

doi:10.3788/gzxb20184711.1106003

# 基于空间分集的海洋无线光通信轨道角动量复用系统的性能

尹霄丽, 孙志雯, 崔小舟, 郑子健, 陈小政, 郭翊麟, 廖焕宇, 刘光耀

(北京邮电大学 电子工程学院 天地互联与融合北京市重点实验室, 北京 100876)

**摘 要:**为了解决水下通信轨道角动量复用系统中海洋湍流引起的信号串扰,基于空间分集技术提出了一种海洋湍流缓解方案.用随机相位屏法模拟海洋湍流对信号产生的相位扰动,用分步传输法模拟光束的衍射传播,在接收端使用等增益分集合并技术对信号进行合并处理.系统采用 4 路轨道角动量复用 8 路空间分集,仿真分析了轨道角动量复用集合、海洋湍流强度和传输距离等因素对系统误码率性能的影响.仿真结果表明,轨道角动量复用集合的模式间隔从 1 增加到 2,误码率降低较为明显;随着模式间隔继续增大,误码率性能改善有限;误码率随传输距离和湍流强度的增加而增大.结果证明在海洋光通信系统中使用分集合并技术可以有效缓解湍流对信号传输的影响.

**关键词:**无线通信技术;湍流缓解;复用系统;等增益分集合并;海洋湍流;轨道角动量;传输距离;误码率  
**中图分类号:**TN929.12;O436 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2018)11-1106003-8

## Performance of Oceanic Wireless Optical Communication Systems Based on Orbital Angular Momentum Multiplexing with Spatial Diversity

YIN Xiao-li, SUN Zhi-wen, CUI Xiao-zhou, ZHENG Zi-jian, CHEN Xiao-zheng,  
GUO Yi-lin, LIAO Huan-yu, LIU Guang-yao

(Beijing Key Laboratory of Space-Ground Interconnection and Convergence, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In oceanic wireless optical communication systems based on orbital angular momentum multiplexing, oceanic turbulence will bring the channel crosstalk. To solve the problem of channel crosstalk, a spatial diversity mitigation scheme is proposed. Random phase screen method is used to simulate phase perturbation caused by ocean turbulence and split-step transmission method is used to simulate the beam diffraction. Equal gain diversity combination is used to process signal at the receiver. 4-orbital angular momentum-multiplexed channels and 8-spatial diversity are used in the system. The influences of orbital angular momentum mode sets, oceanic turbulence strength and communication distance on the bit-error rate are investigated. Simulation results show that bit error rates decrease obviously with the modes spacing increases from 1 to 2 in the orbital angular momentum multiplexed sets. Performances of bit-error rates remain steady as modes spacing become larger. Bit-error rate will also increase with the increasing transmission distance and turbulence strength. Results show using diversity combination on orbital angular momentum-multiplexed systems can effectively mitigate the performance degradation from oceanic turbulence.

**Key words:** Wireless communications technology; Turbulence mitigation; Multiplexing system; Equal gain spatial diversity combination; Oceanic turbulence; Orbital angular momentum; Transmission distance; Bit error rate

**OCIS Codes:** 060.4510; 010.4450; 010.4455; 010.7060

基金项目:国家自然科学基金(No.61575027)和北京邮电大学博士创新基金(Nos.CX2018212, CX2018213)资助

第一作者:尹霄丽(1970-),女,副教授,博士,主要研究方向为无线光通信. Email:yinxl@bupt.edu.cn.

收稿日期:2018-06-15;录用日期:2018-09-06

## 0 引言

随着环境监测、水下勘探和近海油田勘探等水下工作的不断发展,人们对高速、大容量水下通信系统的需求日益增加<sup>[1]</sup>.传统的声学 and 射频通信由于带宽窄、衰减大等因素,难以满足目前对水下通信的需求<sup>[1-3]</sup>.由于施工难度大、无法连接移动终端等因素,光纤通信等有线通信技术在深海难以实现.在海洋信道中,无线光通信相较于传统声学、射频通信,具有信道容量高、带宽大和延迟低的优势;相较于光纤通信,具有更好的可操作性,因而在海洋通信等领域中具有巨大的应用前景<sup>[2-4]</sup>.

携带不同轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)模式数的涡旋光束是相互正交的,且在理论上模式数可以取到无穷大,将携带不同 OAM 模式的光束用于复用传输可有效提高通信系统的容量<sup>[5-6]</sup>.2016年,BAGHDADY J等在 2.96 m 水下无线光通信链路实现了 3 Gbit/s 的 2 路 OAM 空间复用传输实验<sup>[7]</sup>.然而,轨道角动量的正交性基于光束的相位结构,海洋湍流会使光束相位发生扰动,从而破坏 OAM 态间的正交性,导致复用信道间发生串扰,使得误码率增大、信道容量降低<sup>[8]</sup>.

空间分集技术将信号在多个信道中分别传输并在接收端进行信号合并处理,该技术可以有效缓解信道串扰以减小误码率<sup>[9-10]</sup>.LI Long 等在 1.2 m 的水箱实现了 2 Gbit/s 的  $2 \times 2$  分集接收<sup>[11]</sup>;REN Yong-xiong 等实现了 1.2 m 水箱中 4 Gbit/s 的轨道角动量-空间分集接收<sup>[12]</sup>,证明了空间分集可显著提升水下轨道角动量复用系统的性能.然而,这些实验受限于水箱的尺寸,无法有效反映海洋通信距离和海洋湍流强度等对系统性能的影响.

本文研究 OAM 复用海洋光通信系统的串扰缓解问题,提出利用分集合并技术降低系统误码率的方法并加以仿真验证.

## 1 海洋湍流信道 OAM 复用空间分集链路

图 1 为基于空间分集的 OAM 复用海洋无线光通信系统结构.

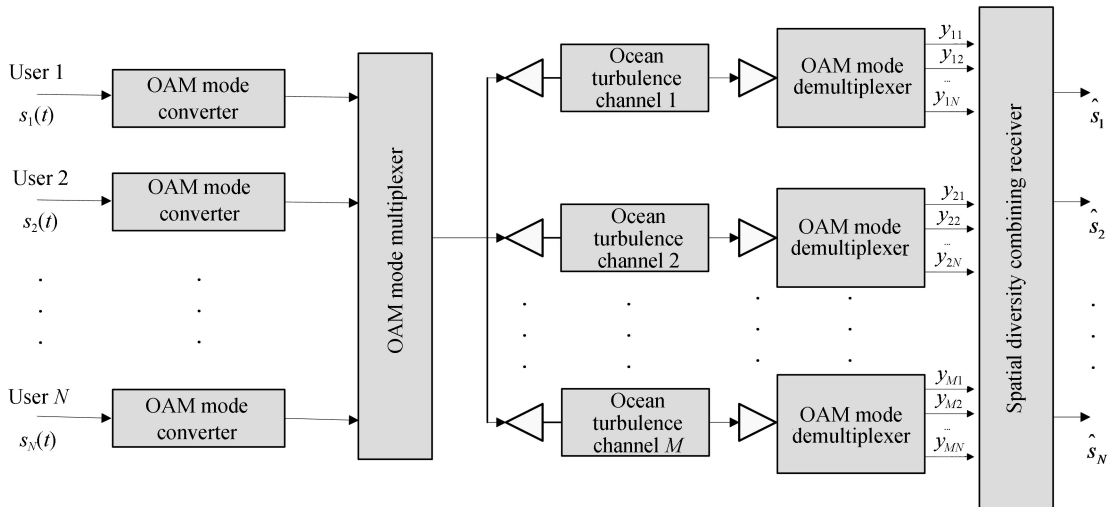


图 1 基于空间分集的海洋无线光通信轨道角动量复用系统框图

Fig.1 Oceanic wireless optical communication OAM multiplexed system based on spatial diversity

在输入端,首先将每个用户的信息  $s_n(t)$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$  调制到高斯光载波上,再利用不同的 OAM 模式转换器加载 OAM 模式  $l_n$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ .  $N$  个具有不同 OAM 模式的光束经过 OAM 模式复用器复用后,分成  $M$  路信号分别在不同的海洋信道进行传输.

OAM 复用信号经过海洋湍流信道传输时,由于海洋湍流的作用会发生模式串扰,假定  $M$  个湍流信道的折射率波动的空间功率谱具有独立同分布的特性,即当发射机/接收机孔径间距离大于弗里德参数时,从不同的发射机孔中发出的光束产生的湍流效应可以被认为是独立的和不相关的<sup>[13]</sup>.

在接收端, $M$  路叠加态光束分别被  $M$  个接收机接收.在第  $m$ ,  $m \in \{1, 2, \dots, M\}$  个接收机,叠加态光束通过 OAM 解复用器得到  $N$  路信号  $y_{m,1}, y_{m,2}, \dots, y_{m,N}$ .对  $M$  路相同 OAM 态的信号进行合并处理,得到  $N$

个输出用户信号  $\hat{s}_n(t)$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ .

### 1.1 OAM 复用

作为一种常见的携带 OAM 的涡旋光束,拉盖尔高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束具有螺旋相位项  $\exp(i l \phi)$ ,其中  $l$  为轨道角动量模式数, $\phi$  为方位角变量.令径向指数为 0,在柱坐标系  $(r, \phi, z)$  中,沿  $z$  轴方向传播的 LG 光束的复振幅可表示为<sup>[14-15]</sup>

$$u_l(r, \phi, z) = R_l(r, z) \exp(i l \phi) \quad (1)$$

式中,  $R_l(r, z)$  为径向基函数,可表示为

$$R_l(r, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi |l|!} \frac{1}{\omega(z)}} \exp\left\{-\left[\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right]\right\} \left[\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)}\right]^{|l|} \times \exp\left\{i(|l|+1)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right) - i\left[\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right]\frac{z}{z_R}\right\} \quad (2)$$

式中,  $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}$ ,  $\omega_0$  是束腰半径,  $z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$  是瑞利距离,  $\lambda$  是波长.

根据 OAM 模式间的正交性可以将具有不同 OAM 模式的光束复用传输,叠加态光束可表示为

$$u_m(r, \phi, z=0; t) = \sum_{n=1}^N s_n(t) u_{l_n}(r, \phi, z=0) \quad m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (3)$$

式中  $s_n(t)$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$  表示第  $n$  个用户的信息,  $u_{l_n}$  表示 OAM 模式为  $l_n$  的光束.

### 1.2 海洋湍流信道仿真模型

OAM 光束在海洋中传输会受到很多因素的影响,其中最主要的影响来自于海洋湍流,会造成 OAM 模间串扰.综合考虑海水的温度、盐度、折射率起伏等因素,NIKISHOV 提出了海洋湍流折射率波动的空间功率谱模型,其在均匀各向同性海水中可表示为<sup>[16]</sup>

$$\Phi_n(\kappa) = 0.388 C_n^2 \kappa^{-11/3} [1 + 2.35 (\kappa \eta)^{2/3}] \times [\exp(-A_T \delta) + \omega^{-2} \exp(-A_S \delta) - 2\omega^{-1} \exp(-A_{TS} \delta)] \quad (4)$$

式中,  $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$ ,  $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$ ,  $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ ,  $\delta = 8.284 (\kappa \eta)^{4/3} + 12.978 (\kappa \eta)^2$ ;  $\omega$  为温度和盐度波动相对强度指数,其值从 0 变化到 -5,其中 0 代表海洋湍流完全由盐度波动主导, -5 代表完全由温度波动主导;  $C_n^2$  表示等效温度结构参数,  $\kappa$  是折射率波动的空间角频率,  $\epsilon$  是每单位流体的湍流能耗散率,从海洋表面到深水层的取值范围为  $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3 \sim 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3$ ,  $\eta$  是柯尔莫哥诺夫尺度.

海洋湍流对光束传输的影响可近似为相位扰动,使用随机相位屏进行模拟.随机相位屏分布是反映海洋湍流折射率波动的随机复域值,在数值仿真时可用复数矩阵表示<sup>[16]</sup>.基于功率谱反演法的相位屏产生方法是:首先生成一个复高斯随机矩阵,然后利用海洋湍流相位扰动的功率谱函数对其进行滤波,最后通过傅里叶逆变换获得相位屏<sup>[16]</sup>.

基于式(4)描述的海洋湍流折射率波动的空间功率谱模型,采用文献[16]中介绍的随机相位屏法模拟海洋湍流对信号产生的相位扰动,用分步传输法模拟光束的传播.将  $u_{l_i}(r, \phi, z)$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  经过湍流信道进行仿真传输,得到第  $m$  个信道的输出信号记为  $v_{m,i}(r, \phi, z)$ .为了衡量海洋湍流中信道间复振幅串扰的比例,引入信道转移矩阵,这是一个  $N \times N$  维方阵.根据文献[14],元素  $\eta_{m,i,j}$  ( $i \neq j$ ) 表示 OAM 态  $l_j$  对 OAM 态  $l_i$  形成串扰的复振幅,  $\eta_{m,i,i}$  表示发射 OAM 态  $l_i$  接收到的比例.对于信道  $m$ ,  $\eta_{m,i,j}$  可表示为

$$\eta_{m,i,j} = \frac{\iint v_{m,i}(r, \phi, z) \cdot u_{l_j}^*(r, \phi, z) r dr d\phi}{\sqrt{\sum_{k=1}^N \left| \iint v_{m,i}(r, \phi, z) \cdot u_{l_k}^*(r, \phi, z) r dr d\phi \right|^2}} \quad (5)$$

式中,  $u_{l_i}^*(r, \phi, z)$  表示 OAM 模式数为  $l_i$  的 LG 光束  $u_{l_i}(r, \phi, z)$  的共轭光场.

利用信道转移矩阵,可以得到经过信道  $m$  ( $m \in 1, 2, 3 \dots M$ ) 的接收信号矩阵,即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{m,1}(t) \\ \mathbf{y}_{m,2}(t) \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{m,N}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{m,1,1} & \eta_{m,1,2} & \cdots & \eta_{m,1,N} \\ \eta_{m,2,1} & \eta_{m,2,2} & \cdots & \eta_{m,2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \eta_{m,N,1} & \eta_{m,N,2} & \cdots & \eta_{m,N,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1(t) \\ \mathbf{s}_2(t) \\ \vdots \\ \mathbf{s}_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{m,1}(t) \\ \mathbf{n}_{m,2}(t) \\ \vdots \\ \mathbf{n}_{m,N}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $[\mathbf{s}_1(t), \mathbf{s}_2(t), \dots, \mathbf{s}_N(t)]^T$  是  $N$  路输入信号矩阵,  $[\mathbf{y}_{m,1}(t), \mathbf{y}_{m,2}(t), \dots, \mathbf{y}_{m,N}(t)]^T$  是第  $m$  个接收机的  $N$  路输出信号矩阵.  $[\mathbf{n}_{m,1}(t), \mathbf{n}_{m,2}(t), \dots, \mathbf{n}_{m,N}(t)]^T$  为第  $m$  个接收机对  $N$  个输出信号的高斯噪声矩阵.

通过分集合并来缓解海洋湍流带来的串扰<sup>[9]</sup>. 目前的分集合并技术主要有等增益合并(Equal Gain Combining, EGC), 选择性合并以及最大比合并. 从降低误码率的效果上看, 等增益合并优于选择性合并, 最大比合并略优于等增益合并<sup>[17]</sup>. 考虑到最大比合并算法的复杂性, 采用等增益分集合并, 得到的输出信号矩阵为

$$\hat{\mathbf{s}}_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{y}_{m,n} \quad n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

式中,  $M$  为信道总数.

## 2 系统性能仿真和分析

对使用 4QAM 调制的多路信号进行 4-OAM 复用、8 路空间分集的仿真, 并对仿真结果进行分析, 研究 OAM 复用集合、海洋湍流信道等对系统星座图、误码率的影响. 仿真中设置柯尔莫哥诺夫尺度为  $10^{-3}$  m, 湍流动能耗散率  $\epsilon$  为  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>, 温度和盐度波动相对强度指数  $\omega$  为 -5. 每个信道使用 11 个随机相位屏模拟海洋湍流, 随机相位屏的像素数为  $N \times N$ ,  $N$  为 1 024. 未有特殊要求时, 传输距离选为 30 m, 等效湍流强度选为  $10^{-15}$  K<sup>2</sup>m<sup>-2/3</sup>.

分集技术对信号的改善效果可以直观体现在星座图的变化上. 图 2 给出了等效温度结构参数为  $C_n^2 = 10^{-16}$  K<sup>2</sup>m<sup>-2/3</sup> (弱湍流)、信噪比为 5 dB (低信噪比) 情况下未使用 (单路信号  $l=1$ ) 和使用分集合并算法后的星座图. 从图中可以看出, 在湍流较弱的情况下, 系统性能主要受系统信噪比影响, 分集合并使得星座图各部分更加集中.

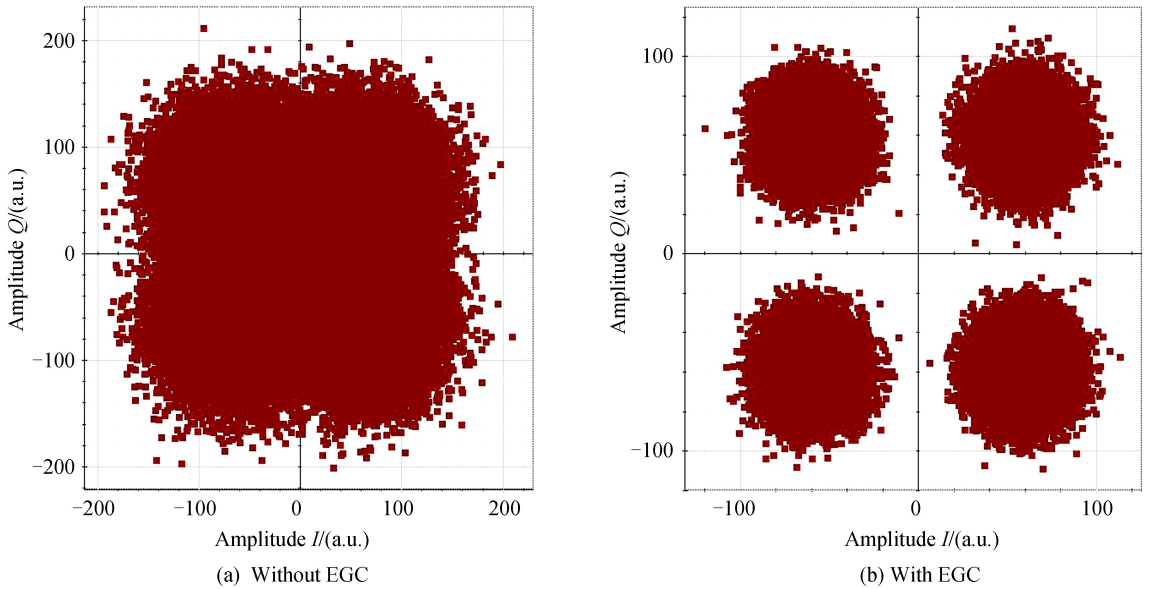


图 2 低信噪比、弱湍流条件下单路信号和分集合并后信号的星座图  
Fig.2 Constellation with and without spatial diversity in low SNR and weak turbulence

为了观察湍流强度对星座图的影响, 图 3 给出了在等效温度结构参数为  $C_n^2 = 10^{-15}$  K<sup>2</sup>m<sup>-2/3</sup> (中等湍流)、信噪比为 15 dB (较高信噪比) 的情况下未使用 (单路信号  $l=1$ ) 和使用分集合并算法的星座图, 该情况下星座图主要受湍流变化影响. 从图中可以看出, 信号集中分布在主、次对角线上. 此时由于信噪比较高, 系统性能主要受海洋湍流影响, 分集合并使得星座图各部分易于区分.

光束在海洋湍流中传输时, 对较大 OAM 态的探测概率要大于对较小 OAM 态的探测概率, 且 OAM 态对其临近态的串扰最为强烈<sup>[18]</sup>. 所以, 在 OAM 复用系统对 OAM 复用态集合的选取十分重要. 选取 4 种 OAM 复用态集合来研究 OAM 模式间隔对系统性能的影响, Set 1~Set 4 分别表示集合  $\{1, 2, 3, 4\}$ 、 $\{1, 3, 5, 7\}$ 、 $\{1, 4, 7, 10\}$  和  $\{1, 5, 9, 13\}$ . 图 4 展示了不同 OAM 复用态集合的系统在中等湍流 ( $C_n^2 = 10^{-15}$  K<sup>2</sup>m<sup>-2/3</sup>)、传输距离为 10 m 情况下使用与未使用分集合并技术的系统误码率随信噪比的变化趋势. 从图中可以看出, 对 4 种 OAM 复用态集合使用分集技术后误码率均得到显著降低; 对于单路信号 ( $l=1$ ), 模



式间隔从 1 增加到 2, 误码率降低较为明显; 随着模式间隔继续增大, 误码率性能改善有限。

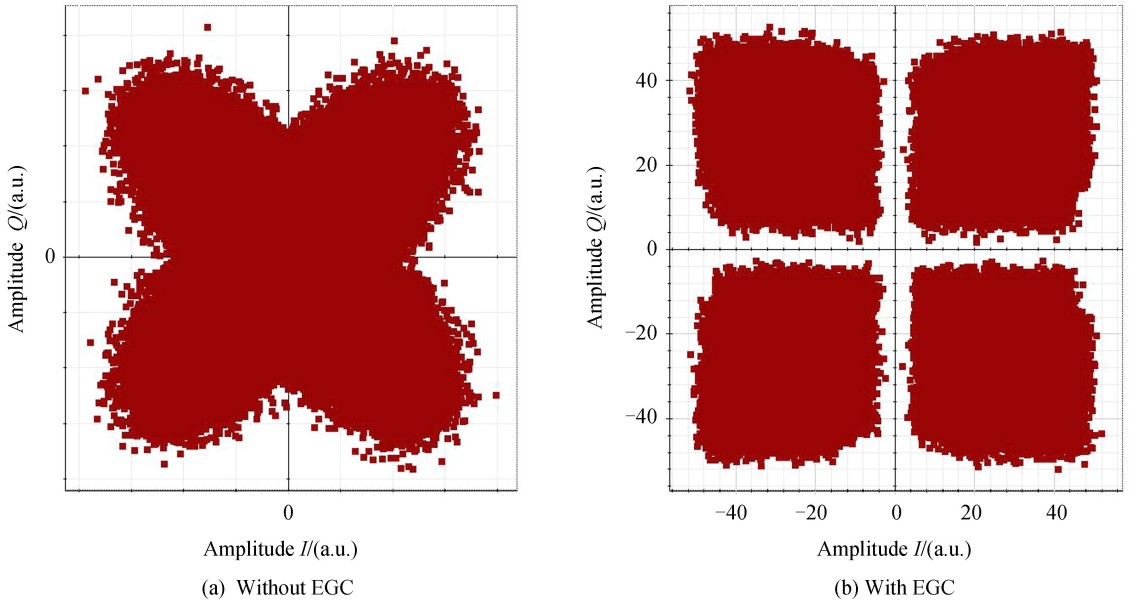


图 3 高信噪比、强湍流条件下单路信号和分集合并后信号的星座图

Fig.3 Constellation with and without spatial diversity in high SNR and strong turbulence

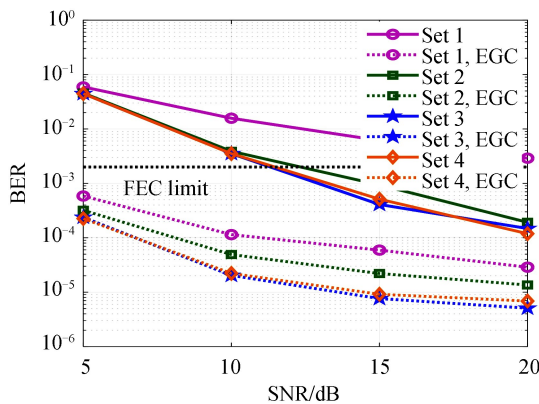


图 4 中等湍流 ( $C_n^2 = 10^{-15} \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$ ) 下不同 OAM 态集合误码率随信噪比变化趋势

Fig.4 The tendency of BER in different OAM modes changing with SNR in moderate intensity of turbulence ( $C_n^2 = 10^{-15} \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$ )

为定量研究分集合并技术对海洋湍流影响的改善效果, 分别研究在不同湍流情况、不同传输距离下系统的误码率性能, OAM 复用态集合选为  $\{1, 3, 5, 7\}$ . 图 5(a) 为  $C_n^2 = 10^{-16} \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$  (弱湍流) 条件下不同传输距离的误码率随信噪比变化趋势. 可以看出, 弱湍流情况下, 提高系统信噪比可显著降低误码率. 系统信噪比为 5~10 dB 时, 单路传输误码率在前向纠错编码 (Forward Error Correction, FEC) 容限以上, 而经过分集合并后的信号可以低于 FEC 容限<sup>[19]</sup>. 在不同传输距离 (10 m, 30 m, 50 m) 下, 分集合并后的误码率均可以降低约两个量级。

图 5(b) 为  $C_n^2 = 10^{-15} \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$  (中等湍流) 条件下, 不同传输距离 (10 m, 15 m, 30 m) 的误码率随信噪比变化趋势. 可以看出, 在传输距离为 10 m 时, 系统信噪比提升可显著降低误码率; 系统信噪比为 5~13 dB 时, 分集合并可以使系统误码率降低到 FEC 容限以下; 在传输距离为 15 m 时, 系统性能主要受湍流引起的串扰的影响, 单路信号始终不能低于 FEC 容限, 分集合并后的信号误码率均可低于 FEC 容限; 在传输距离为 30 m 时, 分集合并对系统误码率性能有较明显提升, 但无法使其低于 FEC 容限. 分集合并可大大减小中等强度较短距离湍流信道下的误码率 (可降低 1~2 个数量级), 对较长距离的中等湍流误码率也有较好改善 (可以降低大约 1 个数量级), 但无法低于 FEC 容限。

图 5(c)为  $C_n^2=10^{-14} \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$  (强湍流)下误码率随信噪比变化趋势.可以看出,强湍流严重影响了系统误码率性能,在极短距离(2 m)下,单路信号的误码率高于 FEC 容限,分集合并技术可以有效降低误码率,信噪比大于 10 dB 情况下,分集合并可以将误码率降到 FEC 门限以下;分集技术的有效距离缩短到了几米的范围.

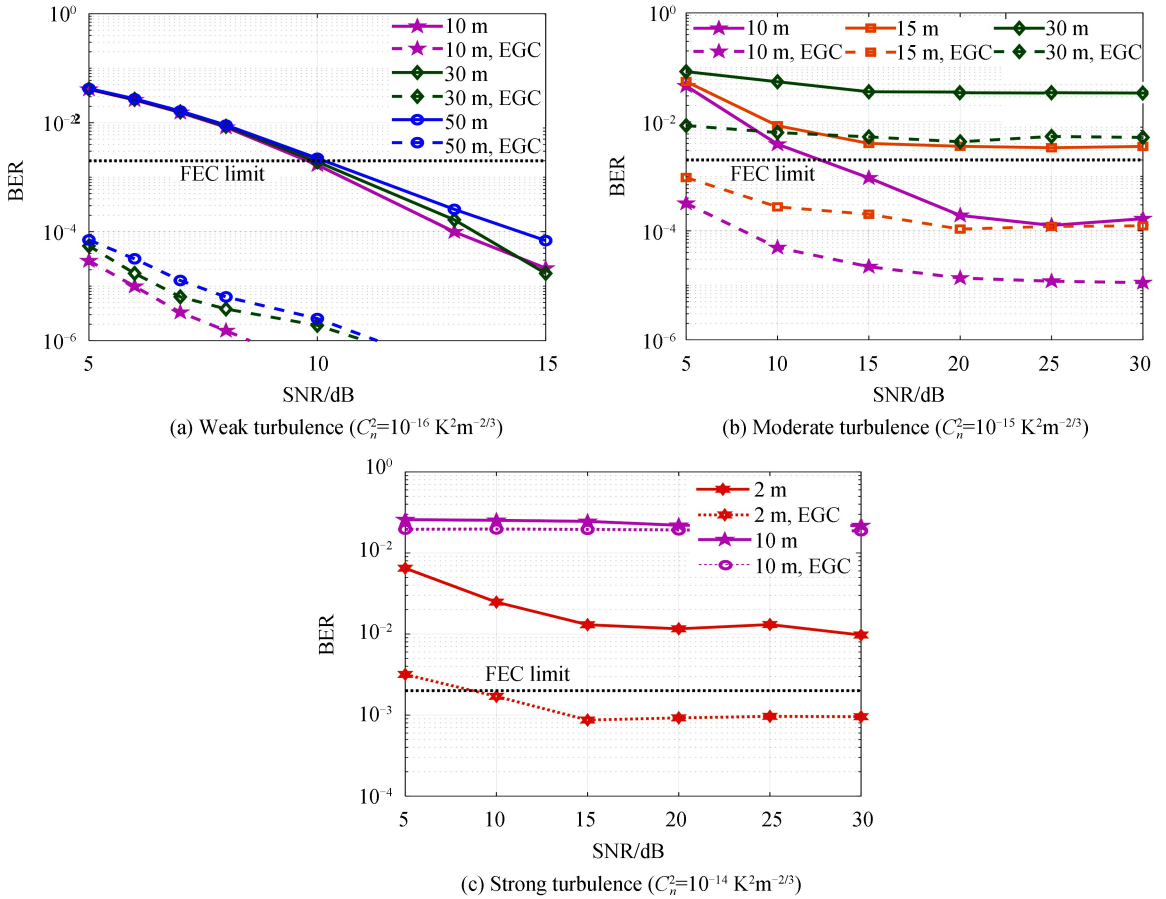
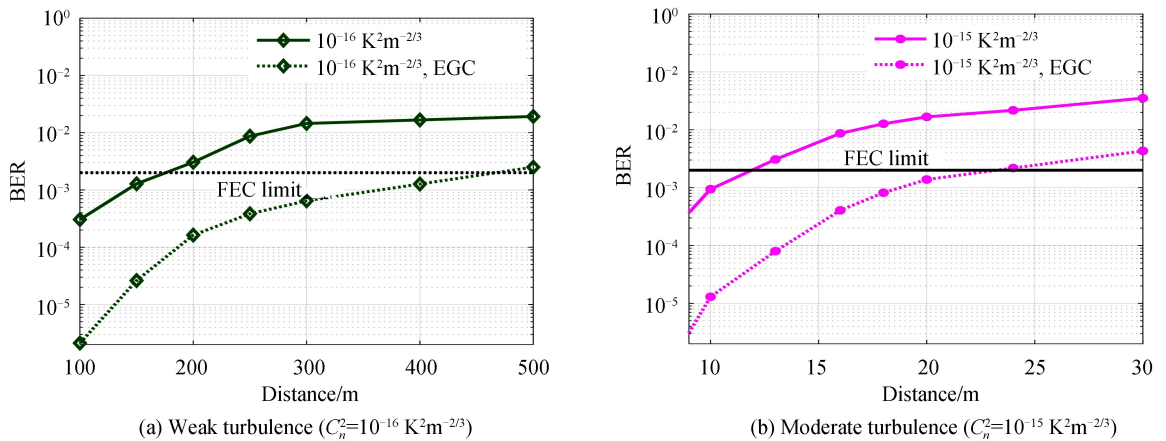


图 5 不同强度湍流下的误码率随信噪比变化趋势

Fig.5 The tendency of BER changing with SNR in different intensity of turbulence

图 6 模拟了强、中、弱三种湍流强度下单路信号( $l=1$ )和分集合并信号的误码率随距离变化的趋势,其中 OAM 复用集合为  $\{1, 3, 5, 7\}$ ,信噪比为 20 dB.

从图 6 可以看出,误码率均随传输距离的增加而增大,分集合并技术可有效改善系统的误码率性能,提高了误码率低于FEC容限的最大传输距离(FEC距离).弱湍流强度( $C_n^2=10^{-16} \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$ )下,未使用分集的



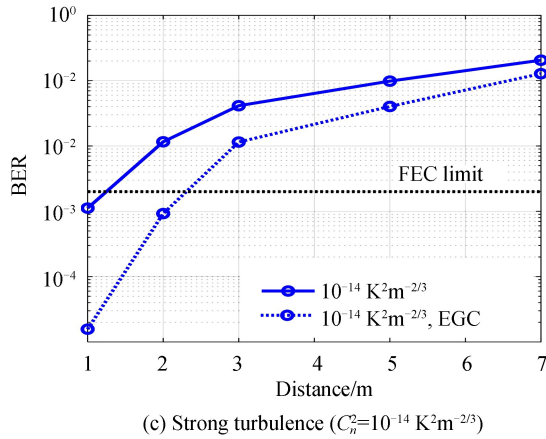


图6 不同强度湍流下的误码率随距离变化趋势

Fig.6 The tendency of BER changing with distance in different intensity of turbulence

FEC 距离约为 160 m,使用分集的 FEC 距离提高了大约 2 倍;中等湍流强度 ( $C_n^2 = 10^{-15} \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$ ) 下,未使用分集的 FEC 距离约为 12 m,使用分集的 FEC 距离提高了大约 1 倍;较强湍流强度 ( $C_n^2 = 10^{-14} \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$ ) 下,未使用分集的 FEC 距离约为 1.2 m,使用分集的 FEC 距离提高了大约 0.8 倍。

### 3 结论

本文提出基于等增益分集合并的海洋无线光通信 OAM 复用系统串扰缓解方案.基于海洋湍流折射率波动的空间功率谱模型,利用随机相位屏法仿真研究了 OAM 光束在海洋湍流信道的传输性能,并搭建了 4 路 OAM 复用 8 路空间分集系统的仿真模型,研究了 OAM 复用集合、海洋湍流强度和传输距离等因素对系统误码率性能的影响.仿真结果表明,模式间隔从 1 增加到 2,误码率降低较为明显;随着模式间隔继续增大,误码率性能改善有限;误码率随传输距离和湍流强度的增加而增大;不同信道条件下,利用等增益分集合并技术均可以较有效地改善系统的误码率性能.该研究结果可为海洋湍流信道中基于 OAM 复用的无线光通信系统的理论研究提供参考。

#### 参考文献

- [1] KHALIGHI M A, GABRIEL C, HAMZA T, *et al.* Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges[C]. Graz: International Conference on Transparent Optical Networks, IEEE, 2016; **46**(11): 1-4.
- [2] MOORADIAN G. Undersea laser communications is a “game-changer” for the US navy, so how do we make the promise a reality? [C]. Seattle: Photonics Society Summer Topical Meeting Series, IEEE, 2012: 71-72.
- [3] LACOVARA P. High-bandwidth underwater communications[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, **42**(1): 93-102.
- [4] WILLNER A E, ZHAO Z, REN Y, *et al.* Underwater optical communications using orbital angular momentum-based spatial division multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2017, 408.
- [5] ZOU Li, ZHAO Sheng-mei, WANG Le. The effects of atmospheric turbulence on the orbital angular momentum-multiplexed system. [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0901001.  
邹丽, 赵生妹, 王乐. 大气湍流对轨道角动量态复用系统通信性能的影响[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0901001.
- [6] 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 & Optical Physics*, 1992, **45**(11): 8185.
- [7] BAGHDADY J, MILLER K, MORGAN K, *et al.* Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(9): 9794.
- [8] BAGHDADY J, KELLY J, MILLER K, *et al.* Underwater optical communication link using orbital angular momentum space division multiplexing[C]. Monterey: Oceans, IEEE, 2016: 1-4.
- [9] ZOU Li, WANG Le, ZHAO Sheng-mei. Turbulence mitigation scheme based on spatial diversity in orbital-angular-momentum multiplexed system[J]. *Optics Communications*, 2017, **400**: 123-127.
- [10] CLARK M V, GREENSTEIN L J, KENNEDY W K, *et al.* MMSE diversity combining for wide-band digital cellular radio[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1992, **40**(6): 1128-1135.
- [11] LI Long, REN Yong-xiong, CAO Yin-wen, *et al.* CMA equalization for a 2 Gb/s orbital angular momentum multiplexed optical underwater link through thermally induced refractive index inhomogeneity[C]. San Jose: Lasers and

- Electro-Optics, IEEE, 2016: SW1F.2.
- [12] REN Yong-xiong, LI Long, WANG Zhe, *et al.* Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 33306.
- [13] REN Yong-xiong, WANG Zhe, XIE Guo-dong, *et al.* Atmospheric turbulence mitigation in an OAM-based MIMO free-space optical link using spatial diversity combined with MIMO equalization[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(11): 2406-2409.
- [14] GIBSON G, COURTIAL J, VASNETSOV M, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(22): 5448-5456.
- [15] ANGUIA 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*, 2015, **47**(13): 2414-2429.
- [16] YANG Tian-xing, ZHAO Sheng-mei. Random phase screen model of ocean turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(12): 1201001.  
杨天星, 赵生妹. 海洋湍流随机相位屏模型[J]. 光学学报, 2017, **37**(12): 1201001.
- [17] LENG Jiao-feng, HAO Shi-qi, QU Fu-qi, *et al.* Combination of spatial diversity coherent receivers for wireless optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 50-55.  
冷蛟锋, 郝士琦, 瞿福琪, 等. 无线相干光通信空间分集接收合并技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(1): 50-55.
- [18] CHENG Ming-jian, GUO Li-xin, LI Jiang-ting. Channel capacity of the OAM-based free-space optical communication links with Bessel-Gauss beams in turbulent ocean[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **8**(1): 1-11.
- [19] YIN Xiao-li, SANG Hong-qing, CUI Xiao-zhou, *et al.* Offset tolerance of an orbital angular momentum optical communication system with angular deflection[J]. *Optics Communications*, 2017, **393**: 34-39.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61575027), BUPT Excellent Ph.D. Students Foundation (Nos. CX2018212, CX2018213)

引用格式: YIN Xiao-li, SUN Zhi-wen, CUI Xiao-zhou, *et al.* Performance of Oceanic Wireless Optical Communication Systems Based on Orbital Angular Momentum Multiplexing with Spatial Diversity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1106003  
尹霄丽, 孙志雯, 崔小舟, 等. 基于空间分集的海洋无线光通信轨道角动量复用系统的性能[J]. 光子学报, 2018, **47**(11): 1106003