

引用本文:王伟,李晓记,杜卫海,等:水下轨道角动量可见光通信研究进展[J]. 光通信技术,2019,43(5):13-18.

水下轨道角动量可见光通信研究进展

王伟^{1,2,3}, 李晓记^{1,2*}, 杜卫海^{1,2,3}, 任亚萍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)光通信的理论研究和实验探索已经逐步由自由空间转向了海洋,成为了水下可见光通信领域的研究热点。简述了有关水下 OAM 可见光通信领域的最新研究进展,包括水下 OAM 传输特性、海水信道下 OAM 可见光通信等方面的研究现状。最后,展望了水下 OAM 可见光通信的应用前景和研究趋势。

关键词:轨道角动量;可见光通信;水下

中图分类号:TN929.1 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)05-0013-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of underwater orbital angular momentum-based visible light communication

WANG Wei^{1,2,3}, LI Xiaojie^{1,2*}, DU Weihai^{1,2,3}, REN Yaping³, 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: The theoretical research and experimental exploration of orbital angular momentum (OAM)-based optical communication has gradually shifted from free space to the ocean, and has become a research hotspot in the field of underwater visible light communication. The latest research progress in the field of underwater OAM-based visible light communication is briefly described, including the underwater transmission characteristics of OAM, the research status of OAM-based visible light communication in oceanic channel and so on. Finally, the application prospects and research trends of underwater OAM-based visible communication are discussed.

Key words: orbital angular momentum; visible light communication; underwater

0 引言

随着人类在海洋领域的足迹日趋频繁,人们对应用于水下的各类无线通信技术提出了新的传输容量和速率需求^[1,2]。现有研究发现,蓝绿波段的可见光在海洋环境下传输损耗低,适宜于水下信息传输^[1-4]。因

收稿日期:2018-10-19。

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,其它科研项目1项,参加国际学术会议1次。

*通信作者:李晓记(E-mail: 46941917@qq.com)。



此,面对持续增长的水下信息传输容量需求,寻求能够适应复杂水下通信环境的新型可见光通信体制成为了当前水下通信亟待解决的问题。

基于轨道角动量(OAM)的水下可见光通信是利用光波的空间自由度来调制信息的一种可以很大程度上提高通信容量和速率的新型光通信体制。1992年,荷兰莱顿大学的 L. Allen 等人^[5]发现具有空间螺旋相位因子 $\exp(il\theta)$ 的拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束携有 OAM。每个光子携带的 OAM 为 lh ,其中 l 为拓扑荷数,其取值可以为任意整数; θ 为方向相位角; h 的值为普朗克常数除以 2π 。任意两个不同模态值的 OAM 相互正交,使得 OAM 模态适合于信息的空间复用传输。2004 年,英国格拉斯哥大学的 Gibson 等人^[6]通过实验首次基于 OAM 态进行信息编码实现了

王伟,李晓记,杜卫海,等:水下轨道角动量可见光通信研究进展

点对点无线光通信。在深入研究 OAM 本质特征、产生和接收技术的基础上,已经证明自由空间 OAM 无线光通信是一种可以提供高速率大容量的通信体制^[7]。

与自由空间 OAM 无线光通信类似,见诸于报道的水下 OAM 可见光通信方式主要有 3 种方式:OAM 键控(OAM-SK),OAM 复用(OAM-DM)和 OAM 组播(OAM-MC)。相对于传统无线光通信,无论哪一种 OAM 通信方式,都能极大地提升系统传输容量、频谱效率和安全性能^[8]。

考虑到国内外有关 OAM 光通信的综述仍然主要集中在自由空间环境,针对水下环境的相对较少。本文将概述近年来水下 OAM 可见光通信领域的有关研究进展。

1 水下 OAM 传输特性

研究水下 OAM 传输特性,可为水下 OAM 可见光信道建模提供理论基础。然而,水下信道对 OAM 产生的干扰远大于大气湍流信道^[9],海水中各种物质都会引发对光的吸收、散射以及信道衰落,尤其在海洋湍流下,会引起光束的强度闪烁、OAM 波前和相前失真,对于多 OAM 态复用传输,还会引起态间串扰问题。针对以上问题,国内外研究团队和学者进行了深入研究,本节主要介绍美国克莱姆森大学的 Eric G. Johnson 团队、西安电子科技大学郭立新团队和南京邮电大学赵生妹团队近年来在此领域内的一系列研究成果。

1.1 吸收与散射

Eric G. Johnson 团队针对吸收与散射信道做了一系列实验研究。2015 年,Baghdady Joshua 等人^[9]研究了蓝绿波段的 OAM-DM 激光在光程为 3m 的海水环境下的传输特性。实验结果表明:OAM-DM 光束可以在水下成功传播,并且水下散射环境对 OAM 空间相位分布的完整性影响甚微。同年,Kaitlyn S. Morgan 等人^[10]在光程为 3.6m 的水箱里加入抗酸剂来模拟浑浊海水,研究了波长为 532nm 的 OAM 激光束的衰减特性。实验结果显示其衰减特性曲线与高斯光束一致,分为弹道区和漫射区,并且弹道区曲线服从比尔定律。2016 年,Kaitlyn S. Morgan 等人^[11]同样使用抗酸剂模拟了光程为 0.508m 的海水环境,研究了相干 OAM 光束的传播特性,结果显示即便是相当浑浊的环境,OAM 的强度分布仍然可以清晰识别。同年,Brandon Cochenour 等人^[12]使用球形聚苯乙烯颗粒物和商用抗

酸剂模拟浑浊海水,选定光程为 3.66m,研究了选择波长为 532nm 的 OAM 激光束的衰减特性。根据其实验现象,在不同的相对衰减条件下,没有观察到时间色散与 OAM 的模式值有直接相关性。另外,该实验还发现,OAM 散射相函数的变化特性与先前有关文献[13, 14]的报道并不完全一致。

以上实验验证了 OAM 可见光在海洋环境下传播的可行性,这对于其应用于水下无线通信,藉以拓宽带宽和提升传输容量有实践参考价值和理论指导意义。

1.2 海洋湍流

1.2.1 郭立新团队研究情况

2016 年以来,西安电子科技大学郭立新团队的程明建等人围绕 OAM 在海洋湍流下的传输特性,做了一系列研究。文献 [15] 选用贝塞尔-高斯 (Bessel-Gaussian, BG) 光束,研究了基于 OAM-SK 的自由空间无线光通信链路在弱海洋湍流信道条件下的容量问题。仿真结果显示:随着通信距离的增加、OAM-SK 编码进制的减少、光束波长的变短、温度方差耗散率的变大、湍流动能耗散率的减小和温度与盐度平衡参数的增大,都会使系统的容量变小。另外,该研究还发现,由于 BG 光束的无衍射和自愈特性,其在抗海洋湍流效应方面的表现比 LG 光束更佳。文献 [16] 运用 Rytov 近似理论研究了海洋湍流下波长范围为 417~632.8nm 的部分相干 LG 光束的探测概率。取传播距离为 50m、海洋湍流强度由 $1.0 \times 10^{-14} \text{K}^2 \text{m}^{-2/3}$ 增大到 $1.0 \times 10^{-13} \text{K}^2 \text{m}^{-2/3}$ 时, OAM ($l=1$) 的探测概率由 0.72 急剧下降到了 0.38。文献[17]研究发现 LG 波束在海洋湍流下传播时,海洋湍流会引起波束能量重新分配,此时 OAM 态间必然发生串扰。随着波长的变短、温度与盐度平衡参数的增大、湍流动能耗散率的变小和温度方差耗散率的变大,导致海洋湍流效应增强, LG 波束的螺旋谱明显扩展,这与文献[15]的研究结果相符。

上述文献研究了海洋湍流下的 OAM 传输特性,研究结果表明:BG 和相干 LG 波束比 LG 波束更适用于海洋湍流信道下传播,这为海洋湍流信道下的波束选择提供了依据。

1.2.2 赵生妹团队研究情况

赵生妹团队在充分研究自由空间大气湍流信道的基础上,将研究领域拓展到了海洋湍流下 OAM 传输特性,并对此进行了仿真和实验研究。2017 年,杨天星等人^[18]选择波长为 417nm,其它参数与文献[16]一

致,以功率谱反演法建立海洋湍流随机相位屏,仿真研究了水下 OAM 传输特性,其结果显示 OAM 的探测概率与文献[16]的研究结果大体相符,从而验证了海洋湍流随机相位屏的有效性。2018 年,潘孙翔等人^[19]选定尺寸为 $1.0\text{m}\times 0.4\text{m}\times 0.4\text{m}$ 的水箱,选择波长为 532nm 的 LG 光束,通过在纯水中添加不同浓度的氯化钠来模拟不同的海水盐度,分析了不同盐度对 OAM 空间螺旋分布的扩展谱和 OAM 态间串扰的影响,研究结果显示盐度的增加和态间间隔的减小都会使 OAM 串扰更严重。同年,胡涛等人^[20]基于文献[21]所给定的海水折射率功率谱模型,选择波长为 417nm 的 LG 光束,研究了海洋湍流对 OAM 可见光通信容量的影响,仿真结果与文献[15]相符。

上述文献中,虽然验证了海洋湍流随机相位屏的有效性,但是其要求光强波动足够小,然而,这不符合海洋湍流信道的随机性,并且功率谱反演法有低频成分不足的缺陷。文献[20]虽然研究了不同盐度对 OAM 传输特性的影响,有一定的借鉴意义,但其未能在盐度随机变化方面加以研究,因而不足以有效说明湍流信道对 OAM 传输特性的影响。

1.2.3 其他团队研究情况

除以上团队外,江南大学的张逸新团队^[22]、华中科技大学的王健团队等人^[23]也对水下 OAM 传输特性进行了研究。其中,文献[22]选择埃尔米特-高斯(Hermite-Gaussian, HG)涡旋光束建立了海洋湍流的 OAM 模态探测概率密度模型,根据其研究,较长波长或横断面尺寸较大的 HG 光束更能有效抵抗海洋湍流效应。另外,相较于 LG 光束, HG 光束在各向异性海洋湍流下的有效传播距离更长。文献 [23] 选择波长为 520nm 的 OAM 激光、选定光程为 2m ,比较研究了水下气泡(由流量为 $1.8\text{L}/\text{min}$ 的商用氧气泵产生)和障碍物(用小于光束尺寸的不透明碎纸块贴在水箱壁上)对高斯光束、OAM 和贝塞尔(Bessel)光束的影响。实验结果显示:气泡对上述 3 种光束的影响并无明显二致,均会导致大约 4dB 的功率波动。由于 Bessel 光束的无衍射特性,其越障能力最佳,其次是 OAM 光束,最后为 HG 光束。

上述文献研究并比较了若干种波束在海洋信道下的传输特性,这对于如何选取适宜海洋信道的 OAM 波束有一定的参考价值。然而,海洋作为一种随机变化且十分复杂的传播介质,上述研究仍难以全面有效说明水下 OAM 传输特性,因此,水下 OAM 的传输特性仍然值得进一步研究。

2 水下 OAM 可见光通信研究现状

水下 OAM 可见光通信已经成为了水下考古、水下救援和水下军事通信等点对点大容量、高速率和短距离通信的重要候选方案^[1, 24-26, 30]。当前,已有若干团队和研究学者做了一系列的实验和仿真研究,在吸收和散射信道方面研究的团队主要有美国克莱姆森大学的 Eric G. Johnson 团队;在海洋湍流信道方面主要研究的团队主要有南加利福尼亚大学的 Alan. E. Willner 团队、西安电子科技大学王平团队和北京邮电大学尹霄丽团队。

2.1 吸收和散射信道

2016 年以来, Eric G. Johnson 团队的 Baghdady Joshua 等人针对水下信道对基于 OAM-DM 的水下可见光通信进行了深入研究,包括纯净水、纯净海水和近海岸海水等 3 种信道环境。除此之外,该团队还基于 OAM-DM 联合偏振复用持续提升了通信速率。其中,文献[24]采用 GaN 激光二极管输出 2 路激光,研究了水下 OAM-DM ($l=\pm 8$) 可见光通信系统,实验结果表明链路传输速率越高误码率上升越明显。文献[25]通过光纤尾纤激光二极管产生激光,采用非归零开关键控调制,研究了信道衰减系数从 $0.00875/\text{m}$ (纯净水)到 $0.4128/\text{m}$ (近海岸海水)的 OAM-DM ($l=\pm 8$) 的水下可见光通信系统,其速率达 $3\text{Gb}/\text{s}$,平均误码率为 2.073×10^{-4} 。文献[26]采用 GaN 激光二极管产生激光,研究了纯净海水(衰减系数为 $0.0425/\text{m}$)到近海岸海水(衰减系数为 $0.3853/\text{m}$)的信道下的 OAM-DM ($l=\pm 8$) 可见光通信系统,通信速率可达 $2.5\text{Gb}/\text{s}$,平均误码率为 2.13×10^{-4} 。2017 年, J. K. Miller 等人^[27]采用 GaN 激光器产生激光,研究了基于双偏振复用联合 OAM-DM ($l=\pm 4, \pm 8$) 水下多维度融合调制可见光通信系统,系统总传输速率高达 $12\text{Gb}/\text{s}$,误码率为 2.06×10^{-4} 。

以上 4 个实验证明了 OAM 水下可见光通信系统的可行性,为 OAM 应用于水下可见光通信探索了前进的方向,而且其误码率远在前向纠错门限(FEC)以下,这也从通信性能方面佐证了 OAM 应用于水下高速率短距离通信有广阔的前景。然而, Eric G. Johnson 团队仅考虑了海水信道的散射与吸收,未能进一步研究海洋湍流对 OAM 可见光通信的影响,而且其信号调制方式采用的是开关键控,这不利于频谱资源的有效利用。

2.2 海洋湍流信道

2.2.1 Alan. E. Willner 团队研究情况

Alan. E. Willner 团队主要研究了复杂水下信道下

王伟,李晓记,杜卫海,等:水下轨道角动量可见光通信研究进展

OAM-DM 可见光通信系统的性能及其湍流抑制策略。2016 年,Long Li 等人^[28]研究了基于 2×2 恒模均衡算法(CMA)的热致折射率不均匀信道下的水下 OAM-DM 可见光通信系统,研究结果表明平均和最大误码率都在 FEC 门限以下。同年,Yongxiong Ren 等人^[29]基于波长为 520nm 的激光,研究了 OAM-DM ($l=\pm 1, \pm 3$) 可见光通信系统在散射、水流和温度梯度引发的湍流信道环境下的性能表现,实验结果表明水体造成的功率损耗小于 2.5dB。然而,上述 3 种因素综合作用造成接收功率波动高达 9.5dB,且接收误码率均在 5.0×10^{-3} 以上。文献[30]先采用波长为 1064nm 的红外光调制 10Gb/s 的开关控制信号,然后通过倍频处理将其变成波长为 532nm 的绿光,并基于此设计了 OAM-DM ($l=\pm 1, \pm 3$) 水下可见光通信系统;研究了纯水、均匀分布的微颗粒物(每 30L 纯水加入 1.5mL 浓度为 0.5% 的氢氧化镁溶液)、水流(使用 3 个循环泵对光路进行扰动,水流速度为 26.8L/min)和热梯度诱发的湍流(光路的非均匀热梯度为 0.2°C) 等水下信道环境对 OAM-DM 信号的影响。针对 OAM 态 ($l=\pm 1, \pm 3$),该实验的纯水链路几乎对 OAM 模态无损;水流链路对 OAM 环形强度分布有轻微损耗,约为 2.2dB;针对有均匀分布的微颗粒物的链路,OAM 的强度衰减也很小,仅为 4.5dB。

海洋湍流是水下光通信链路不得不面对的重大议题,因此,文献[30]在研究水下信道的基础上,采用基于 CMA 的多信道均衡技术研究了由热梯度导致的子信道间串扰问题。实验研究结果显示:未采用湍流抑制手段时,接收功率和串扰功率的波动范围分别达到 4.5dB 和 12.5dB;采用该抑制策略后,误码率控制在 FEC 门限以下。

该团队的实验研究大幅度提升了传输速率,且充分考虑了复杂水下信道,尤其是考虑了温度致湍流所引发的 OAM 态间串扰及其抑制策略。然而,盐度的随机变化这一关键性因素却未做充分考虑和研究。因此,海洋湍流信道下的 OAM 可见光通信仍需要充分研究。

2.2.2 其他团队研究情况

2017 年,王平团队的 Wei Wang 等人^[31]基于 Rytov 近似理论,仿真了海洋湍流下 OAM-SK 可见光通信系统。其研究包括 OAM 能量的损耗及其态间迁移、接收端有效信号能量与 OAM 模态值的关系和 OAM-SK 的调制阶数与误符号率和信道容量之间的关系。研究结果表明:在弱海洋湍流下,通信距离为 30m 时,邻态间能量迁移率较低,OAM 能量损耗率也较低,有效信号

能量保持率在 80% 以上,调制阶数越大,误符号率性能越佳,信道容量越大。此时,可以通过增大 OAM-SK 调制阶数来提升系统容量和误符号率性能。然而,随着海洋湍流的增强,其剩余能量几乎与迁移到邻态的能量相当,此时基于 OAM-SK 的通信无法进行,调制阶数的增加可能会引起误符号率性能的下降,同等信噪比条件下,意味着需要增加发射功率来保证误符号率性能,因此,如何平衡这二者的关系至关重要。

鉴于传统的 OAM 模态识别和检测方法有其局限性(例如效率低下和检测器对光束漂移十分敏感等),采用卷积神经网络(CNN)识别强度分布的新型检测方法有实现简便、处理程序少、精确度高和造价低廉的优势,且其应用于大气湍流下 OAM-SK 解码器时性能优越^[32]。据此,2018 年,尹霄丽团队的 Xiaozhou Cui 等人^[33]针对海洋湍流效应,使用海洋随机相位屏模型,基于 CNN 识别 OAM 叠加态的强度分布,设计了水下 OAM-SK 系统的解码器并研究了其检测精确度。仿真结果显示:在弱到中等海洋湍流下,通信距离为 100m 以内时,基于 CNN 的解码器有出色的表现,OAM 模态检测的精确度超过了 90%。

水下 OAM-MC 可见光通信也可作为潜艇和多个水下航行器之间、海洋环境监测系统的控制中心与多个传感器之间通信的候选手段^[34]。2017 年,华中科技大学王健团队的 Yifan Zhao 等人^[34]研究了水下 OAM-MC ($l=\pm 3, \pm 6$) 一对四可见光通信系统。该研究检测到小于 6dB 的 OAM-MC 信道间串扰和其它随机干扰,同时,信号链路的损耗约为 2dB,误码率为 1×10^{-3} 。另外,2018 年,Andong Wang 等人^[35]实验研究了基于 OAM 的自适应水下到自由空间再到水下的信息传输,研究发现,水面相对高度的波动会严重影响到发射和接收器的校准,从而严重影响到 OAM 光束的接收质量。于是,他们在水面上方安装一个可调光学反射器件,从而自适应校准接收器对光 OAM 信号的捕获,实现对水面波动干扰的有效抑制。

上述文献的结果为下一步研究提供了方向和思路。然而,文献[31, 33]虽然对海洋湍流下 OAM-SK 可见光通信系统的性能做了较为全面的分析,但其没有涉及通信速率这个重要议题。文献[34, 35]拓展了水下 OAM 可见光通信的应用领域,然而其考虑的信道环境相对简单。因此,海洋信道下 OAM 可见光通信的通信距离、速率、容量和可靠性等议题亟待深入研究。

本文针对水下 OAM 可见光通信的国内外研究做了汇总,具体情况如表 1 所示。

表 1 水下 OAM 可见光通信研究

研究团队	时间	水下信道类型	波长 (nm)	速率 (Gb/s)	距离 (m)	通信方式	误码(符号)率
Eric G. Johnson	2016 ^[24]	纯水	448	2.0	2.96	OAM-DM	2.24×10^{-8}
				3.0			1.76×10^{-4}
	2016 ^[25]	近岸海水	445	3.0	2.96	OAM-DM	2.073×10^{-4}
	2016 ^[26]	近岸海水	448	2.5	2.96	OAM-DM	2.13×10^{-4}
	2017 ^[27]	纯水	448	8.0	3.0	OAM-DM	2.07×10^{-4}
				12.0			2.06×10^{-4}
Alan. E. Willner	2016 ^[28]	热致湍流	520	2.0	1.2	OAM-DM	CMA 均衡后, FEC 门限以下
	2016 ^[29]	非湍流	520	4.0	1.2	OAM-DM	—
		温度梯度致湍流					5.0×10^{-3} 以上
	2016 ^[30]	温度梯度致湍流	532	40.0	1.2	OAM-DM	$7.4 \times 10^{-5} \sim 1.7 \times 10^{-2}$ 均衡后, FEC 门限以下
王平	2017 ^[31]	弱湍流	417	—	30	OAM-SK	与调制阶数、湍流强度、信噪比相关
尹霄丽	2018 ^[33]	弱到中等湍流	532	—	<100	OAM-SK	—
王健	2017 ^[34]	纯水	520	1.5	2	OAM-MC	1.0×10^{-3}
	2018 ^[35]	水 - 空气 - 水	520	1.08	—	—	FEC 门限以下

3 结束语

从自由空间到水下, OAM 光通信在提高频谱效率和信道容量方面均体现出了相当的优势, 水下 OAM 可见光通信有着广阔的应用前景, 点对点、一点对多点等大容量高速率短距离通信场景都可选择其作为候选通信手段。

然而, 海洋的特殊环境复杂而多变, 现有关于水下 OAM 可见光通信的研究都还只是停留在模拟简单的海水信道或者基于随机相位屏模拟海洋湍流信道的层面; 基于 OAM-DM 的水下可见光通信所采用的调制方式也趋于简单; 无论是实验还是仿真, 现有关于水下 OAM 可见光通信的研究, 其通信距离都相对较短; 由于信息传输环境的影响, 水下 OAM 光束的捕获、跟踪和瞄准也是值得注意的问题。因此, 在结合本文文献总结的基础上, 如下问题值得考虑:

①在现有研究基础之上, 持续对水下 OAM 可见光通信进行信道建模, 为其后续的深入研究和逐渐走向实际应用奠定理论基础。

②海洋湍流始终是水下 OAM 可见光通信面临的重大议题, OAM 可见光信号在其中传播时衰落十分明显, 集中表现在其对 OAM 空间相位分布的干扰和引起的 OAM 态间串扰。因此, 必须采取若干湍流效应

抑制策略以保证 OAM 可见光通信的质量。孔径平均、自适应光学补偿、自适应多进多出 (MIMO) 均衡和数字信号处理技术等都可能解决海洋湍流的干扰的措施。

③多维度融合调制技术在自由空间已经得到了成功应用, 文献[27]佐证了偏振复用联合 OAM-DM 可以使系统传输速率倍增。因此, 基于 OAM-DM 联合光波的偏振、波长和振幅等信息调制资源进行多维度融合调制, 具有极大的系统容量提升空间。

④通信系统的稳健性, 例如信号的捕获、瞄准和跟踪也是必须要面对的问题, 水下 OAM 可见光通信也不例外, 目前, 该领域的研究很少涉及这一方面。因此, 如何采取有效措施实现对水下 OAM 可见光信号接收的自适应校准也是值得深入思考的问题。

参考文献:

- [1] WILLNER A E, ZHAO Z, REN Y X, et al. Underwater optical communications using orbital angular momentum-based spatial division multiplexing [J]. Optics Communications, 2018, 408: 21–25.
- [2] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication [J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518–1547.
- [3] LIU W H, XU Z Y, YANG L Q. SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence [J]. Photonics Research, 2015, 3(3): 48–53.
- [4] BAYKAL Y. Higher order mode laser beam intensity fluctuations in

王伟, 李晓记, 杜卫海, 等: 水下轨道角动量可见光通信研究进展

strong oceanic turbulence [J]. Optics Communications, 2017, 390: 72–75.

[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, PADGETT M, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5448–5456.

[7] HUANG H, XIE G D, YAN Y, et al. 100Tbits free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength [J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 197–200.

[8] 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.

[9] BAGHDAY J, BYRD M, LI W Z, et al. Spatial multiplexing for blue lasers for undersea communications: Proceedings of SPIE [C]. Cardiff: SPIE, 2015.

[10] MORGAN K S, JOHNSON E G, COCHENOUR B M. Attenuation of beams with orbital angular momentum for underwater communication systems [C]// OCEANS 2015 - MTS/IEEE, Oct. 19–22, 2015, Washington, USA. Washington: IEEE, 2015.

[11] MORGAN K S, MILLER J K, LI W, et al. Propagation and dynamic manipulation of coherent orbital-angular-momentum modes through underwater turbid environments [C]// OCEANS 2016 - MTS/IEEE, Sept.19–23, 2016, Monterey, CA, USA. Monterey: IEEE, 2016.

[12] COCHENOUR B, MORGAN K, MILLER K, et al. Propagation of modulated optical beams carrying orbital angular momentum in turbid water [J]. Applied Optics, 2016, 55(31): 2155–2165.

[13] WANG W B, GOZALI R, SHI L, et al. Deep transmission of Laguerre-Gaussian vortex beams through turbid scattering media [J]. Optics Letter, 2016, 41(9): 2069–2072.

[14] SUN W B, HU Y X, WEIMER C, et al. A FDTD solution of scattering of laser beam with orbital angular momentum by dielectric particles: Far-field characteristics [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 188: 200–213.

[15] CHENG M, GUO L, LI J, et al. Channel capacity of the OAM-Based free-space optical communication links with bessel-gauss beams in turbulent ocean [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–11.

[16] CHENG MINGJIAN, GUO LIXIN, LI JIANGTING, et al. Propagation of an Optical Vortex Carried by a Partially Coherent Laguerre-Gaussian Beam in Turbulent Ocean [J]. Applied Optics, 2016, 55(17): 4642–4648.

[17] 程明建, 郭立新, 张逸新. 拉盖尔-高斯波束在弱湍流海洋中轨道角动量传输特性变化 [J]. 电波科学学报, 2016, 31(4): 737–742.

[18] 杨天星, 赵生妹. 海洋湍流随机相位屏模型 [J]. 光学学报, 2017 (12): 1–6.

[19] 潘孙翔, 赵生妹, 王乐, 等. 水下轨道角动量态传输特性的实验研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 72–77.

[20] 胡涛, 潘孙翔, 王乐, 等. 水下湍流对轨道角动量通信系统信道容量的影响 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(4): 499–506.

[21] NIKISHOV V V. Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index [J]. International Journal of Fluid Mechanics Research,

2000, 27(1): 82–98.

[22] LI Y, YU L, ZHANG Y X. Influence of anisotropic turbulence on the orbital angular momentum modes of Hermite-Gaussian vortex beam in the ocean [J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12203–12215.

[23] ZHAO Y F, WANG A D, ZHU L, et al. Performance evaluation of underwater optical communications using spatial modes subjected to bubbles and obstructions [J]. Optics Letters, 2017, 42(22): 4699–4702.

[24] JOSHUA B, KEITH M, KAITLYN M, et al. Underwater optical communication link using Orbital Angular Momentum space division multiplexing [C]// OCEANS 2016 - MTS/IEEE, Sept.19–23, 2016, Monterey, CA, USA. Monterey: IEEE, 2016.

[25] JOSHUA B, KEITH M, KAITLYN M, et al. Multi-gigab/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing [J]. Optics Express, 2016, 24 (9): 9794–9805.

[26] JOSHUA B, KEITH M, SEAN O, et al. Blue-light digital communication in underwater environments utilizing orbital angular momentum: Proceedings of SPIE [C]. Cardiff: SPIE, 2016.

[27] MILLER J K, MORGAN K S, LI W, et al. Underwater optical communication link using polarization division multiplexing and orbital angular momentum multiplexing [C]// OCEANS 2017, Sept. 18–21, 2017, Anchorage, AK, USA. Anchorage: IEEE, 2017.

[28] LI L, REN Y X, CAO Y W, et al. CMA Equalization for a 2 Gb/s Orbital Angular Momentum Multiplexed Optical Underwater Link through Thermally Induced Refractive Index Inhomogeneity [C]// 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 5–10, 2016, San Jose, CA, USA. San Jose: IEEE, 2016.

[29] REN Y X, LI L, ZHAO Z, et al. 4Gb/s Underwater Optical Transmission Using OAM Multiplexing and Directly Modulated Green Laser [C]// 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 5–10, 2016, San Jose, CA, USA. San Jose: IEEE, 2016.

[30] REN Y X, LI L, ZHAO Z, et al. Orbital Angular Momentum-based Space Division Multiplexing for High-capacity Underwater Optical Communications [J]. Scientific Reports, 2016(6): 33306-1–33306-10.

[31] WANG W, WANG P, CAO T, et al. Performance Investigation of Underwater Wireless Optical Communication System Using M-ary OAMSK Modulation Over Oceanic Turbulence [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9 (5): 1–15.

[32] LI J, ZHANG M, WANG D S. Adaptive Demodulator Using Machine Learning for Orbital Angular Momentum Shift Keying [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(17): 1455–1458.

[33] CUI X Z, YIN X L, CHANG H, et al. Analysis of an adaptive orbital angular momentum shift keying decoder based on machine learning under oceanic turbulence channels [J]. Optics Communications. 2018, 429: 138–143.

[34] ZHAO Y F, XU J, WANG A D, et al. Demonstration of Data-Carrying Orbital Angular Momentum-based Underwater Wireless Optical Multicasting Link [J]. Optics Express. 2017, 25 (23): 28743–28751.

[35] WANG A D, ZHU L, ZHAO Y F, et al. Adaptive water-air-water data information transfer using orbital angular momentum [J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8669–8678.