揭示复杂介质中矢量涡旋光束的拓扑不变性

SHUAILING WANG,[1] JINGPING XU[1] 和 YAPING YANG[1,*]南非约翰内斯堡2000，威特沃特斯兰德大学物理学院

摘要：

轨道角动量（OAM）是光的一种拓扑自由度，理论上在连续形变下保持不变；然而，其物理可观测性在复杂介质中会急剧下降，从而造成根本性的“拓扑—可观测性鸿沟”。在此，我们提出一种新的拓扑测量范式，其基础是矢量涡旋光束中偏振与拓扑特征之间的不可分离耦合。通过构建一种基于全局斯托克斯场的拓扑不可分离度量 Ξ_ℓ，并将其与以下方法相结合：物理引导的机器学习校准框架，该框架将贝叶斯高斯过程回归与由 XGBoost 驱动的自适应模型选择相结合，我们实现了对拓扑特征的高保真识别，最高可达 $\ell = \pm 200$。尤为重要的是，即使极端复杂介质（包括强大气湍流、海洋湍流和高温喷气尾流）完全扭曲了光束强度和相位结构，这种鲁棒性仍然得以保持。该方法突破了传统方法所受的双重瓶颈：可获取的轨道角动量模式有限，以及易受扰动影响。我们的工作不仅弥合了拓扑理论与物理可观测性之间的根本鸿沟，也为在真实复杂环境中可靠应用高维轨道角动量建立了稳健框架，有望推动无线光通信、远程拓扑传感以及量子信息协议的经典类比等领域取得令人振奋的进展。

1. 引言 涡旋光束，

携带轨道角动量（OAM）的光场自问世以来便广受关注[1, 2]。这一独特属性推动了多个领域的突破，包括光镊[3-5]、无线光通信 [6-8]，超分辨显微镜[9-11]和遥感[12-14]，从而显著推动了现代光子学的发展。然而，赋予涡旋光束丰富功能的轨道角动量，也使其在复杂传播介质[15-17]中尤其容易发生退化。这种易损性构成了限制涡旋光束在各光学领域进一步广泛应用的主要瓶颈。因此，如何有效抑制或克服复杂传播介质对涡旋光束的不利影响，长期以来一直是该领域亟待解决的重大挑战[18]。

近期的研究进展揭示了一种颇具前景的范式转变：矢量涡旋光束对信道引起的畸变表现出显著的韧性。关键的是，即使严重的湍流或散射彻底扰乱了光束的空间强度和相位分布，矢量场内在的偏振非均匀性仍能得到显著保留——前提是采用合适的测量框架[19-21]。具体而言，不再固守原有的模式基，而是通过斯托克斯偏振测量构建适配信道的分析基，矢量涡旋光束的鲁棒性便显现出来：它并非源于形态稳定性，而是源于其偏振纹理的不变性[19]。这一发现重新界定了问题：我们无需试图抑制扰动，而可以主动利用扰动——灵活调整探测基以匹配受扰信道，从而高效解码信息。这一概念上的转变不仅加深了我们对

涡旋光束在复杂介质中传播的认识，也为提升涡旋光束在现实环境中的实用性开辟了切实可行的新途径。

拓扑学是一门研究在连续形变下保持不变的性质的数学分支。它揭示，即使一个物体经历剧烈的几何畸变、外观发生显著变化，其内在的拓扑本质依然不变。这为理解涡旋光束的轨道角动量提供了深刻的视角：不同阶数的涡旋光束所携带的轨道角动量可视为一种拓扑特征。这一拓扑特征赋予涡旋光束内在的稳定性，意味着至少在理论上，可以设计一种测量方案，通过其拓扑特征有效地区分和识别涡旋光束，即使其波前持续发生畸变。然而，大量研究表明，在大气湍流或海洋湍流等复杂介质中，涡旋光束的轨道角动量谱往往会出现显著的弥散[22, 23]。这会导致接收端对原始拓扑特征的误判[24]，接收概率降低[25, 26]，拓扑特征之间的串扰增强[8, 27, 28]。这表明，尽管拓扑特征本身是数学不变量，但基于标量模式投影的传统测量方法极易受到信道扰动的影响，从而造成“拓扑—可观测性鸿沟”。

为解决这一矛盾，我们提出一种新颖的拓扑特征测量框架。我们的方法不依赖固定的空间模式基，而是利用矢量涡旋光束中偏振与轨道角动量自由度之间的不可分离关联。通过整合全局偏振描述符，我们构建了一种对信道扰动不敏感的拓扑指纹。由于涡旋光束中拓扑特征具有内在不变性，即使光束的空间形态严重畸变，仍可通过这一适配准则准确提取其底层拓扑特征信息。因此，我们的方法实现了对拓扑特征的稳健保持。它不仅在数学上尊重拓扑特征，而且在物理测量层面确保抗干扰能力。这一创新框架不仅重新诠释了涡旋光束在扰动环境中的拓扑稳定性，还为高可靠轨道角动量复用通信、抗扰动光学传感以及精密传感应用提供了兼具理论深度与实用价值的工具。

2. 借助不可分离关联弥合拓扑—可观测性鸿沟

轨道角动量（OAM）作为涡旋光束的一种内禀拓扑自由度，凭借其高维正交模式空间，具有巨大的信息承载能力潜力 [29]。然而，自其发现以来的三十年间，一个根本性的瓶颈始终阻碍着它的实际应用：尽管从数学意义上说，拓扑特征 ℓ 在连续形变下严格不变，但它在复杂介质中的物理可观测性却极其脆弱。这种脆弱性源于两个相互耦合的物理瓶颈。首先，高阶涡旋光束的横向尺度随 $|\ell|$ 增大，导致其在有限孔径系统中遭受严重截断。其次，复杂介质中的随机折射率起伏会破坏螺旋相位结构，引起轨道角动量模式的非局域谱扩散，使接收端难以可靠识别高阶拓扑特征。通过定制光场调制和高精度轨道角动量检测算法，我们解决了光束扩展与孔径限制之间的矛盾 [30]。因此，我们成功将自由空间中可稳定使用的拓扑特征最高阶数从 20 提升至 100。

然而，实际传输环境并非总是自由空间；无线光链路必须应对大气湍流、海洋湍流和喷气发动机湍流等典型复杂介质。湍流引起的相位随机化会严重降低涡旋光束的性能 [31-34]。如图1所示，传统算法能够以 100% 的保真度可靠地识别自由空间中涡旋光束的拓扑特征。

然而，湍流的引入会导致显著的解码错误，且这种性能下降会随着湍流强度的增加而明显加剧（即单位质量流体的动能耗散 降低）。在弱湍流条件下（ ），系统的错误率相对较低，能够支持可靠的轨道角动量信息传输。然而，在强湍流条件下（ ），湍流涡旋会严重扭曲涡旋光束的螺旋相位结构，引发显著的模式串扰，使检测到的拓扑特征严重畸变且不断波动，因而无法可靠地用于信息编码或解码。这种脆弱性源于传统轨道角动量测量的标量性质：信息完全依赖于空间相位结构，而这些结构在复杂介质中缺乏抵御扰动的拓扑保护。这揭示了一个深刻的悖论：拓扑荷在数学上的不变性，并不必然保证其在物理上的可观测性。这种“拓扑—可观测性鸿沟”不仅是一个技术瓶颈，更是连接抽象拓扑理论与实际信息传输的根本障碍，严重制约着轨道角动量技术从受控实验室迈向动态、不可预测的现实环境。

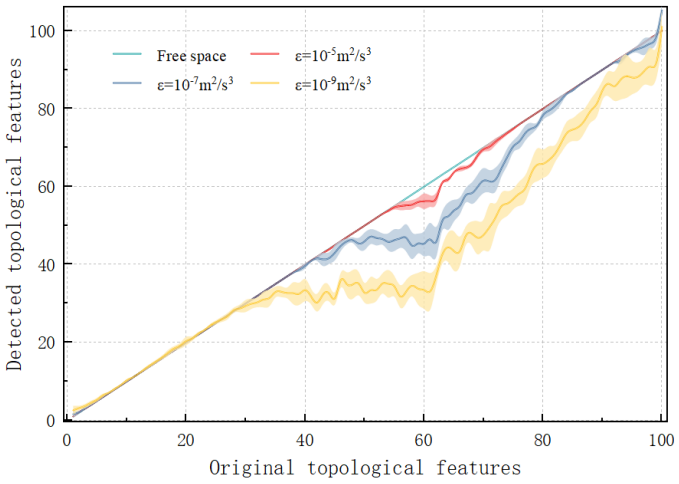


图1。 在不同。实线表示检测结果的平均值，阴影区域表示相应的标准差。

为弥合这一瓶颈——拓扑—可观测性鸿沟，我们借助基于不可分离自由度的拓扑可观测性原理。这种方法的核心在于偏振与拓扑特征之间的不可分离关联。因此，我们首先构造如下形式的矢量涡旋光束：

$$|\Psi\rangle = |e_1\rangle|o_1\rangle + |e_2\rangle|o_2\rangle \tag{1}$$

此处，偏振自由度由一对正交基矢表示和，而拓扑特征自由度则由正交基模 和表示，它们对应不同的轨道角动量态。至关重要的是，这两个子空间并非彼此独立：每个空间点处的偏振态都与其拓扑特征密不可分，形成一种不可分离的复合结构。这种不可分离性使拓扑特征从孤立的相位奇点延伸至一个

嵌入矢量拓扑复合体中的实体。在这一框架下，物理
可观测量由偏振与相位之间的全局几何关联决定，而非依赖局部强度分布或相位梯度。在这一框架下，矢量涡旋光束可被严格描述为复合希尔伯特空间中的不可分离经典态。其自由度之间的强关联结构

$\mathcal{H}_{\text{偏振-轨道角动量}} \neq \mathcal{H}_{\text{偏振}} \otimes \mathcal{H}_{\text{轨道角动量}}$

在数学上与量子纠缠态同构，因此具有后者对局域扰动的
鲁棒性。正是这种由结构内禀对称性保护的关联，为在复杂介质中实现拓扑信息的可观测不变性提供了物理基础。

当光束在满足单边幺正性的复杂介质中传播时，尽管各偏振分量携带的轨道角动量模式会弥散至高维希尔伯特空间，但由于通道的幺正对称性，它们的相对几何相位结构和模态正交性得以保持。这种内禀不变性意味着存在一个可观测的全局序参量，能够定量表征偏振与拓扑自由度之间不可分离关联的强度。受量子信息理论中并发度度量的启发，我们构建了一种拓扑不可分离性度量，用于量化该矢量涡旋光束中跨自由度关联的拓扑鲁棒性：

$$\Xi_{\ell} = \sqrt{\frac{\left(S_0 - S_1\right)^2 + S_2^2 + S_3^2}{\left(S_0 + S_1\right)^2}} \tag{2}$$

拓扑不可分性取决于全局斯托克斯场，可理解为庞加莱球上偏振分布相对于赤道平面（线偏振）的加权偏离。至关重要的是，其数值嵌入了轨道角动量阶数所独有的拓扑特征。 得益于其在单侧扰动下的严格不变性，该度量构成一种信道鲁棒拓扑特征，从而仅通过偏振分辨强度成像即可实现高维轨道角动量态的无相位、抗干扰读出。 图2直观地阐释了这一原理：即使光束波前被强湍流严重畸变，拓扑不可分性仍保留其独特指纹，并与ℓ一一对应，从而支持高度鲁棒的拓扑识别。 然而，图2也揭示了一个关键挑战：拓扑不可分性与ℓ之间的映射高度非线性，测量值从低阶到高阶拓扑特征跨越数百个数量级。在此条件下，直接由原始观测量进行反演在实践中变得不可行；微小的测量噪声或系统偏差即可触发错误的整数拓扑特征，ℓ尤其是在高阶情形下，这种敏感性最为显著。

ℓ

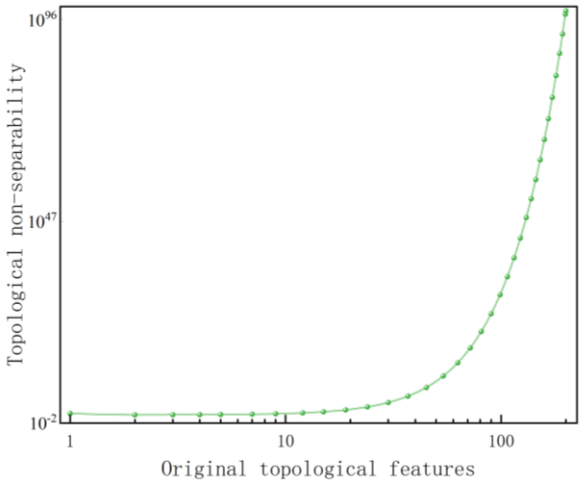


图 2. 拓扑不可分性随原始拓扑特征的变化。

3. 通过物理引导学习，从非线性可观测量到线性编码

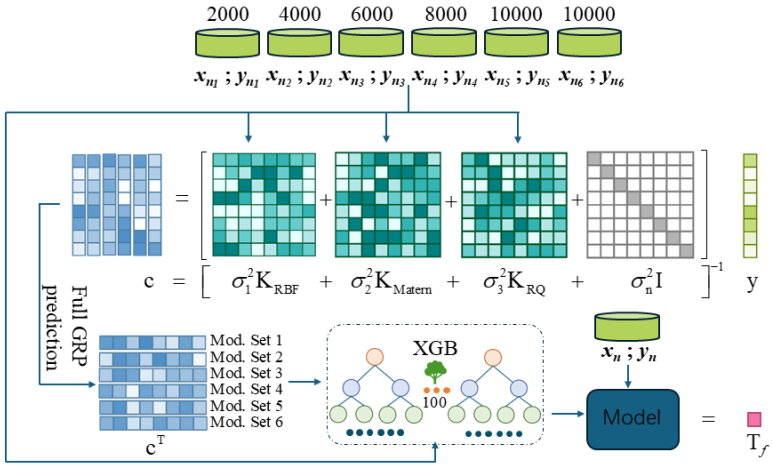


图 3. 拓扑指纹校准的两阶段框架。利用物理引导核训练六个高斯过程回归模型（五个分区模型和一个全局模型）。XGBoost 分类器根据特征为每个输入选择最优模型，从而实现从拓扑不可分性到拓扑指纹的高保真度映射。

T_f

为实现高阶拓扑特征的线性可分辨编码，我们构建了一个物理引导的拓扑特征校准映射模型，将高度非线性的拓扑不可分性精确转换为整数拓扑指纹。作为 T_f 如图 3 所示，我们提出了一种两阶段混合建模框架，将贝叶斯高斯过程回归（高斯过程回归）与由 XGBoost 驱动的自适应模型选择相结合。首先，基于矢量涡旋光束理论，我们生成了 100,000 个数据样本，覆盖广泛的参数空间，包括不同的环厚度、环半径和拓扑特征。为构建具有互补特性的专家模型集，我们建立了六组模型，其训练样本量分别为 2000、4000、6000、8000、10,000 和 10,000。每个数据集均随机划分为训练集（80%）和测试集（20%）。对于前五组模型，我们采用

分区训练策略，在每个子域内构建独立的高斯过程回归模型，由分区节点划定；对于第六个模型集合，则在整个数据集上训练单个全局模型。在每个模型集合的训练过程中，我们构建了受物理启发的复合核函数，包括径向基函数（RBF）核、Matérn 核、有理二次（RQ）核和白噪声核。为缓解局部最优问题，每个模型在训练期间进行五次随机重启，并选择测试样本中绝对误差低于 0.001 的比例最高的模型，作为该子域的最优代表模型。

在第二阶段，为了在六个候选专家模型中实现样本级自适应最优选择，我们构建了一个 XGBoost 分类器。该分类器通过学习从特征向量（包括原始物理参数、全部六个专家模型的预测结果以及 GPR 不确定性指标）到性能最佳模型索引的非线性映射，动态识别每个输入对应的最优专家模型。通过监督学习，XGBoost 模型学习从特征空间到最优模型索引的非线性映射，从而能够针对不同输入样本进行自适应模型选择。最终，该框架成功实现了从高度非线性、跨度近 100 个数量级的拓扑不可分性到拓扑指纹的高保真、稳健映射。这为在复杂介质中可靠读取高维轨道角动量信息编码提供了一种可扩展的物理学与机器学习协同解决方案。

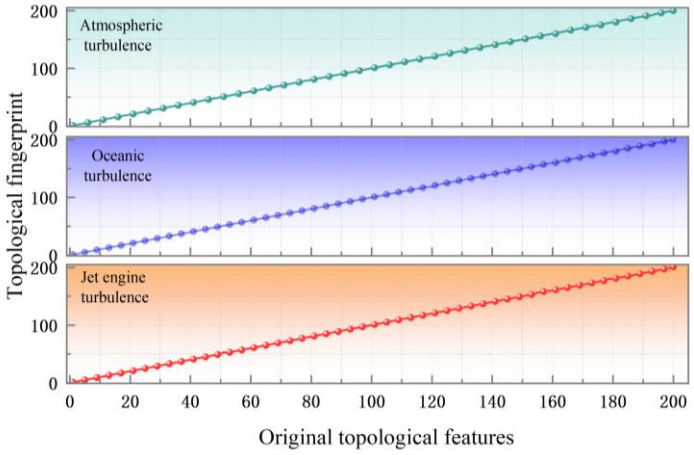


图 4. 极端复杂介质中拓扑不可分性测量范式的普适稳健性验证。

如图 4 所示，我们系统地验证了该框架在三类具有代表性的极端复杂介质中的普适稳健性：强大气湍流（）、动态海洋湍流（双扩散盐度—温度不稳定性），以及高

-温度喷气发动机排气羽流（不同入射模式下的非均匀热扰动）。结果表明，基于拓扑不可分性的矢量涡旋光束测量范式，在这些显著不同的复杂介质中均实现了高度一致的拓扑特征识别。在所有测试场景下，拓扑特征识别准确率稳定保持在95%以上。该性能显著优于基于标量模式投影的传统标量拓扑特征检测方案，将涡旋光束拓扑特征的可用范围从传统极限的 至。值得注意的是，即使光束的强度分布被复杂介质诱导的扰动完全扭曲，且相位奇点结构变得完全无法辨识，其拓扑

指纹依然极为稳定，其所嵌入的拓扑特征仍清晰可辨。这一现象揭示了测量范式的根本转变：信息已从“形态”转移到“关联”。 这些发现证实，我们所提出的框架成功解决了困扰传统涡旋光束的两个相互耦合的物理瓶颈——有限孔径截断与湍流诱导的模式扩散。我们的方法不仅使拓扑特征高达200的高阶涡旋光束得以有效利用，更关键的是，确保涡旋光束所携带的轨道角动量信息即使在极端扰动条件下，也能在接收端以高保真度和抗干扰能力被可靠读出。本工作为高阶轨道角动量信息传输在真实复杂环境中的实际部署奠定了坚实的物理基础与技术路径。

4. 结论

我们提出了一种高度稳健的拓扑特征测量框架，解决了长期存在的“拓扑—可观测性鸿沟”这一难题——它是阻碍轨道角动量在真实复杂环境中实际应用的根本瓶颈。我们的关键突破在于重新定义了问题：我们不再试图在扰动下保持光束形态，而是利用矢量涡旋光束中偏振与拓扑特征之间内在的不可分关联，提取其固有的拓扑不变性。基于这一原理，我们提出了一种以“拓扑指纹”为核心的新型测量范式。即使复杂介质严重扭曲光束的强度和相位分布，所得的拓扑不可分性度量仍表现出非凡的稳定性。为应对原始可观测拓扑不可分性与拓扑特征之间高度非线性映射所带来的分析挑战，我们开发了一种物理引导的机器学习框架。通过

将贝叶斯高斯过程回归与 XGBoost 驱动的自适应模型选择机制相结合，该框架成功地将跨越数百个数量级动态范围的拓扑不可分性映射到可线性分辨的拓扑指纹空间中。因此，我们实现了在极端扰动环境下对涡旋光束拓扑特征的高保真识别，这些环境包括强大气湍流、海洋湍流和喷气发动机湍流。这一范式转变带来了两项关键突破：第一，它解决了孔径诱导的截断瓶颈，将可可靠识别的拓扑特征范围从传统极限显著扩展至$\ell \approx 20$ $\ell \approx 200$。第二，它克服了湍流诱导的模式扩散，使涡旋光束的拓扑特征几乎不受其在复杂介质中传播的影响。我们的工作为在光子信息系统中实际利用高维拓扑自由度建立了一个通用框架，标志着拓扑光子学从理想化实验室条件迈向真实复杂场景的关键一步。这为抗扰动光通信、遥感以及量子信息协议的经典类比开辟了新的途径。

资助。 国家自然科学基金（12174288、12274326、12174243、61905186）；国家重点研发计划（2021YFA1400602）；上海航天科技创新基金（SAST-2022-069）；中央高校基本科研业务费（ZYTS23078）。

利益披露。 作者声明不存在利益冲突。

数据可用性。 本文所呈现结果的数据目前尚未公开，但 m ay 可在提出合理请求后向作者索取。

参考文献

[1] L Allen, M W Beijersbergen, R J Spreeuw, et al. 光的轨道角动量及拉盖尔-高斯激光模式的变换. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.[2] S M Barnett, L Allen. 轨道角动量与非傍轴光束. Optics Communications, 1994, 110: 670-678.[3] M P MacDonald, L Paterson, K Volke-Sepulveda, et al. 三维光学捕获结构的创建与操纵. Science, 2002, 296(5570): 1101-1103.[4] V Garces-Chavez, D McGloin, H Melville, et al. 利用自重构光束同时进行多平面显微操纵. Nature, 2002, 419(6903): 145-147.[5] X Z Li, H X Ma, H Zhang, et al. 能否通过单束光扩大光镊的捕获范围？Applied Physics Letters, 2019, 114(8).[6] H Chang, P Xu, H Yao, et al. 基于轨道角动量的无线光通信无探针自适应补偿. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(8): 9033-9043.[7] J Wang, J-Y Yang, I M Fazal, et al. 利用轨道角动量复用实现太比特级自由空间数据传输. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496.[8] J Liu, J Zhang, J Liu, et al. 1 Pbps 轨道角动量光纤传输. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 202.[9] F O Fahrbach, P Simon, A Rohrbach. 利用自重构光束进行显微成像. Nature Photonics, 2010, 4(11): 780-785.[10] L Gao, L Shao, B C Chen, et al. 利用贝塞尔光束平面照明显微术对细胞动力学进行三维活体荧光成像. Nature Protocols, 2014, 9(5): 1083-1101.[11] T Vettenburg, H I Dalgarno, J Nylk, et al. 利用艾里光束进行光片显微术. Nature Methods, 2014, 11(5): 541-544.[12] Z Chen, U Daly, A Boldin, et al. 利用结构光进行气象传感. Communications Physics, 2025, 8(1): 105.[13] R Yali, W Yufeng, S Zeping, et al. 基于涡旋光束的气溶胶粒径分布反演方法研究. Optics Express, 2024, 32(26): 47515-47531.[14] S Wang, Z Zhao, M Cheng, et al. 基于结构光自愈合特性的障碍物反演. Sci Rep, 2025, 15(1): 24379.[15] A E Willner, H Huang, Y Yan, et al. 利用轨道角动量光束进行光通信. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 66-106.[16] A E Willner, K Pang, H Song, et al. 用于通信的光轨道角动量. Applied Physics Reviews, 2021, 8(4): 041312.[17] M Cheng, W Jiang, L Guo, et al. 扭转中的计量学：利用涡旋光进行探测与传感. Light: Science & Applications, 2025, 14(1): 4.[18] C Peters, V Cocotos, A Forbes. 大气湍流中的结构光——数字实现指南：教程. Advances in Optics and Photonics, 2025, 17(1).[19] I Nape, K Singh, A Klug, et al. 揭示矢量结构光在复杂介质中的不变性. Nature Photonics, 2022, 16(7): 538-546.[20] C Peters, M Cox, A Drozdov, et al. 矢量光在真实自由空间链路中的不变性与畸变. Applied P hysics Letters, 2023, 123(2): 021103.[21] K Singh, I Nape, W T Buono, et al. 利用矢量光实现多比特光通信的稳健基底. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(6): 2200844.[22] J Zeng, X Liu, C Zhao, et al. 拉盖尔-高斯光束沿水平路径在各向异性非柯尔莫哥洛夫湍流大气中传播时的螺旋谱. Optics Express, 2019, 27(18): 25342-25356.[23] J Ou, Y S Jiang, J H Zhang, et al. 贝塞尔-高斯光束在非柯尔莫哥洛夫湍流中的螺旋谱扩展. Optics Communications, 2014, 318(1): 95-99.[24] J Hu, Z Guo, J Shi, et al. 基于超表面的全彩圆形自聚焦艾里光束发射器，用于稳定高速水下无线光通信. Nature Communications, 2024, 15(1): 2944.[25] H Yang, Q Yan, Y Zhang, et al. 完美光学涡旋在吸收性及弱湍流海水链路中的接收概率. Applied Optics, 2021, 60(35): 10772-10779.[26] Y Yuan, D Liu, Z Zhou, et al. 柯尔莫哥洛夫和非柯尔莫哥洛夫湍流中拉盖尔-高斯光束轨道角动量概率的优化. Optics Express, 2018, 26(17): 21861-21871.[27] L Gong, Q Zhao, H Zhang, et al. 强散射条件下的光学轨道角动量复用数据传输. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 27.[28] Y Xu, Y Zhu, Y Zhang. 海洋大气湍流中贝塞尔-高斯光束带宽受限轨道角动量模式的串扰概率. Optics Communications, 2018, 427: 493-496.[29] A Forbes, L Mkhumbuza, L Feng. 轨道角动量激光. Nature Reviews Physics, 2024, 6(6): 352-364.[30] S Wang, J Wang, Y Yang, et al. 利用完美涡旋光束实现稳健的可见光通信. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(16): 7572-7579.[31] D G Pires, D Tsvetkov, H Barati Sedeh, et al. 光学纽结在大气湍流中的稳定性. Nature Communications, 2025, 16(1): 3001.[32] H Zhan, L Wang, W Wang. 基于生成对抗网络的海洋湍流涡旋光束自适应光学方案. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(13): 4129-4135.

[33] C B Hogge、W L Visinsky。喷气尾流湍流的激光束探测。《应用光学》，1971年，10(4)：889-892。[34] M Bayraktar、B Akın、M B Işık。双曲正弦高斯光束在喷气发动机诱导湍流中的传播。《光学与量子电子学》，2022年，54(8)：516。