

---

# 让空间模式随“时间演化”：么正变换如何解锁光通信的深度路由？

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40090.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！*

让空间模式随“时间演化”：么正变换如何解锁光通信的深度路由？。深圳大学陈书青教授团队联合淮北师范大学、华南师范大学、湖南师范大学及北京理工大学等研究人员在中国工程院院刊Engineering发表题为Time Evolution of Orbital Angular Momentum Modes for Deep-Routing Multiplexing Channels（基于时间演化的轨道角动量模式复用信道深度路由）的研究性文章。该研究系统性地提出了一种基于轨道角动量（OAM）模式时间演化的新方法，构建了支撑多维正交变换与衍射调控的物理机制。研究围绕么正变换、菲涅耳衍射矩阵与空间模式深度路由等关键技术展开深入探索，旨在解决现有OAM通信中信道路由能力不足、传输不变量限制等核心难题，为未来构建具备复杂光节点交互能力的模式复用通信网络提供系统性理论支撑与技术路径。

光通信网络的演进：复用与路由，为何难以兼得？

光学轨道角动量（OAM）模式复用技术正沿着提升通信容量的路径演进。目前大多数研究集中在信道的复用与解复用上——相当于在信息高速公路上不断增加车道。然而，这种模式忽略了网络中至关重要的一环：信道路由（Channel routing）。

当复用的OAM模式需要在空间和时间域进行重新分配时，传统技术面临着显著的瓶颈。传统光束在传输过程中遵循传播不变量特性，即光束的横向模式结构在自由空间传播时保持相对稳定。这就好比车辆在高速公路上只能直行，无法在复杂的立交桥系统中灵活变道、改变深度与方向。现有的轴向多焦点螺旋调制技术虽然能实现变深度的OAM模式转换，但其应用场景仍受到严格限制。真正的多节点光通信网络，必须实现复用模式在空间位置和传播方向上的高维度正交变换。

时间演化策略：打破光束的传播不变量

要理解这项技术的精妙之处，首先需要了解限制传统光学路由的一个物理枷锁——传播不变量（Propagation invariance）。在自由空间中，携带特定OAM模式的光束一旦被发射，其横向模式结构在飞行过程中会保持相对稳定。这就好比一列在既定轨道上高速行驶的列车，一旦发车，其形态和轨迹就基本固定，只能笔直地开往终点。但在未来多节点的光通信网络中，我们需要这列光子列车能够在传输中途灵活地变道、分流甚至改变目的地，仅靠传统的同轴调控已无法满足空间重新分配的需求。

为了打破这一限制，研究团队创新性地提出了一种基于时间演化（Time evolution）的调控机制。

这里的时间，实际上对应着光束向前传播的动态物理过程。团队并未采用在收发两端进行静态拦截调制的常规操作，而是将一种数学工具——幺正变换（Unitary transformations）深植于光场调控之中。

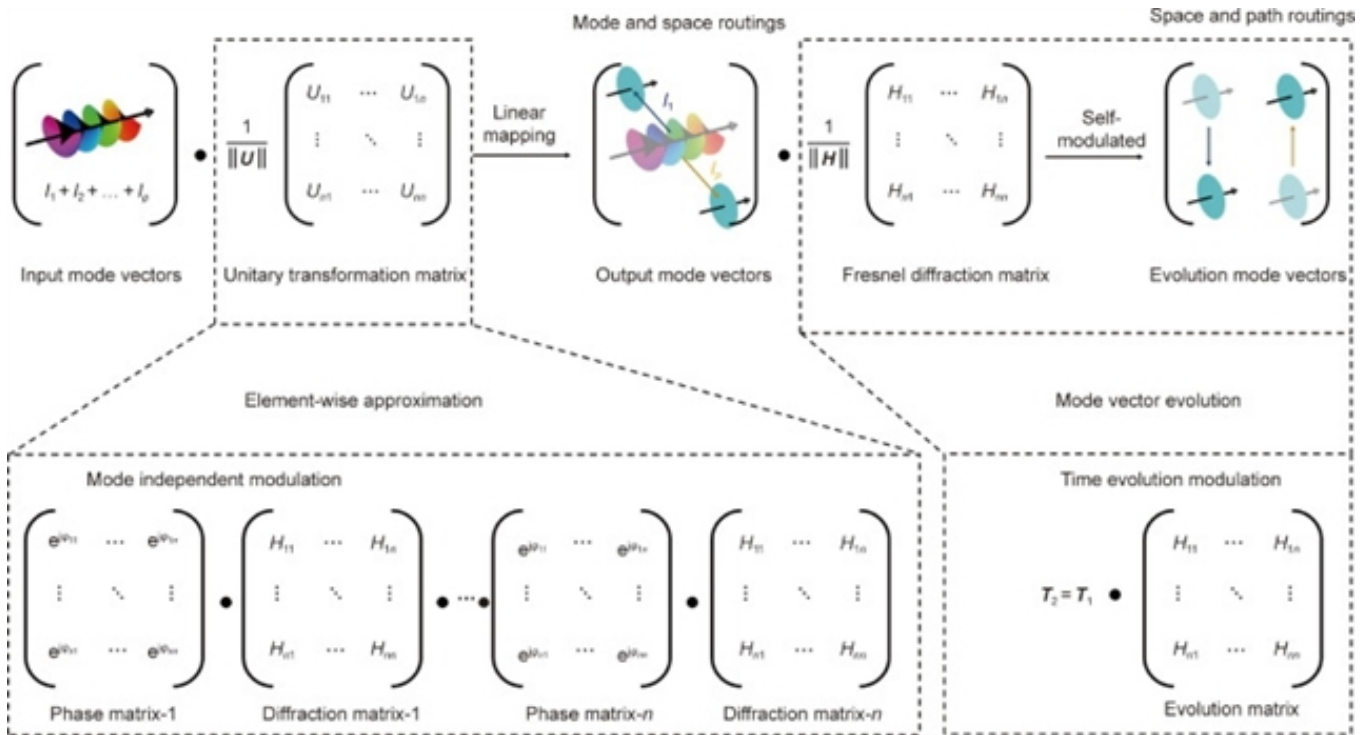


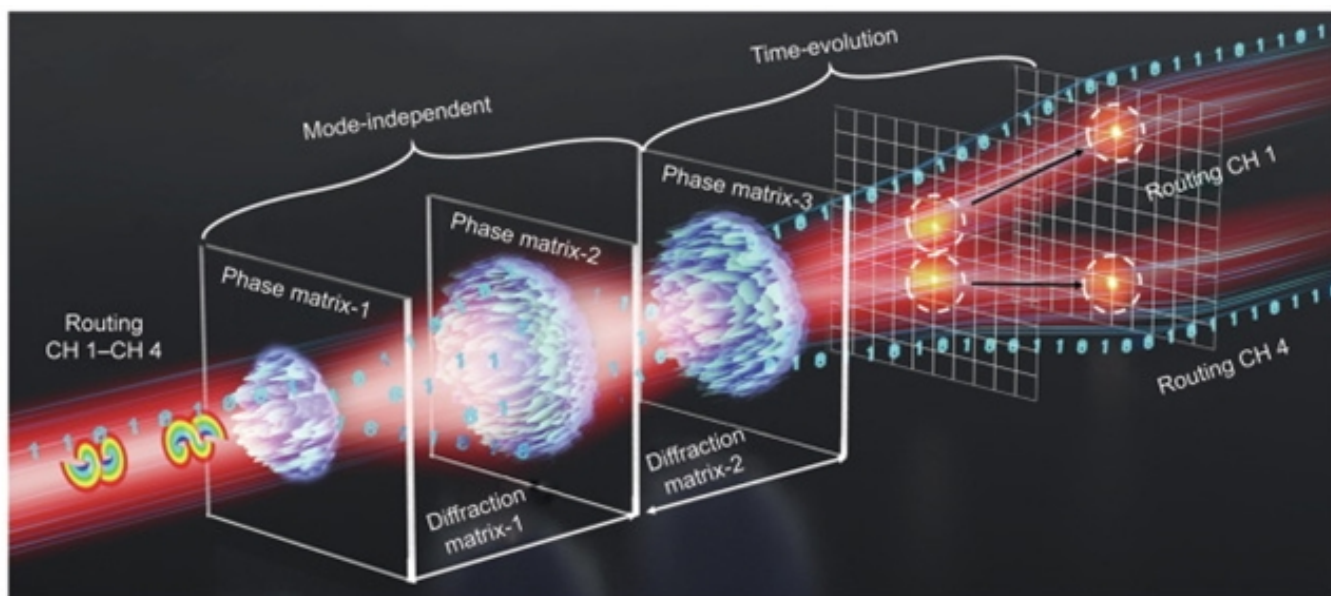
图1.基于模式独立与时间演化调制的OAM模式深度路由机制

具体而言，研究人员将相位矩阵和菲涅耳衍射矩阵作为幺正算符。这相当于在光束的飞行路径上构建了一个连续的波前重塑空间。当携带多路复用信号的OAM光束穿越这些矩阵时，幺正变换中的相位矩阵会对不同模式进行独立响应，并与衍射矩阵协同打破光束的固有传播不变量，确保了各模式信息在路由过程中信息不丢失，并维持了极低的能量串扰。这促成了一种至关重要的模式独立调制。随着传输距离的增加（即时间演化），光束的波前不断演化，不仅传播方向产生偏转，其空间位置也经历了动态的重新分配。这意味着，原本混叠在一起的多路OAM信号，可以在传输路径的特定深度面上被精准剥离、重组，并投递到截然不同的三维空间坐标中。正是这种让光束在飞行中发生高维正交变换的能力，赋予了系统实现深度路由的物理基础。

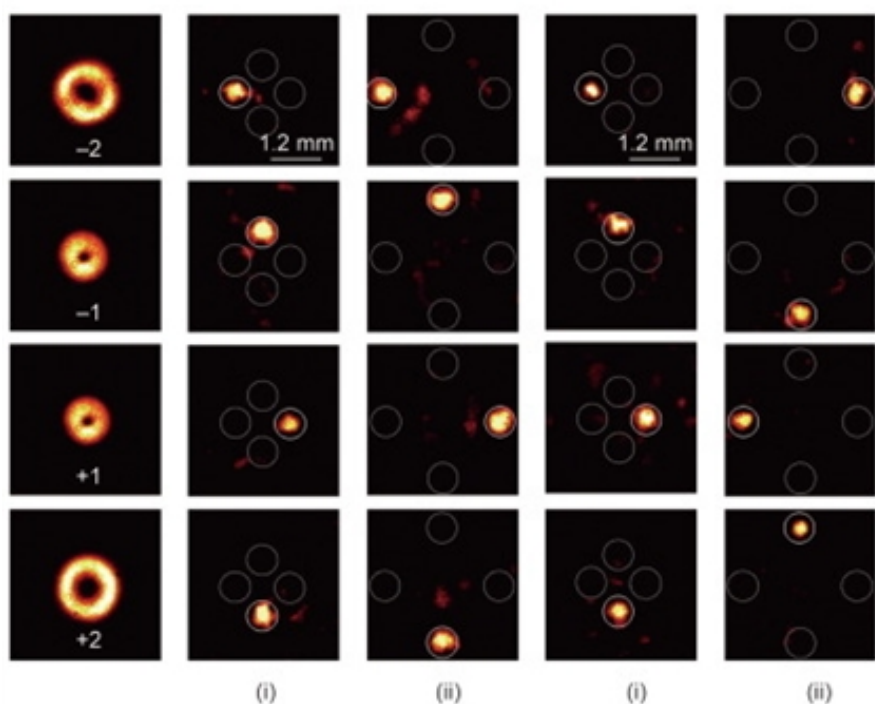
为什么深度路由的OAM比传统解复用更适应未来网络？

光通信网络扩展的核心，在于对海量信息的灵活分发。传统的解复用只是将混合的信号拆解，而深度路由技术则要求信号在拆解的同时，精准地投送到不同的空间节点与时间序列中。

研究团队通过实验验证了这一理念的可行性。利用三层调制矩阵，团队成功对4个复用的OAM模式在2个不同的时间序列（空间深度）上实施了深度路由。实验结果显示，该系统实现了高达78.31%的平均衍射效率。在实际的通信测试中，系统成功对搭载4.69 Tbit · s<sup>-1</sup> 正交相移键控（QPSK）信号的4个复用OAM信道进行了深度路由处理。在整个处理过程中，误码率（BER）稳定保持在10<sup>-4</sup>以下。这组数据表明：通过时间演化实现的深度路由，在保证超高数据吞吐量的同时，维持了极高的信号完整性。



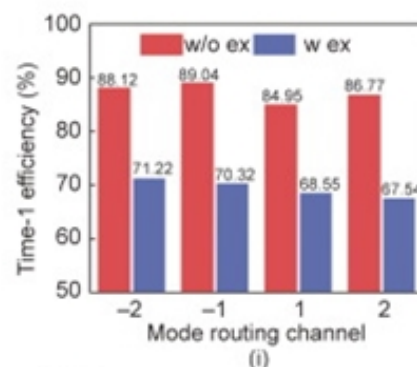
(a)



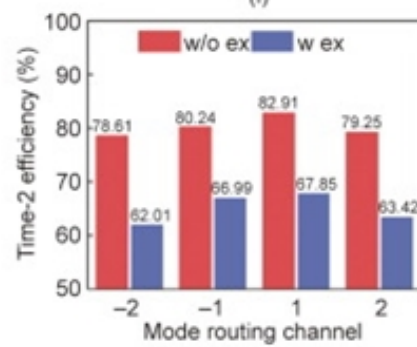
(b)

(c)

(d)



(i)



(ii)

图2.OAM模式复用信道深度路由的示意图及结果

### 从四信道到复杂网络：深度路由的扩展潜力与系统增益

虽然实验已经成功演示了4个OAM复用信道在2个时间序列上的深度路由，但研究团队的探索并未止步于此。这项引入时间演化么正变换的技术，其真正价值在于其对未来复杂光通信网络的惊人扩展能力与系统级增益。

首先是对多自由度 (DoFs) 的深度挖掘。为了探究时间演化策略的极限，团队扩大了路由模式信道的数量和调制的时间序列。数值分析证实，该么正变换能够极其精准地管理两个自由度，系

---

统完全有潜力同时容纳高达10个OAM模式和4个时间序列。此外，团队还验证了该技术对更大阶数OAM模式及不同类型结构光束的路由能力，展现了极强的泛化扩展性。

其次是直击传统光通信设备的痛点。随着终端数量骤增，光通信系统面临复杂的路由需求。这种深度路由策略通过将信号多维度地分发到多个输出深度平面，能够有效缓解接收端的拥堵问题，从而提升光学设备处理更多OAM模式信道的能力。同时，OAM模式在空间上的物理分离，也有助于减少信道间的串扰，进一步提升整体通信质量。

最后是工程实施中的现实考量。研究团队客观地指出，由于当前实验中的三层相位调制架构是基于包含三个反射式空间光调制器（SLM）的多平面光转换系统实现的，因此，时间演化幺正变换的最终性能在很大程度上受到光学组件空间对准精度的影响。这意味着，在未来推向更广泛的系统部署时，光学器件的精密对准与封装将是保障该技术发挥最大潜力的关键工程因素。

## 结果与讨论

本文弥补了传统OAM光束静态、点对点传输的缺点，通过引入幺正变换与时间演化机制，赋予了多路复用光束在传输途中动态变道寻址的能力，成功实现了从一维平面解复用到三维空间深度路由的物理跨越。

实验充分验证了该机制的可靠性。基于三层相位调制架构，系统不仅以超78.31%的衍射效率完成了4个OAM模式在不同空间深度的精准重定向；更在搭载 $4.69 \text{ Tbit} \cdot \text{s}^{-1}$  高速QPSK信号的测试中，保持了低于 $10^{-5}$ 的极低误码率，证明了复杂光场调控并未破坏通信信号的完整性。

面向未来多节点网络，该策略通过在空间上物理隔离不同模式，天然缓解了接收端设备拥堵与信道串扰。尽管当前的反射式调制架构对光学器件的空间对准精度要求极高，但其展现出的多自由度扩展潜力（仿真支持10个OAM模式并行），为下一代大容量、高维度的复杂光网络节点交互构筑了一条极具价值的新路径。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809924005800>

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：陈书青等 来源：《工程》

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