抗干扰衍射深度神经网络

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41184.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！

导读

光学衍射神经网络基于光学元件构建，为后摩尔时代提供了一种突破传统电子计算能效瓶颈的全新计算范式，有望成为支撑大规模人工智能模型算力需求的关键技术。然而，现有光学衍射神经网络多局限于执行针对单一目标识别的简单分类任务，难以应对多目标识别复杂场景的实际需求。

鉴于此，近日，北京理工大学光电学院张楠教授和黄玲玲教授联合首都师范大学物理系张岩教授，创新性地提出了一种抗干扰衍射深度神经网络(AI D ^{2} NN)。该架构可在包含类内干扰、类间干扰与动态干扰的多目标场景中，实现精准、鲁棒的目标识别。此外，该系统能够与光学多维复用技术相结合，完成多目标的并行识别任务。

相关成果以Anti-Interference Diffractive Deep Neural Networks for Multi-Object Recognition为题发表于Light: Science Applications。

具身智能是一种通过物理载体与环境交互感知、决策并执行任务的智能系统。目标识别作为具身智能的核心视觉感知能力，为人工智能从数字世界走向物理世界提供了关键的技术支撑。与此同时，人工智能的整体演进也持续推动着目标识别技术向更高水平发展。但现有的目标识别方法通常对计算能力、存储空间和能源消耗有较高的要求，进而限制了它们在资源受限设备上的广泛应用。此外，随着摩尔定律逐渐放缓，传统冯诺依曼架构的算力增长面临瓶颈，传统电子神经网络面临着高能耗与计算延迟的双重挑战，难以满足目标识别对实时性和高效性的需求。

以光学元件为载体构建的光学衍射神经网络具有低功耗和高能效的突出优势，提供了一种颠覆传统电子计算架构的新一代计算范式，有望突破传统电子神经网络的能效局限，尤其在智能视觉、自动驾驶、目标识别等领域具有广泛的应用前景。与传统电子计算不同，光学衍射神经网络计算依托光的传播特性，能够在波长、相位和偏振等多个维度同时进行信息处理，从而极大地提高计算效率和精度，尤其适用于深度学习等计算密集型任务，有望推动计算技术的革命。

然而，现有光学衍射神经网络多局限于执行针对单一目标识别的简单分类任务，难以应对多目标识别复杂场景的实际需求，其技术挑战主要体现在以下两个方面：（1）网络功能局限：现有研究一般针对单一目标识别的简单分类任务，对目标位置、尺寸、形状等条件限制严格，难以有效处理多目标复杂场景任务，灵活性与适应性不足。（2）器件体积制约：目前光学衍射神经网络多依赖空间光调制器等大体积器件搭建，严重制约了其在移动端与嵌入式场景中的应用拓展。

为突破以上瓶颈和挑战，研究团队创新性地提出了一种适用于复杂多目标场景的抗干扰衍射深度神经网络(AI D ^{2} NN)。该架构如图1所示，可在包含类内干扰、类间干扰与动态干扰的多目标场景中，实现精准鲁棒的目标识别。该设计的创新主要围绕以下三个核心维度展开：

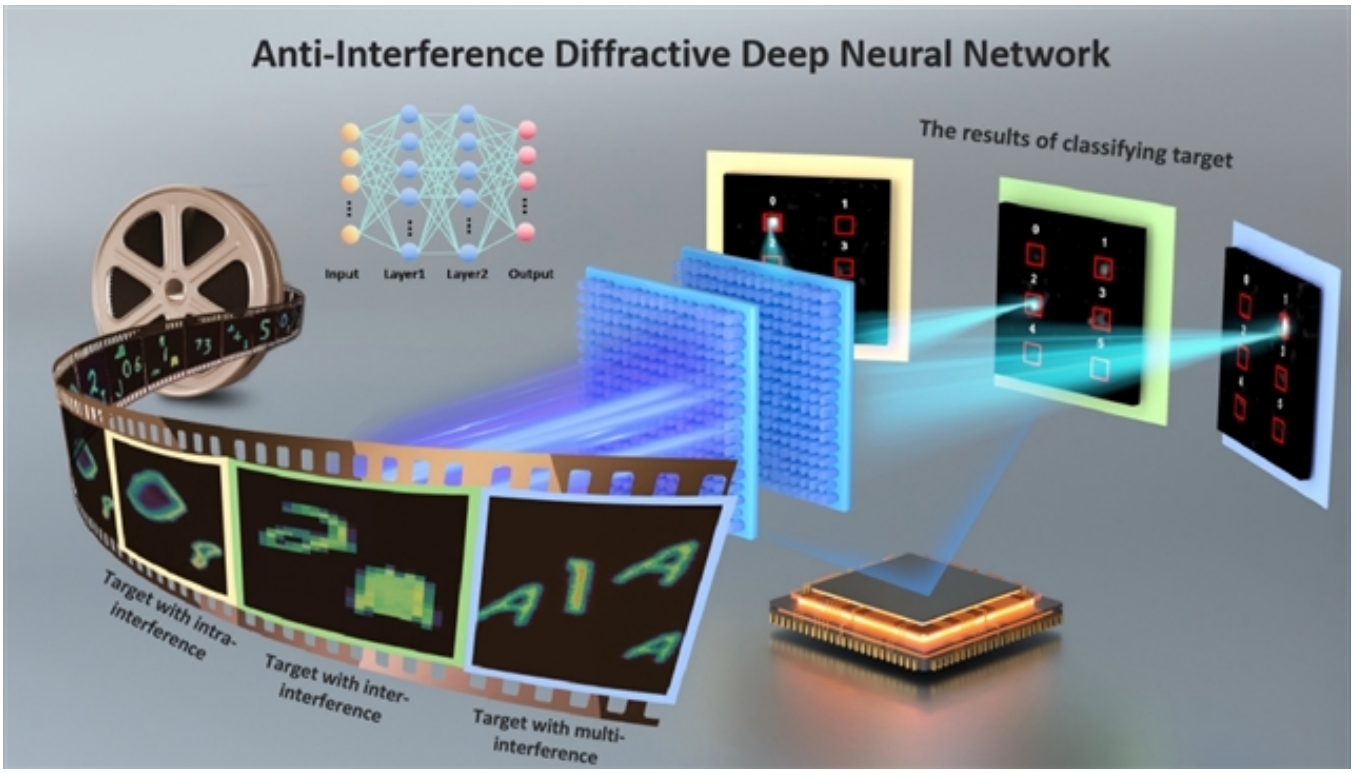


图1：AI D ^{2} NN实现复杂场景下的抗干扰目标识别功能

1. 抗干扰目标识别网络训练算法创新设计

提出面向目标-干扰差异化的深度学习训练策略，并构建双层透射式光学衍射神经网络架构。该网络在训练过程中引导目标区域的光场能量在输出面的预设位置处实现高效聚焦，以空间编码方式表征目标类别；同时对复杂场景中存在的干扰进行抑制与解耦，将其光场能量分散并去结构化为背景噪声，从机制上提升多目标场景下的抗干扰能力与判别稳定性。

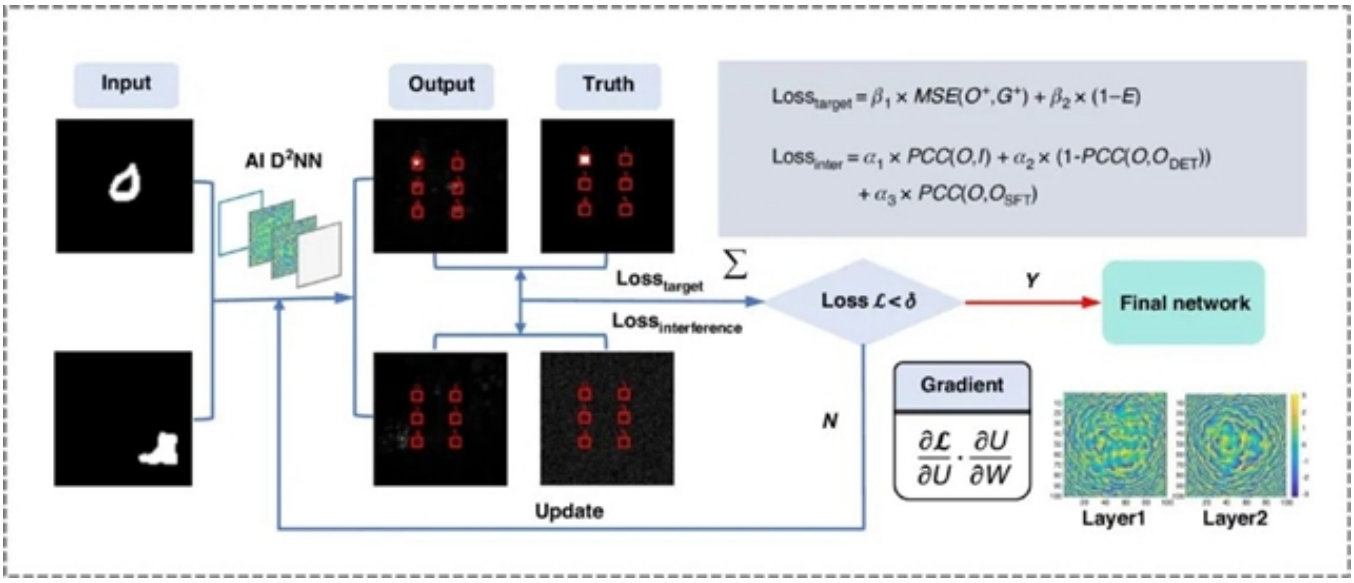


图2：抗干扰目标识别网络训练算法

2. 跨场景、多数据集的高精度多目标识别验证

为验证上述算法的普适性与鲁棒性，将其迁移至多种复杂场景，并在包括手写数字（MNIST）、时尚物品（Fashion-MNIST）及涂鸦图像（Quick, Draw!）在内的多套公开数据集上，完成了典型分类任务的性能验证。结果表明，该网络展现出卓越的泛化能力，不仅能有效抑制类内与类间的静态干扰，更在含有40类干扰物的动态盲测任务中表现稳健。即便在物体位置与形态快速变化的场景下，依然能保持高精度的实时识别能力。

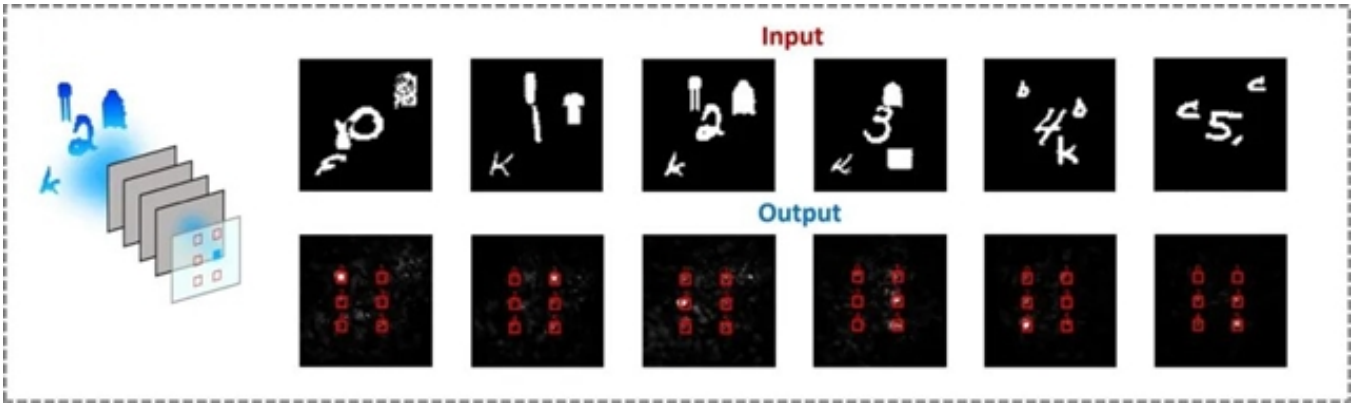


图3. 复杂场景下精准鲁棒的目标识别

3. 跨轻量化器件实现与工作波段可扩展性

在太赫兹波段，研究基于超表面器件完成了原型验证，该计算器件面积仅为1 cm^2，在多物体干扰场景下的手写数字六分类任务中，识别准确率达到87.4%。此外，所提出的超表面设计框架具备良好的波段可迁移性，可扩展至近红外与可见光等波段。在这些波段下，器件尺寸可进一步缩小至亚毫米量级，为面向终端设备的高集成度、低功耗光学智能感知系统提供了可行的技术路径。

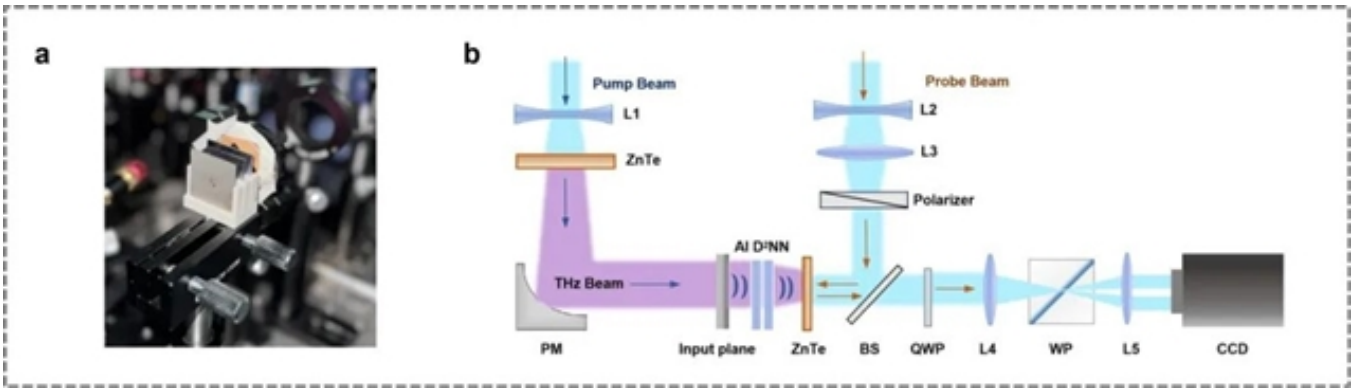


图4：轻量化超表面器件部署与实验

总结与展望

AI D ^{2} NN以全光学的方式在复杂多物体场景中实现了稳定的目标分类，展示出卓越的鲁棒性。然而，这仅是迈向全光智能感知的第一步，未来突破将聚焦于升维与融合两大方向：一方面，通过引入多维度光学编码与光学卷积等空间不变系统，AI D ^{2} NN有望突破动态识别瓶颈，实现对高速多目标的精准跟踪与分类。另一方面，借助其优异的波长可扩展性，该网络可向可见光与近红外波段延伸，从而解锁自动驾驶、生物成像等更广泛的应用场景。同时，结合超表面的轻薄平面化优势，通过与CMOS图像传感器进行协同设计，有望构建出紧凑、高效、可集成的全光智能感知终端。在这些关键技术的共同驱动下，光学衍射神经网络正逐步从实验室原型加速迈向规模化应用，未来将为自动驾驶实时感知、精准医疗影像诊断、智能安防监测等领域提供突破性的技术解决方案。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02188-7

作者：张楠等 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转发