

自由空间轨道角动量无线光通信研究进展

王伟^{1,2,3}, 李晓记^{1,2*}, 任亚萍³, 杜卫海^{1,2,3}, 刘致宏³

(1. 桂林电子科技大学 认知无线电与信息处理教育部重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 广西信息科学实验中心, 广西 桂林 541004; 3. 桂林电子科技大学 海洋信息工程学院, 广西 北海 536000)

摘要:轨道角动量(OAM)为无线光通信提供了新的信息调制维度,极大地提升了系统的信道容量和频谱利用率。目前,基于OAM的新型无线光通信体制引起了学术界的极大关注。首先介绍了通信方式,其次依次综述了大气湍流随机相位屏、大气湍流下传输特性和大气湍流效应抑制策略,最后展望了自由空间 OAM 无线光通信的应用前景和研究趋势。

关键词:轨道角动量;无线光通信;大气湍流

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)04-0012-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress on free space orbital angular momentum wireless optical communication

WANG Wei^{1,2,3}, LI Xiaoji^{1,2*}, REN Yaping³, DU Weihai^{1,2,3}, LIU Zhihong³

(1. Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing of Ministry of Education, Guilin University of Electronic Technology,

Guilin Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin Guangxi 541004, China;

3. School of Marine Information Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Beihai Guangxi 536000, China)

Abstract: Orbital angular momentum (OAM) provides a novel information modulation degree for wireless optical communication, which can promote the channel capacity and spectral efficiency tremendously. Currently, the OAM wireless optical communication regime has attracted the highly interest of academic community. Firstly, this paper reviews the communication approaches of OAM wireless optical communication, then investigates the random phase screen for atmospheric turbulence, transmission characteristics of OAM under atmospheric turbulence and mitigation schemes for atmospheric turbulence effects. And some application prospects and research trends for OAM wireless optical communication are discussed finally.

Key words: orbital angular momentum; wireless optical communication; atmospheric turbulence

0 引言

随着“互联网+”和大数据时代的到来,物联网、云计算数据中心和移动互联网等带宽消耗型业务的不断增加,给现有无线通信系统带来了巨大的压力和挑战。研究显示,在今后的 10~30 年里,信息流量需求预

收稿日期:2018-12-26。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:61761014)资助;广西信息科学实验中心平台建设项目(编号:PT1604)资助;广西研究生教育创新计划项目(编号:YCSW2019152)资助。

作者简介:王伟(1990-),男,湖南湘乡人,硕士研究生,研究方向为水下无线光通信,现就读于桂林电子科技大学认知无线电与信息处理教育部重点实验室,参与国家自然科学基金项目 1 项,其他科研项目 1 项,参加国际学术会议 1 次。

* 通信作者:李晓记(E-mail:46941917@qq.com)。



计将会有 2~4 个数量级的增长^[1]。随着光波的基本维度(幅度、相位、频率/波长、偏振和时间等)资源均已被开发利用,无线光通信已经开始出现新的容量危机^[2]。因此,如何持续满足不断增长的信息容量需求,确保高速信息的畅通传输,已经成为了无线光通信亟待解决的问题。轨道角动量(OAM)无线光通信利用了光波的空间自由度这一信息调制维度资源,可以有效提升通信链路的传输容量和频谱利用率^[3],同时,相对于传统无线光通信更具有安全性^[4]。

1992 年, L.Allen 等人发现具有空间螺旋相位因子 $\exp(i\ell\theta)$ 的拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束携带有 OAM^[5]。每个光子携带的 OAM 为 ℓh , 其中 ℓ 为拓扑荷数, ℓ 的取值可以为任意整数; θ 为方向相位角; h 为 OAM 的模式值(也称模式值或本征态值),其值为普朗

克常数除以 2π 。任意 2 个不同模态值的 OAM 相互正交,这使得 OAM 模态适合于信息的空间复用传输。2004 年,Gibson 等人通过实验首次验证了 OAM 态可用于通信^[6]。2012 年,Jian Wang 等人在自由空间环境中基于 OAM 复用试验了无线光通信,传输容量达到了 2.56Tb/s^[7]。2014 年,Hao Huang 等人基于 OAM 复用,进一步提升了通信容量,高达 100Tb/s^[8]。面对通信容量的持续扩容需求,可以开发利用光波的空间维度资源,基于 OAM 的无线光通信具有很大的潜力,值得深入研究。因此,本文将对近年来自由空间 OAM 无线光通信领域的有关研究进展进行概述。

1 OAM 通信方式及其多维度融合调制

OAM 通信方式主要有 3 种: OAM 键控 (OAM-SK)、OAM 复用(OAM-DM)和 OAM 组播(OAM-MC)。其中,OAM-SK 的基本原理是将拟调制信息序列一一映射到 OAM 模态序列上,然后在发射端产生和发射这一序列,最后在接收端接收并进行数据解调,此时,单个 OAM 态代表的数据位数为 $\log_2 N$, N 表示用于信息编码的 N 个 OAM 模态^[6]。OAM-DM 的基本原理是把 OAM 模态当做一个载波信道来承载信息,高斯光波调制完成以后,经过 OAM 产生装置,转换成具有特定模态值的 OAM 光信号,然后经过 OAM 光复用系统将多路模态值互不相等的 OAM 光信号发送至传输媒介同轴传输,最后在接收端通过 OAM 解复用装置分离不同的 OAM 载波信道后进行数据恢复^[9]。OAM-MC 的原理是将承载有信息的 OAM(例如: l_2)信号输入组播器,组播器将输入信号的功率分配到多路携有不同模态值(例如: l_1, l_3)的信道,此时,输入 OAM 信号所承载的信息将在多路 OAM 信道上传输,即利用 OAM 做载波信道,实现一对多通信^[10]。

除此之外,基于 OAM-DM 的多维度融合调制技术在提高系统频谱效率和数据传输速率方面有着明显的优势。2014 年,华中科技大学的 Jian Wang^[11]等人基于双偏振 26 路 OAM-DM,融合 8QAM-OFDM 调制和 368 路波分复用,成功实现了 1.036Pb/s 的传输容量,且频谱效率达 112.6b/s/Hz。这对深入挖掘 OAM 通信潜力,解决未来将面临的通信容量危机提供了具有前景的解决方案。

2 大气湍流下 OAM 传输特性

OAM 光信号在大气湍流下传播一定距离后,大气湍流会引发空气折射率的随机波动,从而导致光信号

出现强度闪烁、相位波动、光束扩展和漂移以及到达角起伏等不良影响,进而影响 OAM 无线光通信系统的整体性能^[2]。另外,大气湍流会严重破坏 OAM 的空间螺旋相位分布,引发功率损耗,同时还会引起 OAM 模态间串扰。因此,为了研究大气湍流下 OAM 无线光通信,必须先研究其传输特性。

2.1 大气湍流随机相位屏

大气湍流效应通常使光信号质量出现劣化。研究光在大气湍流中的传输特性,一般需要长距离条件下的光传播才能获得足够的数据,然而,室外进行的光传播实验,人力物力需求甚巨,且过程难以控制。现有研究表明:大气湍流对自由空间光传播的影响,可以等效为光信号在若干块随机相位屏间自由传播^[12,13]。目前,生成随机相位屏常用的方法主要有 3 种:功率谱反演法(傅里叶变换法)、泽尼克多项式法和分形法。

▲功率谱反演法的基本思想是:先生成一个频域内均值为 0,方差为 1 的复高斯随机数矩阵,然后用大气湍流功率谱密度函数对其进行滤波,最后进行逆傅里叶变换得到大气湍流随机相位屏^[2,14]。2014 年,太原理工大学的蔡冬梅团队基于 Kolmogorov 谱,分别研究了均匀采样和非均匀采样功率谱反演法大气湍流随机相位屏^[14]。其仿真结果表明:在采样点数量和计量条件均不变的情况下,该方法大幅度改善了功率谱反演法低频成分不足的缺陷,并且模拟精度高。2015 年,该团队针对文献[14]中方案存在计算复杂度高、计算速度慢的缺陷,基于用非均匀快速傅里叶变换对非均匀采样法进行改进,结果表明:时间复杂度可降低 800 倍之多^[15]。上述方法能够解决功率谱反演法存在低频分量不足的问题,并且时间复杂度也得到了降低。但是,人们发现,大气湍流偏离 Kolmogorov 谱的现象很多^[16],因此,上述文献所提方案对非 Kolmogorov 谱是否仍然有效,值得进一步验证。

▲泽尼克多项式法的核心思想是将波前畸变分解为圆域内正交的泽尼克多项式,其各阶多项式系数通过功率谱函数求得^[2,16,17]。2013 年,长春理工大学的佟首峰团队基于泽尼克多项式对大气湍流相位屏进行了仿真研究,其结果表明:相位屏在低频部分与理论值相符,但是高频部分仿真结果却不尽如人意^[17]。虽然可以通过增加多项式阶数的方法来弥补,但是随之而来的是模拟效率的降低和计算复杂度的增大。因此,在 OAM 无线光通信实际应用中,应加以综合考虑,选择合适方案。

▲分形法的原理是:基于大气湍流导致的畸变波前是一个分形面,利用分形布朗运动可以模拟大气湍流的畸变波前。该方法利用相位结构函数,通过插值得到随机相位屏上每一个点的函数值^[16]。2013年,蔡冬梅团队利用分形法数值模拟了符合Kolmogorov谱的大气湍流相位屏,结果显示:基于分形法所得相位屏的频率统计特性与理论值基本吻合,当相位屏增加到一定数量时,其模拟精度趋向于稳定^[18]。该方法能够有效克服功率谱反演法低频成分不足和泽尼克多项式法高频成分不足的缺陷,并且运算效率较高,但其稳定性有待提升。

2.2 OAM 传输特性

为了研究大气湍流信道特性。2014年,南京邮电大学赵生妹团队的邹丽等人使用随机相位屏模拟大气湍流研究了大气湍流折射率结构常量 C_n^2 和传输距离对OAM-DM系统的影响^[13]。其研究结果表明:随着通信距离增大,归一化接收功率随之下降,此时误码率(BER)增大;OAM模态值取值越近,大气湍流产生的效应越强,此时系统BER性能要下降2~3个数量级。同年,北京邮电大学的张晓光团队的张磊等人指出,在Kolmogorov谱条件下,当 $C_n^2=1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,传输距离为1km时,OAM-DM信道间串扰能量已经超过了OAM模态自身的能量,此时接收端信道分离受到严重影响,OAM-DM通信不能正常进行。另外,当 $C_n^2=1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时,态间间隔至少设置为3才能保证接收质量^[19]。

针对大气湍流下OAM的检测,北京邮电大学尹霄丽团队的Chang Huan等人采用空间相位扰动Gerchberg Saxton (Spatial Phase Perturbation-Gerchberg Saxton, SPP-GS)算法对GS算法进行改进以提升收敛性能,并且对比研究了基于SPP-GS算法和GS算法的波前无传感器自适应光学补偿系统。研究结果显示:当 $C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时,态间串扰分别下降了24.9dB和16.2dB^[20]。

除此之外,鉴于神经网络在图像识别方面的优势,2017年,美国海军研究室的DOSTER等人基于随机相位屏,对比研究了不同大气湍流强度下共轭检测(利用OAM不同态之间的正交性)基于卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)识别的2种OAM态检测方法^[21]。实验结果显示:CNN识别检测方案的精确度明显优于共轭检测法。同年,北京邮电大

学张民团队的Jin Li等人基于CNN设计了大气湍流信道下8进制OAM-SK的自适应解调器,该解调器无需额外的空间光调制器和数字信号处理即可将OAM-SK系统传输的信息解调出来,其结果显示:OAM模态的识别精确度高达99.14%^[22]。2018年,同一单位的田清华等研究了基于16进制OAM-SK的自由空间无线光通信系统,在强湍流下($C_n^2=4.0 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$),基于CNN的OAM模态识别率约为85.6%^[23]。

3 大气湍流效应抑制策略

针对大气湍流下OAM的波前畸变和态间串扰,国内外许多研究学者和团队对其进行了深入研究。国内方面,本节主要介绍南京邮电大学的赵生妹团队的研究情况;国外方面,主要介绍美国南加利福尼亚大学的Alan. E. Willner团队近年来在此领域的系列研究成果。

3.1 国内研究现状

相位校正方法能有效抑制大气湍流引发的OAM态间串扰。2015年,邹丽等人针对Shack-Hartmann(SH)波前校正技术对计算机处理速度要求高,不能适应快速变化的大气湍流效应引起的随机波前畸变等问题,提出了一种基于GS算法的波前畸变校正策略,该策略根据畸变OAM的幅度谱,通过GS算法迭代出类似的大气湍流随机相位,然后用畸变OAM的光相位减去这个模拟的大气湍流随机相位,从而达到校正OAM波前相位的目的^[24]。数值仿真结果表明:弱到中等湍流下,系统BER性能改善明显。然而,该方案仅针对快速变化的大气湍流模型,对于缓变大气湍流模型未做考虑。

OAM-DM与其它多载波或多信道通信一样,由于大气湍流破坏了OAM不同模态间的正交性,产生了类似于码分多址(CDMA)系统中的多址干扰问题。多用户检测(MUD)技术是消除或减弱CDMA系统中多址干扰的有效方法。基于OAM-DM模态间串扰与CDMA系统直接扩频序列的相似性,2016年,Li Zou等人基于线性解相关MUD技术研究了态间串扰策略,同比之下BER性能有2~3个数量级的改善^[25]。Lu Yang等人针对线性解相关MUD不能很好处理大气湍流信道的随机噪声的问题,提出了基于最小均方误差(MMSE)MUD技术抑制态间串扰,其仿真结果显示:系统的BER性能比线性解相关MUD技术有明显提升^[26]。上述策略不能自适应跟踪信道的随机变化,且

均要求 OAM-DM 态间串扰矩阵满秩。这在一定程度上限制了其应用范围。

在无线通信领域, 纠错编码技术是提高数字通信可靠性的有效手段, 面对大气湍流对 OAM 无线光通信造成的干扰, 其也是消除信道干扰的有效方法之一^[27]。2016 年, 赵生妹等人联合使用基于 SH 算法的自适应波前校正和信道编码技术来抑制大气湍流效应。结果显示: 其 BER 表现优于单个使用其中某一种技术, 系统能纠正较强大气湍流 ($C_n^2 = 3.6 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 以下) 造成的误码^[28]。联合使用多种抑制策略给今后大气湍流下 OAM 无线光通信的研究提供了新的思路, 然而如何去平衡在使用多种抑制策略后系统的时间和空间复杂度, 值得深入思考。

分集技术为不同衰落信道条件下的信号传输提供了有效的接收方法, 在移动通信领域, 分集是克服多径衰落的有效方法, 同时, 分集也能补偿信道衰落损耗。在不需增加传输功率和带宽的情况下, 分集可有效抑制衰落效应和多径干扰。大气湍流下 OAM-DM 无线光通信链路类似于多天线系统中的多径衰落信道^[29]。因此, 2017 年, Li Zou 等人根据这种相似性, 选择等增益合并, 研究了基于空间分集技术的大气湍流效应抑制策略^[29], 结果显示: 系统 BER 性能可提升 2~3 个数量级。然而, 该方案无法有效抑制强湍流效应。

赵生妹团队还采取了多输入多输出 (MIMO) 自适应均衡算法^[30]和最大似然检测算法^[31]作为串扰抑制策略, 在中弱湍流强度下, 二者的 BER 性能改善较为明显。除此之外, 为应对大气湍流效应, 华中科技大学的王健团队在自适应光学补偿方面^[32]、北京邮电大学的张民和田清华团队在人工神经网络方面^[22, 23]、深圳大学的陈书青团队在相干分离检测方面^[33]、河北工业大学的刘剑飞团队在联合鸡群算法与独立成分分析方法 (Chicken swarm optimization-independent component analysis, CSO-ICA) 方面^[34]以及上海大学的李迎春团队在信道估计算法方面^[35]都进行了较深入的研究, 其研究成果值得借鉴。

3.2 国际研究现状

MIMO 均衡技术在抑制少模光纤模分复用通信时产生的模式串扰问题上效果明显^[36], 由于模分复用和 OAM-DM 态间正交的类似性, 可选择 MIMO 均衡为大气湍流效应抑制策略。2013 年, Hao Huang 等人基于 4x4 的自适应 MIMO 均衡器, 辅以外差检测抑制大气湍流带来的衰落, 实验结果显示: BER 性能和信噪比 (SNR) 都有提升^[37]。

自适应光学补偿可以实时测量和校正 OAM-DM 系统的大气湍流畸变, 通常情况下, 自适应光学补偿由 3 个基本单元组成: 波前传感器、波前校正器和反馈控制器。波前传感器用于实时测量 OAM 的畸变波前, 将畸变的信息传递给反馈控制器, 反馈控制器基于波前重构算法求出畸变波前, 并产生相应的控制信号传递给波前校正器, 波前校正器根据该信号的具体内容对波前畸变做出相应的补偿^[2]。2014 年, Yongxiong Ren 等人使用高斯光束作为探针来检测波前畸变, 然后根据该信息使用波前校正算法得到需要的相位校正信息, 从而实现畸变波前的光学补偿^[38]。补偿后, 大气湍流导致的邻态间串扰下降了 12.5dB, 系统的功率损耗也下降了 11dB。同年, Yongxiong Ren 等人实现了仿真的随机大气湍流下 OAM-DM 链路的前置和后置自适应光学补偿系统, 实验结果显示: 相邻模态的功率串扰能下降 12dB 以上, 且 BER 控制在前向纠错门限以下^[39]。上述 2 种自适应光学补偿方案能够有效抑制 OAM 态间串扰, 但同时也增加了系统的复杂度。

2016 年, Yongxiong Ren 等人研究了 MIMO 均衡联合分集技术的湍流抑制效果。结果显示: 弱湍流条件下, 4x4 MIMO 均衡技术能以光学 SNR 损耗为 6dB 的代价, 有效抑制 OAM 态间串扰^[40]。通过使用空间分集辅助的数字信号处理均衡, 强湍流效应可以得到补偿, 但有 7.5dB 的功率损耗。该方案能够保证强湍流下 OAM-DM 无线光通信的通信质量, 但增加了功率损耗, 降低了 SNR, 在实际应用中应对此加以考虑。

除此之外, 美国亚利桑那州大学的 Ivan B. Djordjevic 团队在纠错编码方面^[41]、奥地利维也纳大学的 Mario Krenn 团队在人工神经网络方面^[42]也对大气湍流效应的抑制进行了研究, 效果明显, 值得参考。

综合本节所综述的内容, 本文针对大气湍流效应抑制策略国内和国际有关研究做了汇总, 具体如表 1 所示。

4 结束语

OAM 无线光通信已被证明在提高通信速率和容量, 提升通信安全性方面有着巨大的潜力。在自由空间, OAM 无线光通信完全兼容传统无线光通信的应用场景, 诸如城市住宅小区楼顶间通信、高速列车车际通信、舰船舰岸间通信和野外大型土建施工场所等中短距离点对点视频图像信息传输均可应用 OAM 无线光通信作为传输手段。

表 1 大气湍流下 OAM 无线光通信研究

研究团队	时间	$C_n^2(\text{m}^{-2/3})$	抑制策略	距离(m)	传输方式	性能表现	
赵生妹	2015	3.8×10^{-15}	波前校正 ^[24]	1000	OAM-DM	BER 下降 2~3 个数量级	
	2016	1.0×10^{-15}	线性解相关 MUD ^[25]	1000	OAM-DM	BER 下降 2~3 个数量级	
	2016	3.6×10^{-14}	波前校正+信道编码 ^[28]	1000	OAM-DM	BER 下降 2~3 个数量级	
	2017	5.0×10^{-15}	空间分集 ^[29]	1000	OAM-DM	BER 下降 2~3 个数量级	
		1.0×10^{-14}				BER 下降 1~2 个数量级	
陈书青	2017	—	相干分离检测 ^[33]	10	OAM-DM	误差矢量幅度	11.62%
				15			11.72%
				20			11.91%
				30			15.01%
李迎春	2017	9.5×10^{-15}	辅助导频	—	OAM-DM	BER 下降 1~2 个数量级	
		1.0×10^{-13}	最小二乘算法 ^[35]			BER 下降约 1 个数量级	
刘剑飞	2018	1.0×10^{-14}	CSO-ICA ^[24]	850	OAM-DM	串扰改善 3.2dB	
田清华	2018	4.0×10^{-13}	Turbo 码 ^[23]	400	OAM-SK	BER 为 4.01×10^{-4}	
Alan E. Willner	2013	—	MIMO 均衡+外差检测 ^[37]	—	OAM-DM	4.8dB 串扰时, BER 下降 2 个数量级	
						9dB 串扰时, SNR 提升 5dB	
	2014	弱到中等	自适应光学补偿 ^[38]	1000	OAM 叠加	串扰下降 12.5dB, 增益提升 5dB	
	2014	弱到中等	前置+后置光学补偿 ^[39]	1000	OAM 叠加	串扰下降 12dB	
	2016	弱	MIMO 均衡 ^[40]	1000	OAM-DM	SNR 损耗 6dB 时, BER 为 3.8×10^{-3}	
		强	MIMO 均衡+空间分集 ^[40]			功率损耗 7.5dB 时, BER 为 3.8×10^{-3}	

自由空间 OAM 无线光通信面对的主要问题是大气湍流带来的一系列问题,现有研究仍然未能很好地解决这类问题,结合本文内容,下列方向值得考虑:①目前基于 Kolmogorov 谱研究大气湍流效应抑制策略的偏多,然而现实中其统计特征并不总是与该谱相符,因此,基于非 Kolmogorov 谱的抑制策略值得进一步研究。②现有分集、MIMO 均衡和多用户检测技术未能实时跟踪湍流信道的随机特性。因此,寻求自适应、盲、智能算法等结合分集、MIMO 均衡和多用户检测技术等策略可能是抑制大气湍流效应的候选方案。③联合采用 2 种或 2 种以上抑制策略,其效果更好,但随之而来的是功率损耗会增大,系统复杂度增加,因此,如何平衡这 2 者的关系,也值得考虑。④采用人工神经网络等现代图像处理技术识别 OAM 畸变态已经显示出了一定的优势。因此,在此基础上,如何实现强湍流下的长距离 OAM 无线光通信,值得进一步研究。

参考文献:

- [1] DUSER M. A review of past, present and future optical networks optics is driving structural change [R]. Los Angeles, CA, USA, IEEE, 2011: 1–49.
- [2] 李树辉. 轨道角动量及其在光通信中的应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

- [3] FAZAL I M, AHMED N, WANG J, et al. 2Tbit/s free-space data transmission on two orthogonal orbital-angular momentum beams each carrying 25 WDM channels[J]. Optics Letters, 2012, 37(22): 4753–4755.
- [4] 黄铭, 毛福春, 曾佳, 等. 轨道角动量复用技术[J]. 中国无线电, 2013 (5): 34–36.
- [5] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, 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.
- [6] GIBSON G, COURTIAL J, MILES J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5448–5456.
- [7] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488–496.
- [8] HAO H, XIE G D, YAN Y, et al. 100 Tbits free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength[J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 197–200.
- [9] CAI H K, HUANG P, SHEN F, et al. Orbital angular momentum shift keying based optical communication system [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1–10.
- [10] YAN Y, YUE Y, Huang H, et al. Multicasting in a spatial division multiplexing system based on optical orbital angular momentum [J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3930–3933.
- [11] WANG J, LI S H, LUO M, et al. N-dimensional multiplexing link with 1.036Pbit/s transmission capacity and 112.6bit/s/Hz spectral efficiency us-

- ing OFDM-8QAM signals over 368 WDM pol-muxed 26 OAM modes[C]//2014 The European Conference on Optical Communication. Sept. 21–25, 2014, Cannes, France. Cannes: ECOC, 2014.
- [12] STRASBURG J D, HARPER W W. Impact of atmospheric turbulence on beam propagation[J]. Proc SPIE, 2004, 5413: 93–102.
- [13] 邹丽, 赵生妹, 王乐. 大气湍流对轨道角动量复用系统通信性能的影响[J]. 光子学报, 2014(9): 58–63.
- [14] 蔡冬梅, 王昆, 贾鹏, 等. 功率谱反演大气湍流随机相位屏采样方法的研究[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 231–236.
- [15] 蔡冬梅, 遆培培, 贾鹏, 等. 非均匀采样的功率谱反演大气湍流相位屏的快速模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 252–258.
- [16] 李玉杰, 朱文越, 饶瑞中. 非 Kolmogorov 大气湍流随机相位屏模拟[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 169–176.
- [17] 王奇涛, 佟首峰, 徐友会. 采用 Zernike 多项式对大气湍流相位屏的仿真和验证[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1907–1911.
- [18] 丁晓娜, 蔡冬梅, 赵圆, 等. 分形法模拟大气湍流相位屏性能分析[J]. 中国激光, 2013, 40(B12): 219–223.
- [19] 张磊, 宿晓飞, 张霞, 等. 基于 Kolmogorov 模型的大气湍流对于空间光通信轨道角动量模式串扰影响的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(B12): 20–25.
- [20] CHANG H, YIN X L, CUI X Z, et al. Adaptive optics compensation of orbital angular momentum beams with a modified gerchberg-saxton-based phase retrieval algorithm[J]. Optics Communications, 2017, 405: 271–275.
- [21] DOSTER T, WATNIK A T. Machine Learning Approach to OAM beam Demultiplexing via Convolutional Neural Networks [J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3386–3396.
- [22] LI J, ZHANG M, WANG D S. Adaptive demodulator using machine learning for orbital angular momentum shift keying [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017(17): 1455–1458.
- [23] TIAN Q H, LI Z, HU K, et al. Turbo-coded 16-ary OAM shift keying FSO communication system combining the CNN-based adaptive demodulator[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 27849–27864.
- [24] 邹丽, 王乐, 张士兵, 等. 基于波前校正的轨道角动量复用通信系统抗干扰研究[J]. 通信学报, 2015, 36(10): 76–84.
- [25] ZOU L, WANG L, ZHAO S M, et al. Turbulence mitigation scheme based on multiple-user detection in an orbital-angular-momentum multiplexed system[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(11): 1674–1056.
- [26] YANG L, ZHAO S M, ZOU L. Turbulence mitigation scheme using MMSE multiple-user detection for orbital angular momentum multiplexing communications[C]// 6th International Conference on Wireless, Mobile and Multi-Media, Nov. 20–23, 2015, Beijing, China. Beijing: ICWMMN, 2015.
- [27] DJORDJEVIC I B, ANGUI T J A, VASIC B. Error-correction coded orbital-angular-momentum modulation for FSO channels affected by turbulence[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(17): 2846–2852.
- [28] ZHAO S M, WANG L, ZOU L, et al. Both channel coding and wave-front correction on the turbulence mitigation of optical communications using orbital angular momentum multiplexing [J]. Optics Communications, 2016, 376: 92–98.
- [29] ZOU L, WANG L, ZHAO S M, et al. Tbulence mitigation scheme based on spatial diversity in orbital-angular-momentum multiplexed system [J]. Optics Communications, 2017, 400: 23–127.
- [30] ZOU L, WANG L, XING C, et al. Turbulence mitigation with MIMO equalization for orbital angular momentum multiplexing communication[C]//8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Yangzhou, China. Yangzhou: WCSP, 2016, 13–15.
- [31] WANG L, ZHAO S M, ZOU L. Efficient crosstalk mitigation of a free-space orbital angular momentum multiplexed communication link by using maximum likelihood detection [C]//Asia Communications and Photonics Conference 2016, Nov. 2–5, 2016, Wuhan, China. Wuhan: ACP, 2016.
- [32] SHI C*, LI S H*, ZHAO Y F, et al. Demonstration of 20-Gbit/s high-speed besel beam encoding/decoding link with adaptive turbulence compensation[J]. Optics Letters, 2016(20): 4680–4683.
- [33] ZHANG X K, HE Y L, CAI Y, et al. Coherent separation detection for orbital angular momentum multiplexing in free-space optical communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1–11.
- [34] XING D K, LIU J F, ZENG X Y, et al. Mitigation of crosstalk based on CSO-ICA in free space orbital angular momentum multiplexing systems[J]. Optics Communications, 2018, 423: 200–206.
- [35] SUN T F, LIU M W, LI Y C, et al. Crosstalk mitigation using pilot assisted least square algorithm in OFDM-carrying OAM multiplexed free-space-optical communication links [J]. Optics Express, 2017, 25 (21): 25707–25718.
- [36] 姚殊畅, 付松年, 张敏明, 等. 基于少模光纤的模分复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 261–268.
- [37] HUANG H, XIE G D, REN Y X, et al. 4×4 MIMO equalization to mitigate crosstalk degradation in a four-channel free-space orbital-angular-momentum multiplexed system using heterodyne detection [C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Sept. 22–26, London, UK. London: ECOC, 2013.
- [38] REN Y X, XIE G D, HUANG H, et al. Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2014(10): 2845–2848.
- [39] REN Y X, XIE G D, HUANG H. Adaptive-optics-based simultaneous pre-and post-turbulence compensation of multiple orbital-angular-momentum beams in a bidirectional free-space optical link [J]. Optica, 2014, 1(6): 376–382.
- [40] REN Y X, WANG Z, XIE G D, et al. Demonstration of OAM-based MIMO FSO link using spatial diversity and MIMO equalization for turbulence mitigation [C]//Optical Fiber Communication Conference 2016, March 20–22, 2016, Anaheim, California United States. Anaheim: OFCC, 2016.
- [41] ZHEN Q U, IVAN B. DJORDJEVIC. Two-stage cross-talk mitigation in an orbital-angular-momentum-based free-space optical communication system[J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3125–3128.
- [42] MARIO KRENN, ROBERT FICKLER, MATTHIAS FINK, et al. Communication with spatially modulated light through turbulent air across vienna[J]. New Journal of Physics, 2014, 16: 113028-1–113028-10.