

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250021.

专题:海洋通信与传感网络

戴炜杰,苏晓凤,刘晓谦,等. OAM模式增广的自由空间光通信[J]. 光通信研究, 2025(4): 250021.

Dai W J, Su X F, Liu X Q, et al. Free-space Optical Communication based on Augmentation of OAM Modes [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250021.

## OAM 模式增广的自由空间光通信(特邀)

戴炜杰<sup>1</sup>,苏晓凤<sup>2</sup>,刘晓谦<sup>1</sup>,张立妍<sup>1</sup>,卫天阔<sup>1</sup>,宋健<sup>1,2</sup>,董宇涵<sup>1</sup>

(1. 清华大学深圳国际研究生院,广东 深圳 518055; 2. 清华大学电子工程系,北京 100084)

**摘要:**【目的】大气和海洋湍流会导致光学轨道角动量(OAM)的模式扩散,是造成 OAM 自由空间光通信(FSOC)系统性能恶化的主要因素之一。抑制湍流效应是 OAM-FSOC 领域研究人员长期以来追求的目标。【方法】在基于 OAM 模式的大容量光无线通信背景下,湍流导致 OAM 谱发生对称扩散,传统的湍流抑制方案需要复杂的波前感知和合并方案。而部分相干光场中扭曲相位和涡旋相位的共存会导致 OAM 谱具有非对称的扩散行为,为抑制湍流提供了新的切入点。文章强调了这种非对称 OAM 谱启发的信息传输范式转变,旨在利用扭曲因子造成的可控 OAM 非对称性扩散进行模式增广,并基于此制定新的发射端模式编码与接收端模式合并方案。【结果】文章所提方案给 OAM-FSOC 系统的平均容量、聚合容量和误码率(BER)方面的性能带来了显著提升。数值结果显示了与理论预测一致的显著性能提升,包括湍流信道中的实际容量、容量上限、可用链路距离以及抑制湍流的能力。【结论】文章所提方案不仅是扭曲部分相干光场在 OAM-FSOC 系统中的应用,也是对 OAM 谱的可控非对称扩散这一物理事实的利用。文章展示了以扭曲相位部分相干光场调控为例的光波物理前沿理论在下一代光无线通信中的重要应用潜力。

**关键词:**轨道角动量;扭曲相位;部分相干光场;自由空间光通信

中图分类号:TN929

文献标志码:A

### Free-space Optical Communication based on Augmentation of OAM Modes

DAI Weijie<sup>1</sup>, SU Xiaofeng<sup>2</sup>, LIU Xiaoqian<sup>1</sup>, ZHANG Liyan<sup>1</sup>, WEI Tiankuo<sup>1</sup>, SONG Jian<sup>1,2</sup>, DONG Yuhan<sup>1</sup>

(1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** 【Objective】 Atmospheric and oceanic turbulence causes the mode fading of optical Orbital Angular Momentum (OAM), thus being one of the main factors that deteriorate the performance of OAM-based Free-Space Optical Communications (FSOC) systems. Anti-turbulence effect has long been a pursuit of researchers in the field of OAM-FSOC. 【Methods】 In the context of high-capacity optical wireless communication based on the OAM mode, turbulence causes symmetric diffusion of the OAM spectrum. Traditional turbulence mitigation schemes require complex wavefront sensing and combining solutions. However, in a partially coherent light field, the coexistence of twisted phase and vortex phase leads to an asymmetric diffusion behavior of the OAM spectrum, providing a new approach for turbulence mitigation. This work highlights the paradigm shift of information transmission inspired by asymmetrical OAM spectra, aiming to utilize the controllable asymmetry caused by the twist factor for mode augmentation. Based on this, we further propose novel mode encoding scheme at the transmitter and mode combining scheme at the receiver. The proposed schemes bring significant improvements in terms of the average capacity, aggregate capacity, and Bit Error Rate (BER) of OAM-FSOC systems. 【Results】 Numerical results show significant performance improvements consistent with theoretical predictions, including the actual capacity, capacity upper bound, and available link distance in turbulent channels, as well as the ability to suppress turbulence. 【Conclusion】 The proposed solution in the paper is not only the application of twisted partially coherent light fields in OAM-FSOC systems but also the utilization of the physical fact of controllable asymmetric diffusion of the OAM spectrum. The paper demonstrates the significant potential for the application of cutting-edge optical wave physics theories, exemplified by the regulation of twisted phase partially coherent light fields, in next-generation optical wireless communications.

**Key words:** OAM; twist phase; partially coherent light field; FSOC

## 0 引言

轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 被认为是有效提高自由空间光通信 (Free-

Space Optical Communication, FSOC) 系统性能的重要手段之一<sup>[1]</sup>。微观单光子存在自旋和轨道两部分角动量,前者对应光场偏振性质,后者对应介观光场的特征相位涡旋<sup>[2]</sup>。OAM 光场调控研究通常包

收稿日期:2025-01-19; 修回日期:2025-03-04; 纸质出版日期:2025-08-10

基金项目:广东省自然科学基金面上资助项目(2022A1515010209)

作者简介:戴炜杰(1999-),男,湖南张家界人。硕士,主要研究方向为自由空间光通信。

通信作者:董宇涵,副教授。E-mail: dongyuhan@sz. tsinghua. edu. cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

括基于经典偏振相干理论的 OAM 传输特征研究,如在湍流介质中人工调控 OAM 光束相干度、光斑和谱特征演变的光场物理<sup>[3]</sup>。本文基于此理论提出了专门的新型通信方案。

调控 OAM 即光场的特征相位涡旋空间分布,可在希尔伯特空间获得一组数量无穷的正交场,以拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光场为例,径向模式不同场之间的共轭积分为 0。OAM 光束正交模式可用于光通信承载信息比特,文献[4]首次验证了其在湍流介质中优于传统高斯光束。然而, OAM 光束在湍流、散射和吸收等随机介质中传播时,光场发生扰动会破坏模式间的正交性,使得当前模式能量扩散到未知模式即谱扩散,导致通信误码。已有的研究工作一般认为 OAM 谱对称扩散,即  $P_{l+\Delta l} = P_{l-\Delta l}$ ,尤其是模式偏差  $\Delta l = 1$ ,式中,  $P_l$  为  $l$  模式的能量。

文献[5-11]等研究发现 OAM 谱扩散存在显著的非对称性,却均未加以利用。加载扭曲相位部分相干光场(Partially Coherent Light Fields)的最新研究表明,OAM 谱的非对称扩散可被主动调控<sup>[3]</sup>,这一研究启发了本文工作。本文通过 OAM 模式增广,将该非对称性转变为可用资源,设计了收发端模式编码与模式合并,与传统方法<sup>[4]</sup>相比大幅提升了光通信性能。

## 1 扭曲相位造成的非对称扩散 OAM 谱

近年来,光场 OAM 调控技术已为光通信和探测领域带来显著进展<sup>[12-13]</sup>,对其讨论已深入到拓扑光场<sup>[14-15]</sup>和机器学习<sup>[16]</sup>等视角。此外,非对称 OAM 谱光束获得了持续关注和研究。在中等到强湍流下,文献[5]在实验结果中观察到了 OAM 谱扩散过程中显著的非对称性;文献[6]从 OAM 在随机介质中传播时模式间能量转换的角度尝试解释了这一现象;文献[7-8]闭式计算了强柯氏(Kolmogorov)湍流下 LG 光束的 OAM 检测概率,从理论上确认了 OAM 谱的明显非对称扩散行为;文献[9]进一步确认了该非对称性,认为是由湍流引起的平均噪声场导致,且随湍流强度的增加而增强;文献[10]发现了通过柯氏湍流的非对称完美光学涡旋场的 OAM 谱有明显非对称性扩散,其与湍流强度、探测器半径以及传播距离有关;文献[11]研究了沿不同平行轴传播的非共轴 LG 光束间的正交性,观察到了方位模式  $l \neq 0$  时 OAM 谱的非对称性扩散。然而,OAM 谱非对称扩散的主动调控在上述工作中

均未涉及,而扭曲相位为该任务提供了一种可用手段。

部分相干光场的范畴在引入扭曲相位<sup>[17-18]</sup>后得到了极大拓展。作为空间上不可分离的相位项,扭曲相位  $\exp\left\{i\left[\frac{k\mu_0}{2}(\vec{s}_1 - \vec{s}_2) \cdot J(\vec{s}_1 + \vec{s}_2)\right]\right\}$  被加载到源平面部分相干光场的互谱密度  $W(\vec{s}_1, \vec{s}_2)$  上,式中:  $i$  为虚数单位;  $k$  为波数;扭曲因子  $\mu_0$  满足  $|\mu_0| \leq (k\delta_0^2)^{-1}$ ,  $\delta_0$  为空间相干宽度;  $\vec{s}_1 = (x_1, y_1)$  和  $\vec{s}_2 = (x_2, y_2)$  分别为源平面上任取两点  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  的直角坐标;矩阵  $J = [0, 1; -1, 0]$  用于匹配  $\vec{s}_1$  和  $\vec{s}_2$  进行计算。引入扭曲相位为部分相干光场理论带来新的物理特性与应用价值,包括可调的光斑旋转、相干度分布的演变以及对光通信系统中接收机闪烁现象的抑制。特别地,考虑扭曲相位对部分相干光场 OAM 特性的影响,以文献[19]中对部分相干光场 OAM 的分析为基础,文献[20]理论推导并实验验证了扭曲部分相干光场中统计态 OAM 的传播特性。进一步,针对扭曲相位和涡旋相位共存的部分相干光场,文献[21]首次研究了扭曲相位对 OAM 通量密度的影响,随后文献[3]观察到了 OAM 谱的非对称特性与扭曲因子的强相关性。这些工作为调控 OAM 谱扩散的非对称性提供了机会,其中,文献[3]推导的自由空间中扭曲部分相干 LG 谢尔模光束的互谱密度函数也是本文工作数值计算的基础,来自统计光学理论中光场的矩计算,具有统计意义。本文并没有采取常用的光场分步传输模拟方法,因为具有特殊关联结构的光场只能根据其源平面的互谱密度或互相关函数,利用拓展的惠更斯-菲涅尔原理进行相位屏传输仿真,涉及高维张量传输,计算开销过大。值得说明的是,针对具有特殊关联结构的光场,如何开发高效数值传播方法是部分相干光通信与探测、光学相干成像和计算机图形学光场渲染等领域中占据重要地位的技术问题,如能有效解决,将为相关领域带来重大进展。

OAM-FSOC 系统的传统选择是具有涡旋相位  $\exp(i l \phi)$  的部分相干光场,其中,  $\phi$  为极坐标系中的极角坐标,该相位对应 OAM 模式  $l$ ,即沿  $\phi$  方向环绕方位圆 1 周会发生  $l$  次相位周期转变。这种特定的涡旋相位是统计上的光学特征,直接与沿传输方向每光子的 OAM 通量密度  $J_l$  相关,即

$$J_l/n = l\hbar, \quad (1)$$

式中:  $n$  为光子数;  $\hbar$  为约化普朗克常数。而对于同

时具有扭曲和涡旋相位的部分相干光场<sup>[4,21]</sup>,与式(1)不同,沿传输方向每光子 OAM 通量密度  $J_l$  为

$$J_l/n = l'\hbar = [l - 2\mu_0 k\delta_0^2(1 + |l|)]\hbar. \quad (2)$$

式(1)和式(2)中模式数  $l$  与  $l'$  之间的偏差导致各自对应的 OAM 谱呈现出显著差异,图 1 所示为模式  $l' = l + \Delta l$  的能量(归一化接收功率)  $P_{l'}$  在不同距离  $L$ 、单位质量流体动能耗散率  $\chi_T$  的常用对数值

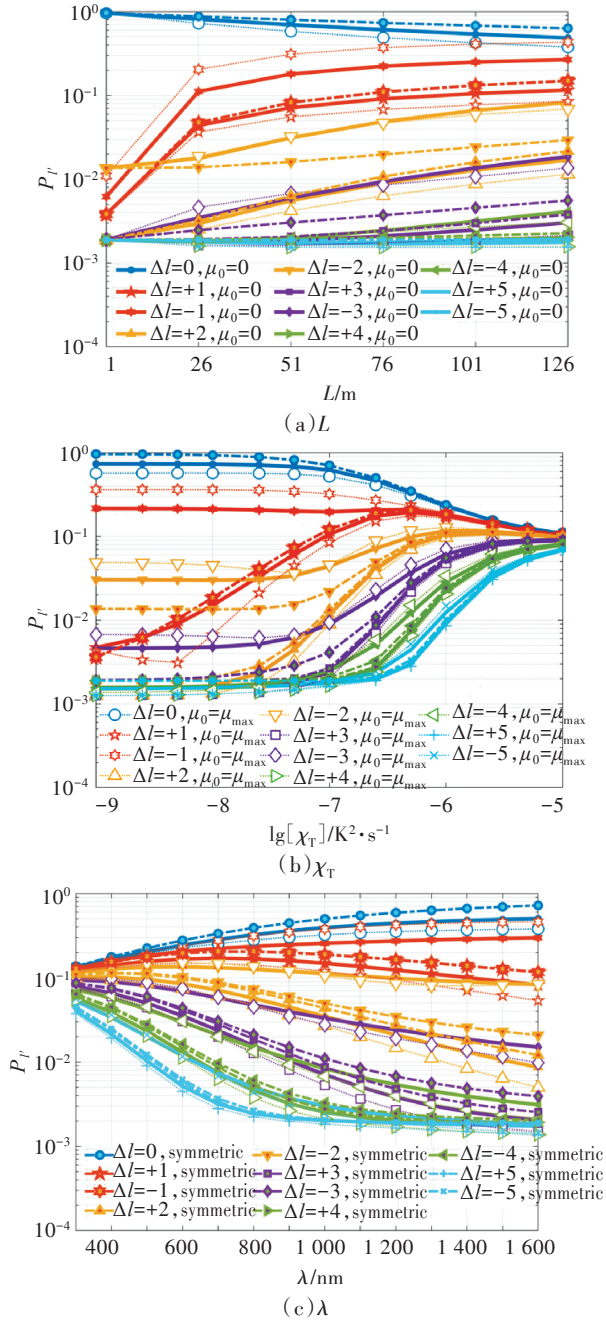


图 1 模式能量  $P_{l'}$  与距离  $L$ 、单位质量流体动能耗散率  $\chi_T$  和波长  $\lambda$  的关系图

Figure 1 The received mode power  $P_{l'}$  as a function of distance  $L$ , dissipation rates for the fluid kinetic energy per unit mass  $\chi_T$ , and wavelength  $\lambda$

和波长  $\lambda$  下的取值,  $\Delta l$  为模式偏差。通常情况下, OAM 谱经历湍流后出现对称扩散, 其对称中心位于模式  $l$ , 且较大的  $\Delta l$  对应着相等且较小的谱值, 如图中点画线标记的对称情况所示。然而, 在存在扭曲相位的情况下, OAM 谱经历湍流后呈现非对称扩散, 造成以模式  $l$  为中心, 左侧与右侧邻近模式  $l'$  的谱值(即  $P_{l'}$ ) 出现明显不同, 即某一侧整体大于另外一侧, 而具体侧别取决于  $\mu_0$  的符号, 如图中虚线标记的  $\mu_0 = \mu_{max}$  即光场扭曲因子取到最大值  $\mu_{max}$  时所示。两种情况下的传输模式  $l$  对应的  $P_l$  基本相同, 这表明在常规的 OAM-FSOC 系统中, 是否使用带扭曲相位的部分相干光场并不会大幅影响性能。然而, 左右侧邻近模式  $l'$  谱值上的显著非对称性提示了一种全新的 OAM-FSOC 系统设计范式, 为进一步提升链路的容量性能和提高抑制湍流能力提供了机会。具体地, 对于给定的涡旋相位  $\exp(il\phi)$ , 由于存在 3 种不同的  $\mu_0$  取值, 对应 3 种非对称状态: 左偏非对称、对称和右偏非对称。因此, 该方案能够对受湍流扩散影响的 OAM 模式进行 3 倍模式增广, 直接提高实际容量及容量上界。此外, 部分相干光场的非对称性也提示了在接收机处可以通过模式合并提高信噪比。接下来, 本文基于这一物理现象, 提出面向非对称 OAM 模式增广的发射端模式编码和接收端模式合并方案, 并分析了容量、信噪比和比特误码率(Bit Error Rate, BER)的增益, 提升了链路的距离和湍流下的鲁棒性。

## 2 非对称模式增广的模式编码与合并接收方案

本节主要说明了基于非对称 OAM 模式扩散的模式增广原理, 以及这一研究思路在 OAM-FSOC 系统设计带来的范式转变。非对称 OAM 模式启发的模式增广原理是: 不同于传统对称 OAM 谱的 OAM-FSOC 系统仅使用模式  $l_0$  传输信息, 本文工作同时使用模式  $l_0$  本身和 OAM 谱的非对称特性扭曲因子  $\mu_0$  组成的模式  $\{l_0, \mu_0\}$  即整个 OAM 谱用于通信, 而非传统的仅利用其中心谱线  $P_{l_0}$  的思路。基于这样的模式增广原理, 本节接下来详细阐述了新提出的非对称 OAM 谱模式增广的发射端模式编码和接收端模式合并方案。

对于同时具有角向模式  $l$  和径向模式  $m$  的 LG 光场  $\{l, m\}$ , 可将其扩展为具有扭曲因子的 LG 模式  $\{l, m, \mu_0\}$ , 其中,  $\mu_0 \in \{-\mu_{max}, 0, \mu_{max}\}$ 。该方案直接完

成了模式增广,提供了3倍的基本容量,然而还存在进一步和根本性的容量提升空间。假设归一化非对称性  $\mu_{\text{norm}} = \mu_0/\mu_{\text{max}} \in \{-1, 1\}$  的分辨率为  $\Delta\mu$ , 类似于脉冲幅度调制中的处理,因为  $\mu_{\text{norm}}$  是可控阶梯状取值的信息载体,可控分辨率  $\Delta\mu$  越小,总的可用阶梯数越多。因此,如果可以准确识别到一定程度 OAM 谱的非对称性,就能够将原本的 LG 模式  $\{l, m\}$  扩展为  $\{l, m, \mu_{\text{norm}}\}$ , 其中  $\mu_{\text{norm}} \in \{-1, \Delta\mu-1, 2\Delta\mu-1, \dots, 1-\Delta\mu, 1\}$ 。上述模式由3倍模式增广变成了  $N$  倍模式增广,其中  $N = \frac{2}{\Delta\mu}$ 。

以最简单的  $N=3$  情形来分析本文所提方案的容量增益。采用离散无记忆二进制对称信道容量模型<sup>[4, 22]</sup>, 此时, OAM-FSOC 的平均信道容量(简称平均容量)  $C_{\text{avg}}$  由信源熵  $H(x)$  和条件熵  $H(x|y)$  共同确定。对于仅使用角向模式  $l \in [0, M-1]$  ( $M$  为所使用 LG 角向模式的总个数), 而不使用径向模式  $m$  的 OAM-FSOC 系统, 其平均信道容量  $C_{\text{avg}}$  可由 OAM 模式检测概率  $P(l_0, \mu_0)$  和  $P(l_0, \mu_0|l)$  计算:

$$C_{\text{avg}} = \max_{P(l_0, \mu_0)} [H(l_0, \mu_0) - H(l_0, \mu_0|l)], \quad (3)$$

式中,

$$\max_{P(l_0, \mu_0)} H(l_0, \mu_0) = \log_2 M, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \max_{P(l_0, \mu_0)} H(l_0, \mu_0|l) = \\ & -\frac{1}{M} \sum_{\mu_0} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{l_0=0}^{M-1} P(l|l_0, \mu_0) \log_2 \frac{P(l|l_0)}{\sum_{l_0} P(l|l_0)}. \end{aligned} \quad (5)$$

值得说明的是,平均容量  $C_{\text{avg}}$  用于描述 OAM-FSOC 的实际容量性能。而最大可达容量,即在二进制对称信道假设下的信道聚合容量(简称聚合容量)  $C_{\text{agg}}$  可定义为

$$C_{\text{agg}} = \sum_{l \in O} [1 + p_l \log_2 p_l + (1 - p_l) \log_2 (1 - p_l)], \quad (6)$$

式中:  $O$  为可用模式集合,即  $\{l, m\} \in O$ ;  $p_l$  为角向模式  $l$  的翻转概率。在应用诸如开关键控(On-Off Keying, OOK)和二进制脉冲位置调制(Binary Pulse Position Modulation, BPPM)等正交调制方案时,  $p_l$  可定义为  $p_l = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma_l}/2)$ <sup>[23]</sup>, 式中:  $\text{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数;  $\gamma_l$  为等效信干噪比(Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio, SINR)。  $\gamma_l$  可定义为

$$\gamma_l = \frac{\eta_l^2}{\sum_{l' \in O, l' \neq l} \eta_{l'}^2 + N_0/P_{\text{Tx}}}, \quad (7)$$

式中:  $\eta_l^2$  为模式  $l$  的正确探测概率;  $\eta_{l'}^2$  为模式  $l$  的误探测概率;  $N_0$  为接收机噪声功率;  $P_{\text{Tx}}$  为发射功率。

由式(6)可知,当  $O$  扩展为  $O' \ni \{l, m, \mu_{\text{norm}}\}$  时, 本文所提发射端模式编码方案极大地提高了  $C_{\text{agg}}$ 。

接下来将详细说明接收端模式合并方案。概括来说,对称情况下保持不变,而在非对称的接收功率  $P_{l'}$  较大的一侧收集所有模式接收功率,因此,等增益合并后的 SINR 即  $\gamma_{\text{com}}$  可表示为各个单独模式  $l'$  的 SINR 之和,即在  $\mu_0 l_0 > 0$  时有:

$$\gamma_{\text{com}} = \sum_{l' < l_0} \gamma_{l'}, \quad (8)$$

在  $\mu_0 l_0 < 0$  时有:

$$\gamma_{\text{com}} = \sum_{l' > l_0} \gamma_{l'}. \quad (9)$$

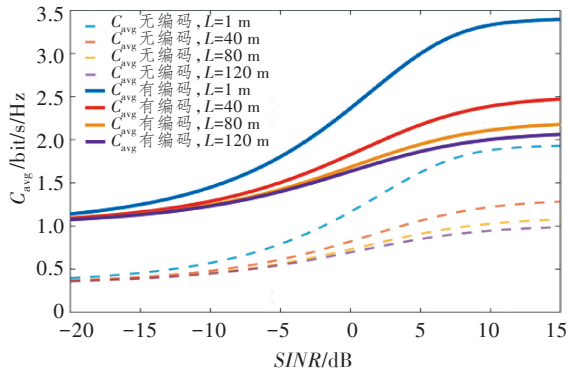
该模式合并会提高 SINR 而显著提升误码性能。需要强调的是,当一组不相关的模式  $l' \neq l_0$  在接收孔径上进行合并时,这种求和操作似乎违反了传统 OAM-FSOC 的设计原则,然而,这样的做法有两个直接原因。首先,在 OAM-FSOC 中,为了检测某一模式或某些模式,同时扫描检测多个 OAM 模式以生成 OAM 谱是常见操作,这表明  $\gamma_{l'}$  容易获取;其次,对于模式  $l' \neq l_0$  的  $\gamma_{l'}$  进行求和,如上述模式增广原理所述,并不是将模式  $l'$  视为像传统的 OAM-FSOC 中使用单根谱线代表的模式  $l_0$  承载信息,而是使用整个非对称 OAM 谱偏大的一侧作为整体的信息载体。

### 3 数值结果

本节使用数值仿真验证所提方案带来的性能提升。数值仿真中涉及的参数取值如下:非对称 OAM 谱来自具有 OAM 模式集  $O \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$  的扭曲 LG 谢尔模光束,根据其接收端的互谱密度<sup>[3]</sup>进行计算,波长  $\lambda=1550$  nm,链路距离  $L=5$  或  $60$  m。所采用的湍流模型是迄今为止适用环境广度与模型精度取到最佳折中的非柯氏海洋湍流光功率谱(Non-Kolmogorov Oceanic Turbulent Optical Power Spectrum, NK-OTOPS)<sup>[24]</sup>, Rytov 方差  $\sigma_R^2 = 1.8546 \times 10^{-3}$  表明默认采用弱湍流信道。对上述参数的任何修改将在相应的图注和图例中说明。需要说明的是,无论是从统计光学理论,还是从实际光学湍流测量来看, Rytov 方差都是一个集成了链路距离  $L$ 、湍流折射率结构参数  $C_n^2$  以及光波长  $\lambda$  的统计度量,因此本节对不同  $L$  和  $\lambda$  设定的链路分析与不同  $\sigma_R^2$  设定的链路分析稍显重复。然而,由于

NK-OTOPS 湍流模型缺乏有效的  $C_n^2$  度量<sup>[25]</sup>, 不能直接使用  $C_n^2$  来表征湍流强度, 因此本文专门使用  $\sigma_R^2$  来指代不同的湍流强度设定。为避免混淆, 以下不同  $\sigma_R^2$  取值的情况中,  $L$  和  $\lambda$  都保持不变, 仅通过调整温度和盐度等非人为设置的链路因素来改变  $\sigma_R^2$  的取值。

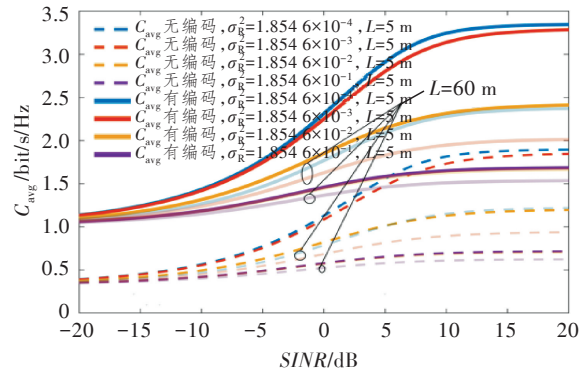
图 2 所示为平均容量  $C_{\text{avg}}$  和聚合容量  $C_{\text{agg}}$  与



(a) 不同  $L$  下  $C_{\text{avg}}$  随  $SINR$  的变化

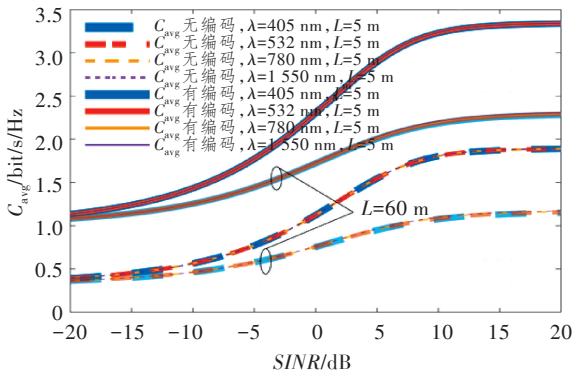
(a) Average capacity  $C_{\text{avg}}$  as a function of  $SINR$  for different distances  $L$

$SINR$  在不同链路距离  $L$ 、Rytov 方差  $\sigma_R^2$  和波长  $\lambda$  下的关系图, 图中虚线(---)、实线(—)和点线(⋯)分别表示无编码、编码和编码与合并的情况。图中评估了信道容量的提升情况, 其中没有进行模式编码的图线表示传统的对称 OAM 情形。采用非对称模式增广的发射端模式编码后, 在低  $SINR$  情况下, 如  $-10$  dB, 平均容量几乎增加了 1 倍; 在高



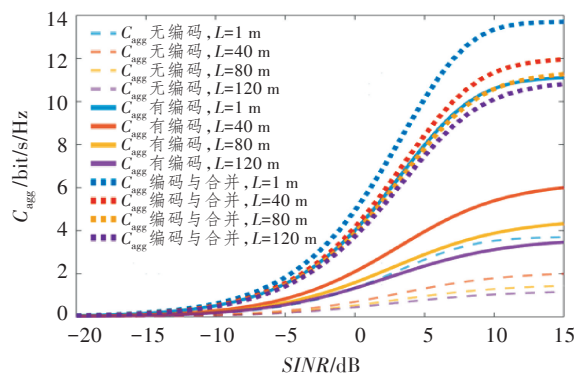
(b) 不同  $\sigma_R^2$  下  $C_{\text{avg}}$  随  $SINR$  的变化

(b) Average capacity  $C_{\text{avg}}$  as a function of  $SINR$  for different Rytov variances  $\sigma_R^2$



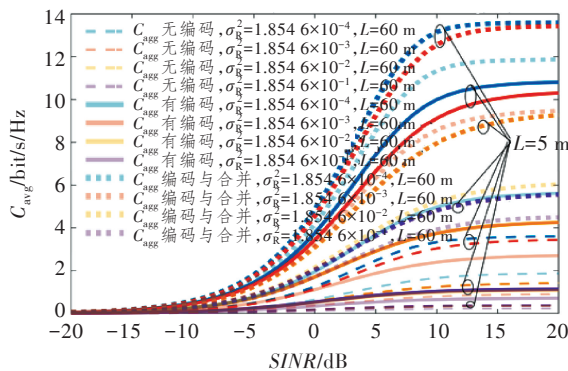
(c) 不同  $\lambda$  下  $C_{\text{avg}}$  随  $SINR$  的变化

(c) Average capacity  $C_{\text{avg}}$  as a function of  $SINR$  for different wavelengths  $\lambda$



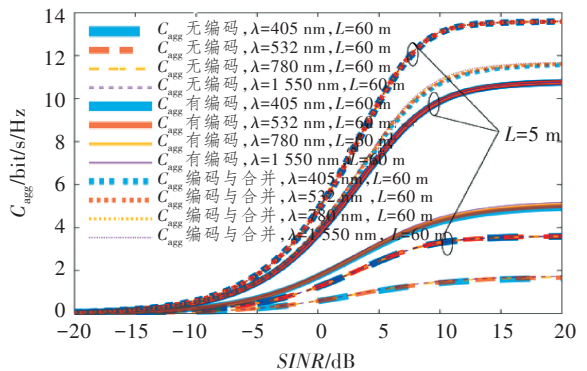
(d) 不同  $L$  下  $C_{\text{agg}}$  随  $SINR$  的变化

(d) Aggregated capacity  $C_{\text{agg}}$  as a function of  $SINR$  for different distances  $L$



(e) 不同  $\sigma_R^2$  下  $C_{\text{agg}}$  随  $SINR$  的变化

(e) Aggregated capacity  $C_{\text{agg}}$  as a function of  $SINR$  for different Rytov variances  $\sigma_R^2$



(f) 不同  $\lambda$  下  $C_{\text{agg}}$  随  $SINR$  的变化

(f) Aggregated capacity  $C_{\text{agg}}$  as a function of  $SINR$  for different wavelengths  $\lambda$

图 2 平均容量  $C_{\text{avg}}$  和聚合容量  $C_{\text{agg}}$  与  $SINR$  在不同链路距离  $L$ 、Rytov 方差  $\sigma_R^2$  和波长  $\lambda$  下的关系图

Figure 2 Average capacity  $C_{\text{avg}}$  and aggregate capacity  $C_{\text{agg}}$  as a function of  $SINR$  for various link distance  $L$ , Rytov variance  $\sigma_R^2$  and wavelength  $\lambda$

SINR 情况下,即使  $L$  和  $\sigma_R^2$  的取值不断增加,  $C_{\text{avg}}$  和最高可达容量都得到了明显提高。当涉及非对称模式增广的接收端模式合并操作时,与仅采用模式编码的情况相比,  $C_{\text{avg}}$  有了显著提高,即使在长距离链路  $L=120$  m 和中等湍流效应  $\sigma_R^2=1.8546 \times 10^{-1}$  的情况下也是如此。这表明,本文所提方案将现有设计的可达最大容量界限大幅提高,几乎接近容量极限,例如,在  $M=5$  和  $N=3$  的情况下容量极限为 15 bit/s/Hz。此外,如图 2(c) 和图 2(f) 所示,本文所提方案不具有频率选择性,因此支持宽带 OAM-FSOC 链路的  $C_{\text{avg}}$  及容量上限提升。这进一步表明了其在波分复用系统以及水下、大气和自由空间等媒介的应用场景中与宽带白光光源结合的巨大潜力。

图 3 所示为基于模式  $l=1$  的 OOK 调制和模式  $l=2$  的 BPPM 下 BER 与 SINR 的关系,其为基于单一而非复用 OAM 模式 OAM-FSOC 系统的 BER 结果。以 BER 达到前向纠错阈值  $3.8 \times 10^{-3}$  为判断准则,所提接收端模式合并方案可将可用链路距离  $L$  在 OOK 调制下扩展至 80 m,在 BPPM 下扩展至 120 m。在弱和中等强度湍流情况下,链路性能得到显著提升。

然而,BER 改善仅在弱湍流中较为显著,而平均容量作为 OAM 链路性能的实际描述,从未接近信道原始容量极限 5 bit/s/Hz,对于 OAM 模式集  $O \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ ,有  $M=5$ ,可将此归因于有限的非对称模式增广程度,即  $N=3$ 。非对称模式增广程度可通过进一步准确识别 OAM 谱的非对称程度来进一步扩展。对此,我们近期的一项工作<sup>[26]</sup>设计了非对称程度识别的策略,实现了  $N=9$  的非对称 OAM 模式增广。

将本文所提系统的性能与近年来可以进行直接性能折算的相关工作<sup>[27-28]</sup>进行指标折算对比。文献<sup>[29]</sup>在使用 19 个并行 OAM 模式、SINR 为 32 dB 和自由空间链路距离为 0~100 m 的条件下,实现了最高 4.2 bit/s/Hz 的平均容量;文献<sup>[28]</sup>使用连续干扰消除解码器及冗余接收方案,在强湍流条件下在光纤信道中实验实现了双偏振复用 5 个 OAM 模式共 10 个并行信道下的净容量 13.9 bit/s/Hz、总线速率 689 Gbit/s,此外,所有单次湍流实现下的通信 BER 都接近前向纠错编码(Forward Error Correction, FEC)。而本文工作仅使用 5 个并行 OAM 模式、在 SINR 为 15 dB、自由空间链路距离为 1~120 m 的条件下实现了 3.4 bit/s/Hz 的平均容量。

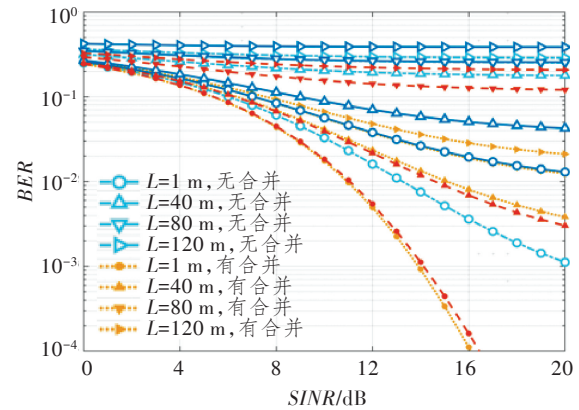
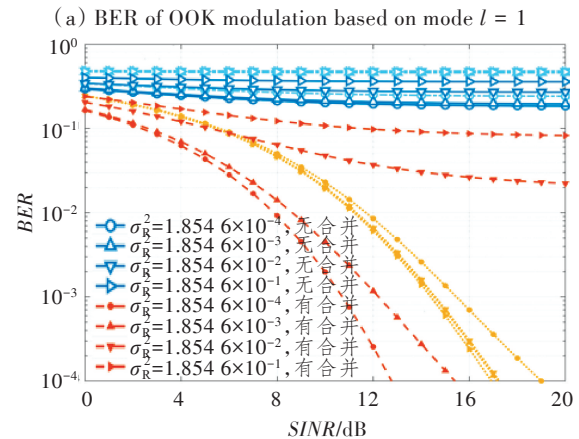
(a) 基于模式  $l=1$  的 OOK 调制(b) 基于模式  $l=2$  的 BPPM 调制(a) BER of OOK modulation based on mode  $l=1$ (b) BER of BPPM based on mode  $l=2$ 

图 3 BER 与 SINR 的关系图

Figure 3 BER as a function of SINR

按照每个 OAM 模式平等贡献平均容量的假设,本文所提方案实现了 0.68 bit/s/Hz/模式的单 OAM 模式平均容量,超过文献<sup>[27]</sup>中的 0.22 bit/s/Hz/模式 3 倍以上。此外,即使没有加载任何纠错编码方案,本文所提无编码系统直接实现的 0.68 bit/s/Hz/模式也达到了文献<sup>[28]</sup>中通过极大代价(信标光、极限的差分 5 km 光纤冗余信道配置和复杂的符号匹配方案)所实现 1.39 bit/s/Hz/模式的一半,以及相近的 BER。

## 4 结束语

本文从传统的扭曲调控工程视角出发,为 OAM-FSOC 系统的设计引入了模式增广的研究思路与范式。本文基于 OAM 光场调控中扭曲相位设计的进展,依据扭曲 LG 谢尔模光场的 OAM 谱具有非对称性这一物理事实,创新性地提出了 OAM 模式的非对称增广,为遭受 OAM 谱扩散的光通信系统引入了新的信息承载维度,并进一步开发了 OAM-FSOC 系统中新型非对称模式增广的发射端

模式编码和接收端模式合并方案。本文所提方案不仅规避了非对称 OAM 谱的中心谱线在信息传输应用中的不稳定性,还实现了湍流信道中 FSOC 系统实际容量、容量上限和 BER 等通信性能全面提升。

需要强调的是,本文工作是模式增广概念下的一个示例,即利用可控非对称 OAM 谱为 OAM-FSOC 系统设计范式带来转变,展示了光场调控理论在被认为难以继续开发的传统少维光场的工程应用中的巨大潜力,也预示着在更高维光场自由度集成应用中存在的机会。总的来说,这项工作利用模式增广概念显著改善了通信系统容量和可用链路范围,强调了非对称 OAM 谱在下一代 OAM-FSOC 领域的关键作用,从更广泛的角度来看,还代表了对扭曲部分相干光场可控非对称性进行利用的首次尝试。

#### 参考文献:

- [1] Padgett M J. Orbital Angular Momentum 25 Years on[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11265–11274.
- [2] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital Angular Momentum of Light and the Transformation of Laguerre-Gaussian Laser Modes[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185–8189.
- [3] Wang H, Yang Z, Liu L, et al. Orbital Angular Momentum Spectra of Twisted Laguerre-Gaussian Schell-model Beams Propagating in Weak-to-strong Kolmogorov Atmospheric Turbulence[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 916–928.
- [4] Paterson C. Atmospheric Turbulence and Orbital Angular Momentum of Single Photons for Optical Communication[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 153901.
- [5] Ren Y, Huang H, Xie G, et al. Atmospheric Turbulence Effects on the Performance of a Free Space Optical Link Employing Orbital Angular Momentum Multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4062–4065.
- [6] Yang D, Hu Z D, Wang S, et al. Influence of Random Media on Orbital Angular Momentum Quantum States of Optical Vortex Beams[J]. *Physical Review A*, 2022, 105(5): 053513.
- [7] Elder H F, Sprangle P. Mode Power Spectrum for Laguerre-Gauss Beams in Kolmogorov Turbulence[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(14): 3447–3450.
- [8] Elder H F, Sprangle P. Full Mode Power Spectrum for Laguerre-Gauss Beams in Strong Kolmogorov Turbulence[J]. *Optics Express*, 2022, 30(25): 45508–45516.
- [9] Wu D, Wang H, Wang F, et al. Breaking the Symmetric Spiral Spectrum Distribution of a Laguerre-Gaussian Beam Propagating in Moderate-to-strong Isotropic Atmospheric Turbulence[J]. *Optics Express*, 2024, 32(2): 1701–1714.
- [10] Acevedo C H, Eshaghi M, Dogariu A. Propagation of Asymmetric Optical Vortex Beams through Turbulence and Evolution of Their OAM Spectra[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2023, 40(12): 2135–2145.
- [11] Liu Y D, Yang X, Wang J, et al. Orthogonality of Non-coaxial Laguerre-Gaussian Beams[J]. *Optics Express*, 2024, 32(4): 4876–4886.
- [12] 谢友朋, 张珊, 雷霆, 等. 奇点光束复用光通信[J]. *光通信研究*, 2018(6): 11–20.
- Xie Y P, Zhang S, Lei T, et al. Singular Optical Beams Multiplexing Optical Communication[J]. *Study on Optical Communications*, 2018(6): 11–20.
- [13] 胡建飞, 骆斌, 王吉明, 等. 调控矢量激光在湍流环境中的旋转多普勒测量[J/OL]. *激光技术*, 2024: 1–14. (2024-09-25) [2025-01-19]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JGJS20240924002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- Hu J F, Luo B, Wang J M, et al. Rotating Doppler Measurement of Modulated Vector Laser in Turbulent Environment [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1–14. (2024-09-25) [2025-01-19]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JGJS20240924002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [14] 林旻, 杜路平, 袁小聪. 中国光学十大进展: 光学斯格明子研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(24): 2400001.
- Lin M, Du L P, Yuan X C. China's Top 10 Optical Breakthroughs: Research Progress of Photonic Skyrmion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(24): 2400001.
- [15] Shen Y, Zhang Q, Shi P, et al. Optical Skyrmions and Other Topological Quasiparticles of Light[J]. *Nature Photonics*, 2023, 18(1): 15–25.
- [16] 郑崇辉, 王天枢, 刘哲绮, 等. 深度迁移学习方法识别轨道角动量光束[J]. *光电工程*, 2022, 49(6): 45–54.
- Zheng C H, Wang T S, Liu Z Q, et al. Deep Transfer Learning Method to Identify Orbital Angular Momentum Beams[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022,

- 49(6): 45–54.
- [17] Simon R, Sudarshan E C, Mukunda N. Anisotropic Gaussian Schell-model Beams: Passage through Optical Systems and Associated Invariants[J]. *Physical Review A, General Physics*, 1985, 31(4): 2419–2434.
- [18] Simon R, Mukunda N. Twisted Gaussian Schell-model Beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, 10(1): 95–109.
- [19] Serna J, Movilla J M. Orbital Angular Momentum of Partially Coherent Beams[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(7): 405–407.
- [20] Liu L, Huang Y, Chen Y, et al. Orbital Angular Momentum of an Electromagnetic Gaussian Schell-model Beam with a Twist Phase[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 30283–30296.
- [21] Peng X, Liu L, Wang F, et al. Twisted Laguerre-Gaussian Schell-model Beam and Its Orbital Angular Moment[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 33956–33969.
- [22] Li M, Cvijetic M, Takashima Y, et al. Evaluation of Channel Capacities of OAM-based FSO Link with Real-time Wavefront Correction by Adaptive Optics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31337–31346.
- [23] Anguita J A, Neifeld M A, Vasic B V. Turbulence-induced Channel Crosstalk in an Orbital Angular Momentum-multiplexed Free-space Optical Link[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2414–2429.
- [24] Yao J R, Wang H T, Zhang H J, et al. Oceanic Non-kolmogorov Optical Turbulence and Spherical Wave Propagation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 1340–1359.
- [25] 姚金任. 基于Hill第四模型的海洋光学湍流折射率功率谱研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Yao J R. Research on the Refractive Index Power Spectrum of Ocean Optical Turbulence based on Hill's Fourth Model[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [26] Dai W, Liu X, Su X, et al. OAM Spectral Asymmetry Identification and Symbol-level Detection in Twisted Partially Coherent FSO Links[C]//*Frontiers in Optics + Laser Science 2024 (FiO, LS)*. Denver, Colorado, USA: Optica Publishing Group, 2024: JD4A. 61.
- [27] Yang H, Yan Q, Wang P, et al. Bit-error Rate and Average Capacity of an Absorbent and Turbulent Underwater Wireless Communication Link with Perfect Laguerre-Gauss Beam[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 9053–9064.
- [28] Li Y, Chen Z, Benton D, et al. 689 GBPS Single-wavelength Mode-division Multiplexing Free-space Optical Transmission in Strong Turbulence[C]//*49th European Conference on Optical Communications (ECOC 2023)*. London, UK: IET, 2023: 10484697.