
突破红外上转换成像瓶颈，实现视频速率高保真复振幅成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41795.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！

突破红外上转换成像瓶颈，实现视频速率高保真复振幅成像。 导读

红外探测与成像技术在生物成像、光谱分析、数据存储、自动驾驶夜视等众多领域发挥着不可替代的作用。然而，传统红外成像设备不仅依赖昂贵的低温工作的外延半导体传感器，而且无法同时捕捉光场的振幅和相位信息，难以满足高端应用需求。现有红外上转换成像技术虽能通过低成本硅基探测器实现红外到可见光的转换，却仍面临实时性差、保真度低、相位信息丢失等瓶颈，严重制约了其规模化应用。

近日，厦门大学、广东工业大学、暨南大学联合团队联合提出上转换光学熵编码新概念，成功研发出一种具备视频帧率、高光敏度、高保真的红外光场复振幅成像系统。该系统巧妙融合无序光子结构的光散射信息熵编码特性与镧系上转换发光技术，借助深度学习网络，仅需单张可见光快照即能获取红外光场的振幅和相位信息，突破了传统红外成像的技术瓶颈。相关研究成果以 Upconversion optical entropy encoding for infrared complex-amplitude imaging 为题发表于国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》。

研究背景

红外光因其独特的穿透性和热敏感性，成为众多前沿领域的核心探测手段。但长期以来，红外成像技术始终被两大难题困扰：一是探测成本高，商用红外传感器多依赖昂贵外延半导体材料，且常需在低温环境下工作，设备体积大、成本高昂；二是信息获取不完整，光场的复振幅（振幅和相位）是描述光学特征的完整参数，而现有多数红外成像技术仅能捕捉振幅信息，丢失的相位信息往往包含物体的细微结构、折射率分布等关键信息。

为解决探测成本问题，科研人员开发了红外上转换成像技术——将低能量的红外光转换为可见光，再用低成本的硅基探测器捕捉，大幅降低设备成本。目前主流的上转换成像主要分为两种：一种是相干上转换成像，依托非线性晶体的参量振荡实现红外到可见光的转换，虽能保留部分光场信息，但需要高功率泵浦光源，且对偏振控制、相位匹配条件要求极高，不仅能耗大，而且难以实现实时成像，实用性有限。另一种是非相干上转换成像，利用镧系材料的多光子发光效应实现转换，无需高功率泵浦，成本更低，但这种技术的固有的缺陷是相位信息在荧光转换过程中丢失，只能获取物体的振幅信息，无法实现完整的光场成像。

除此之外，无论是生物成像中对细胞细微结构的观测、自动驾驶中对夜间场景的精准识别，还是

材料科学中对材料内部折射率分布的检测，都需要实时、高保真、完整的红外光场成像技术。因此，如何在降低成本的同时，实现视频帧率、高光敏度、高保真的红外复振幅成像，成为困扰该领域多年的核心难题。

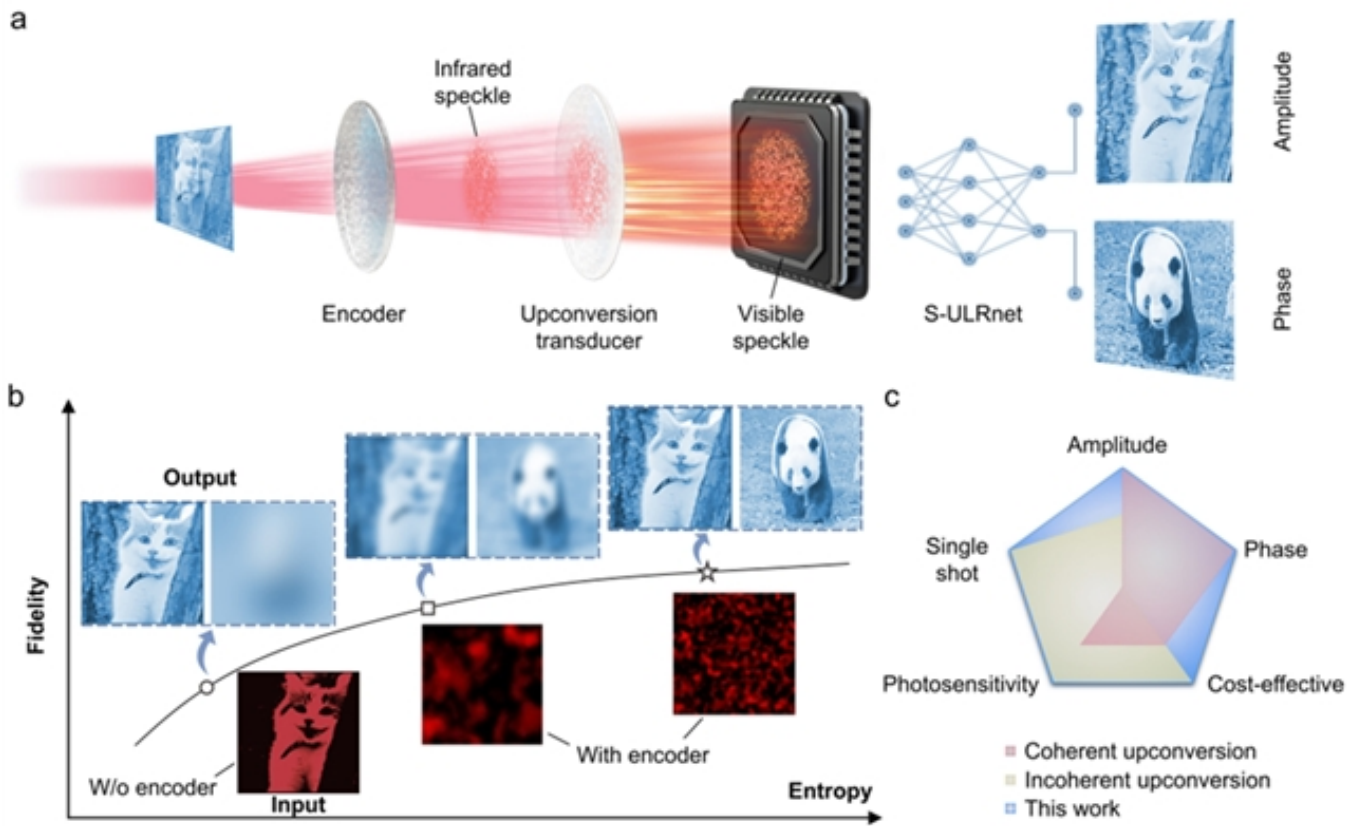


图1 上转换光学熵编码成像技术。

研究亮点

针对传统技术的瓶颈，研究团队突破单一转换的思维范式，提出上转换光学熵编码的创新方案，将光散射信息编码、镧系上转换发光与深度学习相结合，实现了红外复振幅成像的重要突破——无需高功率泵浦、无需多帧测量，仅用单张可见光快照，就能同时还原近红外光场的振幅和相位信息，且成像速率达到视频级（图1）。

团队的关键突破上转换光学熵编码技术——在红外光进入镧系上转换材料前，先让其通过一块具有无序微结构的磨砂玻璃（光学信息编码器）。这块看似普通的毛玻璃会对红外光进行多次散射，将光场的振幅和相位信息隐式编码到散射后的红外散斑中。随后，镧系上转换薄膜将编码后的红外散斑转换为可见光散斑，虽然这个转换过程是非相干的，但由于前期的熵编码处理，相位信息已被锁定在可见光散斑的空间分布中。团队通过调控光学编码器的参数，优化散斑的信息熵，让散斑能够携带更丰富的光场信息。散斑熵越高，携带的振幅和相位信息越完整，成像保真度也越高。

编码后的可见光散斑信息复杂，无法通过传统算法直接解析。为此，团队研发了一种专用的深度学习网络，即散斑上转换光场卷积网络（S-ULRnet），该网络由全连接层和U型卷积神经网络串联组成，能够快速学习可见光散斑与红外复振幅之间的复杂映射关系，训练好的S-ULRnet能实现

光场信息的实时解码。其所需标注样本量合理，推理速度快，单帧解码仅需5毫秒，为视频速率成像提供了核心支撑。更重要的是，该网络具有极强的鲁棒性，能够有效抵抗上转换过程中的噪声干扰，确保成像保真度。

实验结果显示，该成像系统展现出远超传统技术的综合性能：一是成像速率达25帧/秒，达到标准视频速率，单帧曝光时间仅35毫秒，可实现实时成像；二是光探测敏度高，探测功率极限低至 $0.2\text{ nW}/\mu\text{m}^2$ ，比传统参量上转换成像功率阈值低三个数量级，无需高功率红外光源，能耗大幅降低；三是成像保真度高，实现8位灰度级的振幅和相位图像重建，并且适用于不同类型图像（包括Fashion-MNIST数据集、ImageNet数据集图像）（图2）；四是成本低廉，核心探测器为普通硅基相机，无需低温制冷设备，易于规模化推广。进一步对比实验表明，没有光学熵编码时，传统上转换成像仅能还原振幅信息；而加入编码后，系统能同时精准还原振幅和相位信息，且相位还原的平均保真度大幅提升，标准差显著降低。

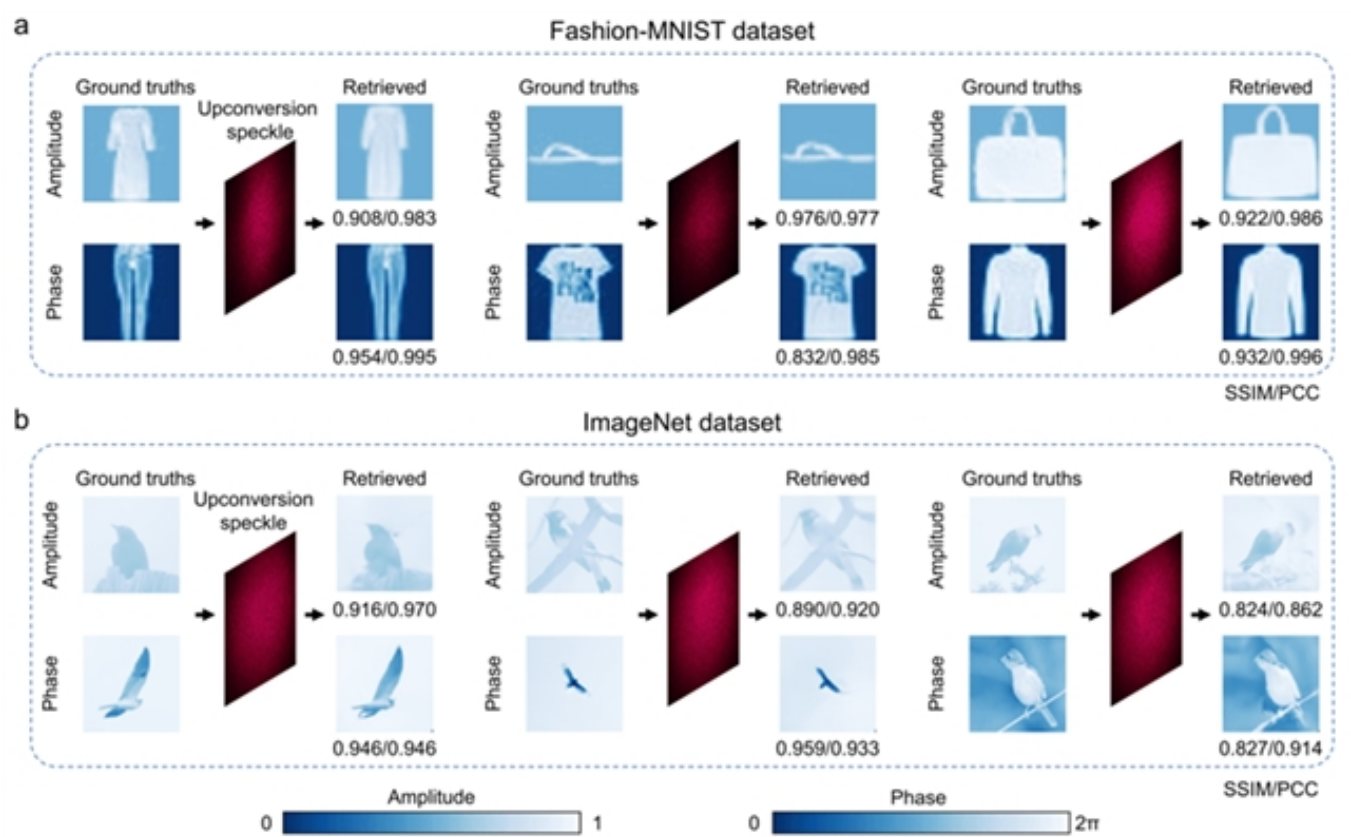


图2 典型的红外幅-相场上转换成像结果。

总结与展望

该研究提出的上转换光学熵编码技术，不仅解决了红外复振幅成像的核心难题，还具有较强的通用性，预期在自动驾驶、生物组织成像、光学数据存储、光谱检测多个领域具有广阔的应用前景。此外，研究团队表示，该成像系统目前主要针对短波红外（1550 nm）波段，未来将进一步拓展应用范围，基于镧系材料的多波段吸收特性，实现多波长红外光的上转换成像，涵盖更广泛的红外波段；同时，将探索进一步缩小设备体积，持续优化算法，进一步提升成像速度和保真度，推动该技术的实用性。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02215-7>

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事宜，请与我们联系。

作者：陈锦辉等 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