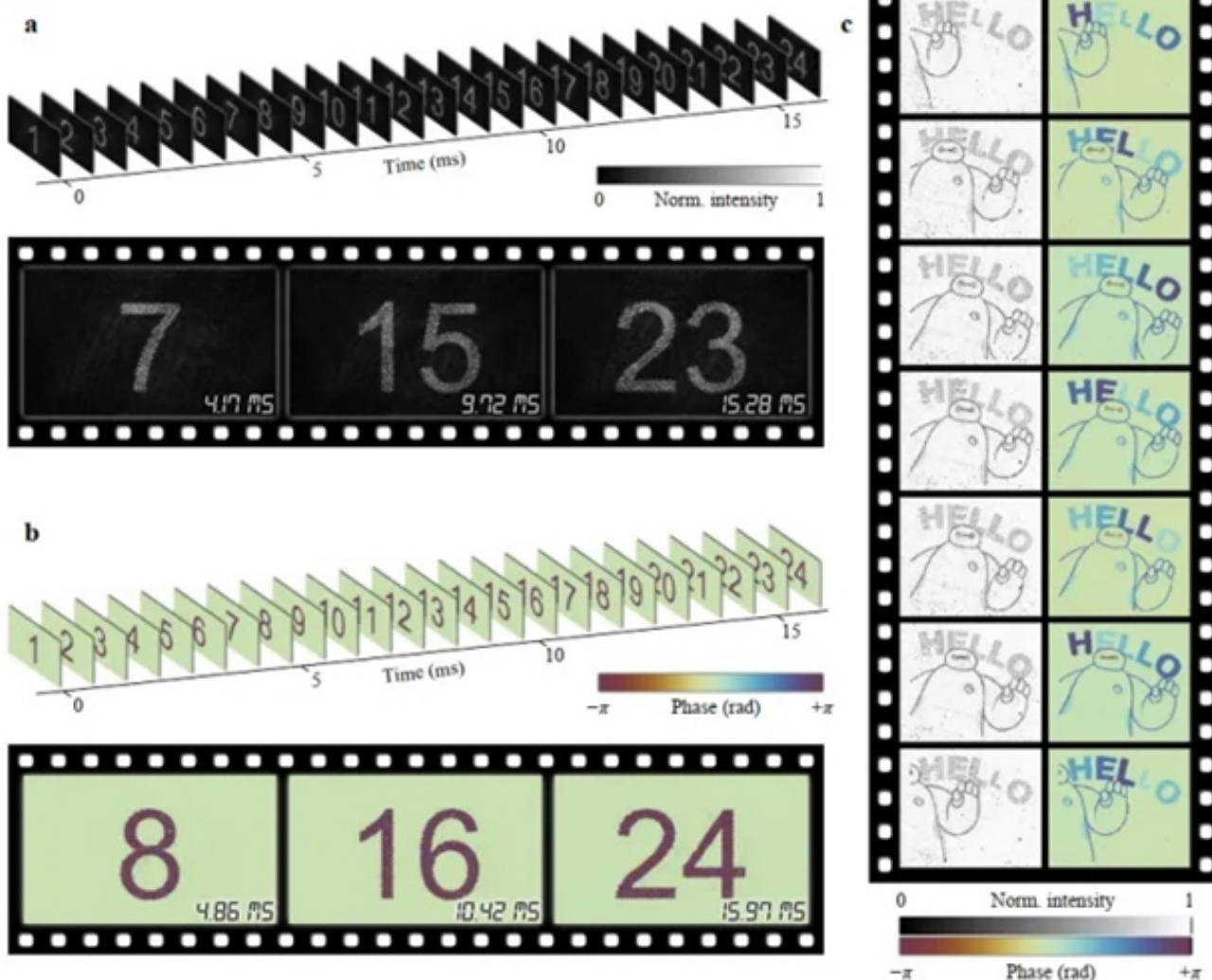


图4. 在先进显示中的应用

最后，为了验证基于BiPE超像素的CFM在增强现实（AR）显示中的适用性，作者将参考光路替换为成像光路，该光路将PLM生成的光场与相机传感器上的真实场景视图相结合，通过一个50mm相机镜头和中继透镜将真实场景成像到相机传感器上。并利用《星球大战》系列中的两个玩具人偶实现了AR显示。

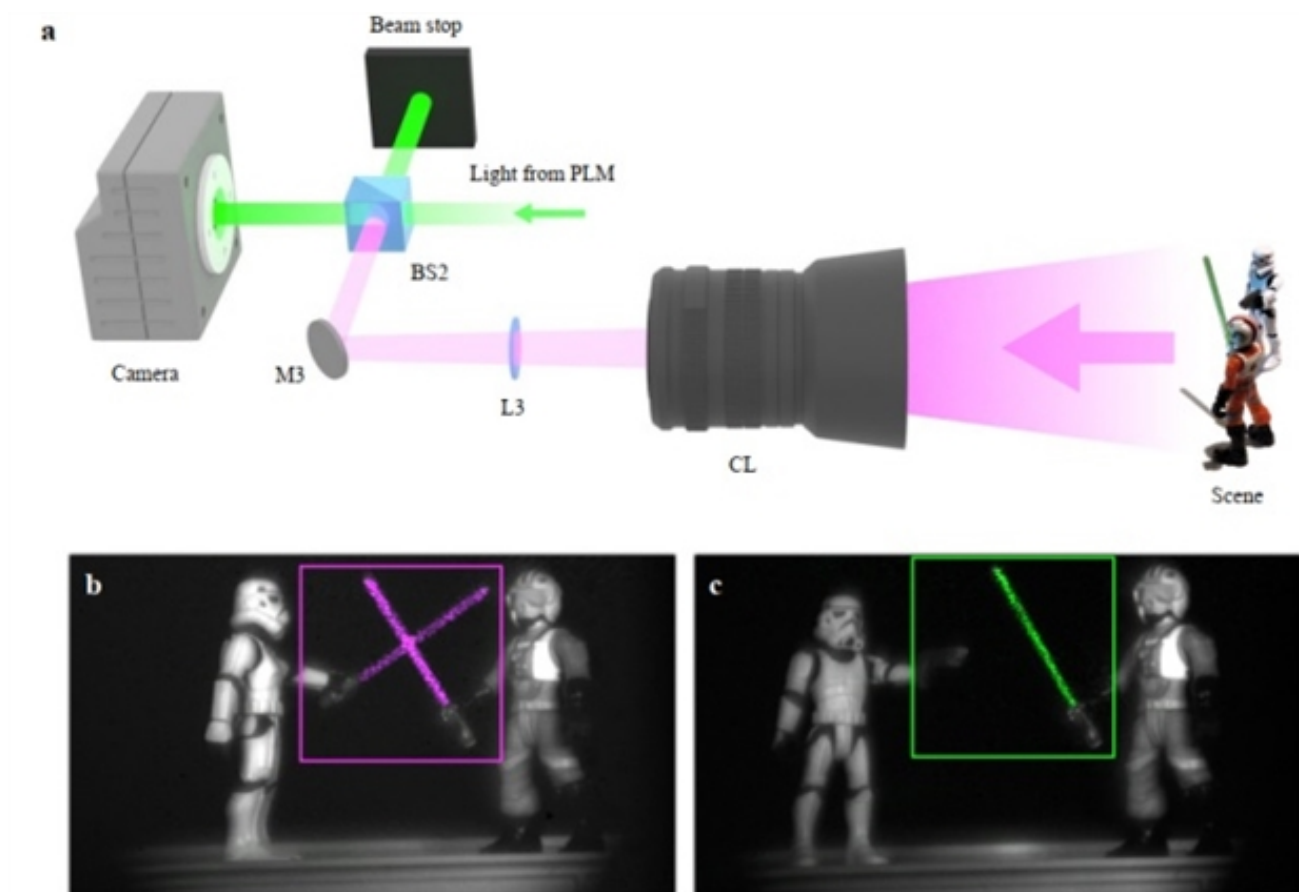


图5. 在AR显示中的应用

总结与展望

研究团队结合PLM设计并实现了基于BiPE超像素的CFM技术。该技术克服了PLM相位响应非线性的缺点，同时还能以高达1.44kHz的速度实现高精度的空间幅度和相位调制。研究团队还展示了该技术在结构化光束整形、先进图像投影和增强现实显示等领域的应用。

本文中基于BiPE超像素的CFM的图案处理步骤仅在离线计算中得到验证，未来采用如预计算和并行计算等优化策略，可在更高的CFM质量和空间带宽之间进行权衡。未来可开发图案生成算法，利用多核计算硬件，在超像素阵列上快速执行，推动BiPE超像素方法在需要自适应显示和计算资源有限的CFM应用中的发展。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.017>

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事宜，请与我们联系。

作者：梁晋阳等 来源：《光：先进制造》

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