
基于FPGA加速的多模光纤模式分解技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/35110.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FPGA加速的多模光纤模式分解技术。 导读

为满足未来网络对带宽的高需求，基于空分复用为核心的多模光纤通信系统被视为突破单模香农容量极限的关键之一。然而，多模光纤中模式之间的串扰带来的信息失真，一直是提升系统性能的重大挑战。为解决这一难题，德国德累斯顿工业大学Jürgen Czarske教授团队提出一种基于FPGA加速的深度学习模式分解技术（mode decomposition）。该研究利用卷积神经网络（CNN）准确识别并分解多模光纤输出的复杂散斑图（speckle pattern），获得模式振幅与相位信息，并成功将其部署在FPGA平台上，大幅降低了运算复杂度和能耗，突破了传统GPU系统功耗高、实时性差的局限性。

研究团队设计并搭建了一套完整的实验平台，包括空间光调制器（spatial light modulator, SLM）、多轴光纤耦合平台、多模光纤以及高灵敏度红外相机。通过FPGA实时推理，实现了以低功耗（2.4瓦）获得超过100Hz的高效模式分解速度，显著提升了系统的实时性能和可靠性。此外，研究首次采用量化神经网络技术，有效解决了FPGA平台上神经网络部署的挑战，确保了高效能运行。

该研究在光纤通信、医疗内窥镜成像及光纤传感等多个关键领域具有重要的推动意义，特别是在需要高实时性和低功耗的工业和医疗环境中，展现出强大的应用潜力与产业价值。

该成果以FPGA-accelerated mode decomposition for multimode fiber-based communication为题发表于Light: Advanced Manufacturing期刊。德累斯顿工业大学博士生张谦和研究生张月笛为论文的共同第一作者。

研究背景

随着全球数字化进程的全面加速，以人工智能，大数据，高性能运算和云计算为代表的新兴技术不断催生海量数据，对通信网络提出了前所未有的挑战。面对日益增长的通信流量与单模光纤接近容量极限的现状，亟需新的技术路径来突破瓶颈，多模光纤因此成为业内关注的焦点。以空间复用（Space Division Multiplexing, SDM）为核心的多模光纤通信系统被广泛认为是实现下一代超大容量光通信的关键技术路线之一。相比传统单模系统，多模光纤具备在单根光纤中承载多个正交模式（transverse modes）的能力，从而在物理层实现并行数据传输，大幅提升传输效率。

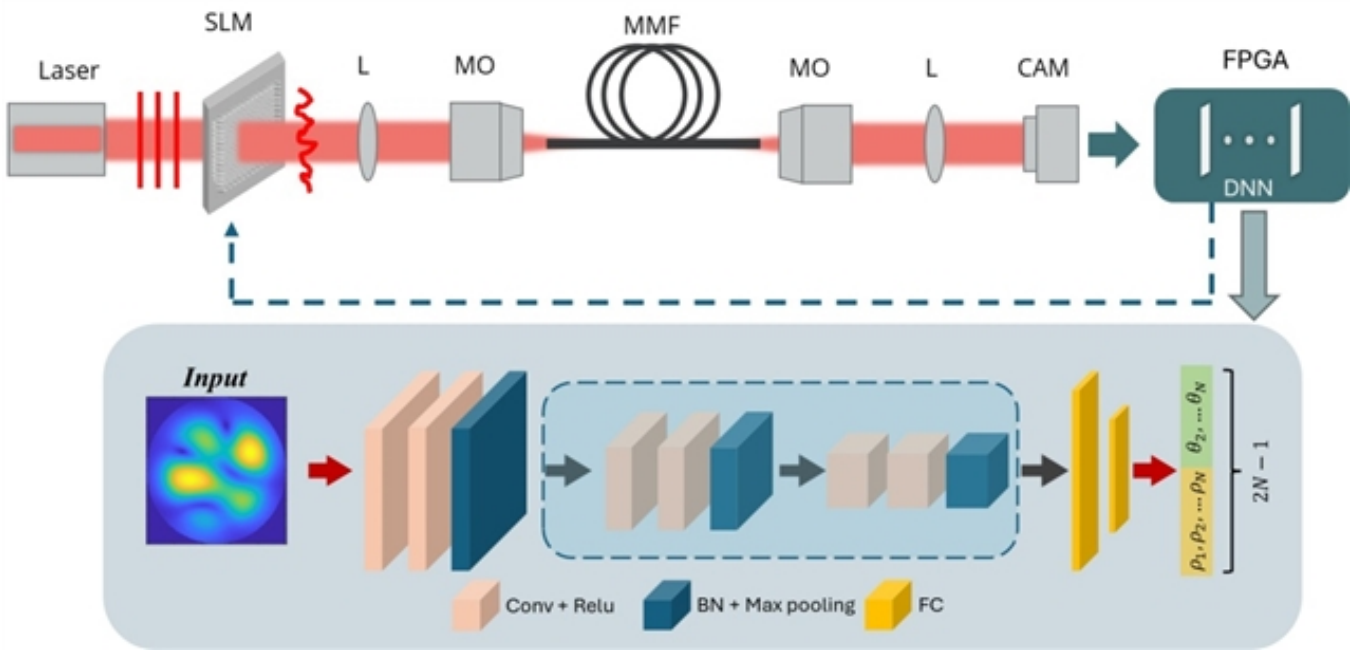
然而，模式串扰导致光纤输出信号形成复杂的散斑图，难以直接解读，传统的数字信号处理（DSP）方法因计算复杂、实时性差，难以应用于高性能通信场景。

目前，基于人工智能的模式分解为解决这一问题提出了新的技术路径。它通过分析光纤输出的散斑图，以非相干测量的方法从纯强度图中准确提取出不同模式的振幅和相位信息。传统深度学习方法尽管有效，但通常依赖于高能耗的GPU平台，不仅成本高，且无法满足工业现场对实时性、低功耗的严格要求。

研究亮点

FPGA赋能通信加速：FPGA（现场可编程门阵列）作为可重构硬件，具有低功耗、低延迟和高度可定制的优势。研究团队将FPGA应用于多模光纤通信的深度学习推理，使神经网络算法可以直接在硬件电路中高速运行。相比GPU方案，FPGA实现不仅降低了系统能耗和延迟，也减少了设备体积和集成难度，更易于在实际光通信系统中部署。这一创新为闭环光纤通信系统的高速实时控制奠定了基础。

深度学习与数据构造：研究人员设计了一种卷积神经网络（CNN）模型，用于从多模光纤输出的强度图片中提取复模式信息。通过大量合成数据进行训练，让模型充分学习多种模式特征。此外，由于仅根据光强图像无法直接获取光场的绝对相位，容易出现整体相位偏移导致的歧义。对此，团队在训练标签上进行了巧妙设计，例如在数据中采用了相对相位，并对某一高阶模式的相位进行了限制，从而避免了共轭光场带来的歧义。通过这样的方法，即使光场的整体相位发生偏移，神经网络仍能给出唯一且正确的模式相位输出，不会被全局相位的变化所干扰。



精简量化与实验验证：研究团队对CNN模型进行了量化压缩，以适配FPGA硬件的定点运算架构。针对各层数据分布选择最佳量化方案，从而大幅减少硬件资源占用且几乎不损失模型精度。在此基础上，团队搭建了包含激光器、空间光调制器（SLM）、多轴光纤耦合平台，多模光纤、高敏感度红外相机和FPGA处理单元的实验平台。其中，空间光调制器产生特定模式组合的光信号并耦合进入多模光纤。光纤中不同模式混合传播后，在输出端形成的光强分布由相机采集并传送给FPGA上的神经网络进行实时解算。实验结果表明，该FPGA系统能够准确分解出多达6路传输模式，推理准确率超过97%，功耗仅约2.4 W，处理帧率超过100 Hz。这意味着相比传统GPU方案，该系统以更低能耗实现了百赫兹级的高速数据处理，为光通信和传感领域实现实时、自适应控制提供了有力支撑。

总结与展望

Jürgen Czarske团队的研究将FPGA技术与深度学习模式分解相结合，为光纤通信提供了实时、高效的解码方案。这种低功耗、高速度的技术方案推动了多模光纤通信系统的部署，并有望在多模光纤通信、医学成像及光纤传感领域发挥重要作用。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.031>

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：张谦等 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