

基于空时编码的轨道角动量复用海洋无线光通信系统的传输特性仿真

尹霄丽, 郑桐, 孙志雯, 张兆元

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 为了解决轨道角动量复用水下无线光通信系统中海洋湍流引起的信道串扰问题, 对空时编码技术在该系统中的应用进行了研究。基于 Rytov 近似, 利用协方差法和插值法产生了具有相关性的随机相位屏, 模拟了时变的海洋湍流信道对轨道角动量信号的影响, 仿真分析了采用空时编码的轨道角动量复用光通信系统传输特性、时变湍流屏的相位结构函数以及轨道角动量光束经时变仿真信道后的探测概率分布, 仿真结果符合理论预期。仿真结果显示利用空时编码技术能够有效降低海洋湍流对系统误比特率的影响。

关键词: 轨道角动量; 海洋湍流; 时变信道仿真; 空时编码

中图分类号: TN929.12; O436

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020253

Simulation of transmission characteristics of oceanic wireless optical communication systems based on orbital angular momentum multiplexing with space-time coding

YIN Xiaoli, ZHENG Tong, SUN Zhiwen, ZHANG Zhaoyuan

School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China

Abstract: In order to mitigate the crosstalk caused by oceanic turbulence in the underwater wireless orbital angular momentum multiplexing optical communication system, the application of space-time coding technology in the system was studied. Based on Rytov approximation, the covariance method and interpolation method were used to simulate correlated random phase screens and then the influence of time-varying oceanic turbulence channel on orbital angular momentum signal was studied. The transmission characteristics of orbital angular momentum multiplexing optical communication system with space-time coding was analyzed by simulation. The phase structure function of the time-varying phase screens and the detection probability distribution of the beam carrying the orbital angular momentum through the time-varying simulation channel were in line with theoretical expectations. The simulation results show that the space-time coding technology can effectively mitigate the influence of ocean turbulence on the system bit error rate.

Key words: orbital angular momentum, oceanic turbulence, time-varying channel simulation, space-time coding

1 引言

随着环境监测、水下勘探、海上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越来越大。水声通信速率低、带宽窄等

无法满足日益增长的带宽需求。光纤通信等有线通信技术在水中施工困难且难以连接移动终端。相比之下, 水下无线光通信(UWOC, underwater wireless optical communication)具有信道容量大、带宽大、时延小的优点, 在海洋通信等领域有着巨大的应用

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61575027, No.62071062); 北京市自然科学基金资助项目(No.4192041)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61575027, No.62071062), The Natural Science Foundation of Beijing Municipality(No.4192041)

前景^[1]。

通过调制光的偏振和波长等自由度可以提高水下无线光通信的传输速率^[2]。轨道角动量 (OAM, orbital angular momentum) 是具有螺旋相位波前的涡旋光束携带的一种新的自由度^[3], 具有不同 OAM 模式数的涡旋光束之间相互正交, 利用 OAM 进行复用可以有效增大信道容量^[4]。2016 年, 文献[5]在 2.96 m 的距离上搭建了 UWOC 链路, 采用 2 路 OAM 进行复用, 以 3 Gbit/s 的速率进行传输, 达到了误码率为 2.073×10^{-4} 的测试结果。同年, 文献[6]使用 4 路 OAM 复用, 在 1.2 m 的水箱中达到了 40 Gbit/s 的传输速率。此外, 文献[7]研究携带不同 OAM 模式的 1 GHz 的信号在 3.66 m 的浑浊水体中传输, 发现模式越大的涡旋光束由于具有更细的光环分布, 在浑浊水体传输具有更好的穿透性。

由于受到太阳、月亮、与大气的接触面以及地热等因素的影响, 海洋中时刻存在大的漩涡向更小的漩涡转化, 直至动能耗散成热能^[8], 形成了海洋湍流。海洋湍流带来的折射率波动会对水下光束传输造成扰动, 从而破坏 OAM 态间的正交性, 导致多路复用信道之间的串扰, 进而降低系统的误码率性能^[9]。空时编码技术是一种抗信道衰落和提高系统容量的编码方法, 已有研究表明将空时编码用在无线光通信中可有效抑制湍流效应和提高系统信道容量^[10-13]。

目前研究涡旋光束在湍流信道中传输特性的常见方法是用多块随机相位屏进行仿真分析。现有方法中不同时刻相位屏的分布是利用相互独立的随机数计算产生的, 没有考虑湍流信道在时域上的变化, 仿真中 2 个相邻符号通过的湍流屏被认为是相互独立的, 无法体现 2 个时刻信道间的相关性^[14], 需要一种可以体现海洋湍流信道时变特性的仿真模型。

本文研究空时编码在 OAM 复用 UWOC 系统中的应用, 提出了一种基于协方差法和插值法的海洋湍流时变信道仿真方法, 建立了海洋湍流时变信道模型, 利用数值仿真的方法分析了系统的传输特性, 以及空时编码技术对系统误比特率的改善情况。

2 海洋湍流时变信道建模

基于 Rytov 近似, 弱海洋湍流对光束传播的影响被认为是一种纯相位扰动^[15], 因此可以通过分步传输法用多块随机相位屏模拟海洋湍流信道对光

束的影响^[16-18]。这里首先用海洋湍流相位扰动的空间功率谱函数得到初始时刻的随机相位屏, 接着基于湍流的 Greenwood 时间常数提出使用协方差法扩展原相位屏, 最后通过插值法获得连续多帧相位屏, 构成海洋湍流时变信道模型。

2.1 海洋湍流折射率波动的空间功率谱函数

基于湍流折射率波动的空间功率谱, 随机相位屏的空间分布 $\varphi(x, y)$ 可由功率谱反演法^[19]或 Zernike 多项式法^[20]等计算得到。Nikishov 提出了一个涉及温度、盐度、折射率波动等因素的海洋湍流折射率波动的空间功率谱模型, 可表示^[21]为

$$\Phi_n(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} \varepsilon^{-\frac{1}{3}} \kappa^{-\frac{11}{3}} \left[1 + 2.35(\kappa\eta)^{\frac{2}{3}} \right] \chi_T \left[\exp(-A_T \delta) + \omega^{-2} \exp(-A_S \delta) - 2\omega^{-1} \exp(-A_{T_S} \delta) \right] \quad (1)$$

其中, ω 是温度-盐度梯度率, 其值为 $-5 \sim 0$, 其中 0 表示海洋湍流完全由盐度梯度驱动主导, 而 -5 表示海洋湍流由温度梯度驱动主导; κ 是折射率波动的空间角频率; η 是海洋湍流的内尺度; ε 是单位流体的湍流动能耗散率, 反映海洋湍流起伏的强度, 从海洋表面到深水的取值范围是 $10^{-1} \sim 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3$; χ_T 是均方温度耗散率, 反映温度的波动对海洋湍流的影响, 从海洋表面到深水的取值范围是 $10^{-4} \sim 10^{-10} \text{ K}^2/\text{s}$ 。通过大量实验测得其他参数为 $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_{T_S} = 9.341 \times 10^{-3}$, $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{\frac{4}{3}} + 12.978(\kappa\eta)^2$ ^[19]。

2.2 海洋湍流的 Greenwood 时间常数

式(1)的空间功率谱模型反映了湍流带来的折射率波动在空间上的随机分布特性, 但无法体现折射率波动随时间变化的情况。

Greenwood 时间常数是衡量湍流变化速率的一个测度, 指湍流结构可近似地认为不变的时间间隔^[22], 它越小, 表征湍流扰动越强。由球面波等效折射率结构常数 $C_n^2(z)$ ^[23]和 Nikishov 海洋湍流折射率波动功率谱模型, 可得到弱海洋湍流信道的 Greenwood 时间常数^[21]为

$$\tau_0 = \frac{\left[2.91k^2 \int_0^L C_n^2(z) dz \right]^{\frac{3}{5}}}{v} \quad (2)$$

其中, v 表示横向海水流速, k 表示光束的波数, L 表示光束传播距离。式(2)在湍流各项参数不随传输

距离改变的情况下有效。在弱海洋湍流条件下，GreenWood 时间常数取值一般为几十毫秒^[24]。在传输速率为 1 Gbit/s 时，2 个相邻符号的发送时间间隔远小于 GreenWood 时间常数，此时可以认为湍流结构基本不变，根据 Taylor 湍流冻结假设^[25]，在 GreenWood 时间常数范围内湍流被视为在空间中冻结。

2.3 协方差法产生下一时刻相位屏

设在垂直于光束传播路径的平面上，海水在 x 和 y 方向上的流速分别为 v_x 和 v_y ，忽略沿光束传播路径上流速分量对相位屏的影响，当时间间隔 τ 小于 GreenWood 时间常数 τ_0 时，第 i 块相位屏的分布在时刻 $t_0 + \tau$ 与时刻 t_0 的分布关系为

$$\varphi_{i, t_0+\tau}(x, y) = \varphi_{i, t_0}(x + v_x \tau, y + v_y \tau), \tau \leq \tau_0 \quad (3)$$

设 $\varphi_{i, t_0}(x, y)$ 是一个 N 行 N 列的复矩阵上任意元素，以此表示一个有 $N \times N$ 个像素离散化的相位屏，设相位屏的长和宽均为 D m，则像素尺寸为 $d = \frac{D}{N}$ 。图 1 为由 $\varphi_{i, t_0}(x, y)$ 产生下一时刻相位屏 $\varphi_{i, t_0+\tau}(x, y)$ 的方法示意。

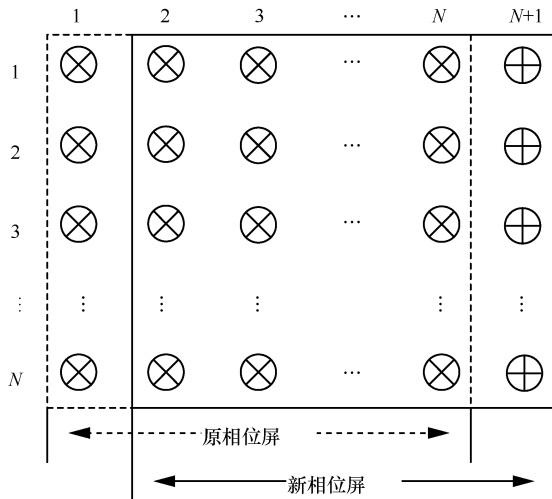


图 1 $\varphi_{i, t_0}(x, y)$ 产生下一时刻相位屏示意

为了描述简单起见，图 1 中假设 $v_x = \frac{d}{\tau}$, $v_y = 0$ ，此时下一时刻的相位屏 $\varphi_{i, t_0+\tau}(x, y)$ 相对 $\varphi_{i, t_0}(x, y)$ 向左移动了一列。在此情况下， $\varphi_{i, t_0}(x, y)$ 产生新的一列添加到屏的右侧，并去掉最左侧一列，可得到新屏 $\varphi_{i, t_0+\tau}(x, y)$ 。同理可得其他 v_x, v_y 条件下的 $\varphi_{i, t_0+\tau}(x, y)$ 。

考虑到随机相位屏的空间相关性，新的一列 X 可经由原相位屏上与 X 相邻的 N_{col} 个列 T ，再引入与原有随机相位屏相同统计特性的随机性，通过协方差法计算得到，如图 2 所示。

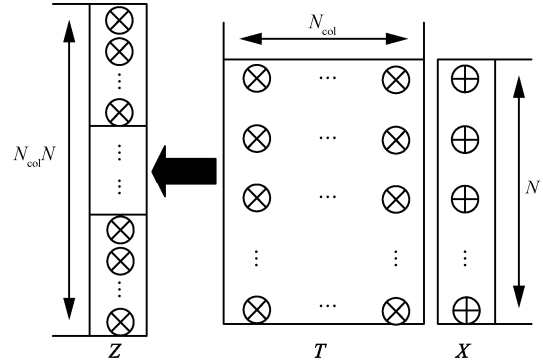


图 2 X 的计算

将原相位屏的最右侧 N_{col} 列 T 中的元素放入长为 $N_{\text{col}}N$ 的列向量 Z 中，则 Z 和需要生成的列 X 存在关系^[26]，如式(4)所示。

$$X = AZ + B\beta \quad (4)$$

其中， β 是一个由 N 个独立随机变量组成的列向量，由于湍流的相位是零均值且具有高斯统计特性，因此 $\langle \beta \rangle = 0$ 且 $\langle \beta\beta^T \rangle$ 等于单位矩阵。这里用维度为 $N \times (N \times N_{\text{col}})$ 的复矩阵 A 和维度为 $N \times N$ 的复矩阵 B 作为计算使用的辅助矩阵，用于引入海洋湍流对应的统计特性。考虑到 β 和 Z 不相关，可得

$$A = \langle XZ^T \rangle \langle ZZ^T \rangle^{-1} \quad (5)$$

$$BB^T = \langle XX^T \rangle - A \langle ZX^T \rangle \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以看出，只要得到矩阵 $\langle ZZ^T \rangle$ 、 $\langle XZ^T \rangle$ 和 $\langle XX^T \rangle$ ，就能计算出矩阵 A 和 BB^T ，其中 BB^T 是一个对称矩阵，可以通过奇异值分解的方法得到 B 。矩阵 $\langle ZZ^T \rangle$ 、 $\langle XZ^T \rangle$ 和 $\langle XX^T \rangle$ 是屏上各点间的相位协方差，可以通过随机相位屏的相位结构函数 $D_\varphi(r)$ 计算得到。根据式(3)的湍流折射率波动的空间功率谱 $\Phi_n(\kappa)$ ，可以得到相位结构函数 $D_\varphi(r)$ 的理论表达式^[27]为

$$D_\varphi(r) = 2 \times \left[\frac{1 - L^2 (1.84\omega^2 - 40.341\omega + 2077)}{3.063 \times 10^{-7} k^2 (1.116\omega^2 - 2.235\omega + 1.119)} \right] \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (7)$$

其中， L 为光束传播路径长度， r 为屏上两点间的

实际距离， r_0 为海洋湍流的相干长度，表示^[28]为

$$r_0 = \left[3.603 \times 10^{-7} k^2 L \varepsilon^{-\frac{1}{2}} \frac{\chi_T}{2\omega^2} (1.116\omega^2 - 2.235\omega + 1.119) \right]^{\frac{5}{3}} \quad (8)$$

($r_0 \gg \eta$)

$D_\varphi(r)$ 与相位协方差函数 $C_\varphi(r) = \langle \varphi(x)\varphi(x+r) \rangle$ 具有如式(9)所示关系^[26]。

$$D_\varphi(r) = 2[\sigma_\varphi^2 - C_\varphi(r)] \quad (9)$$

其中， σ_φ^2 为随机相位屏的方差，可通过 $\varphi(x)$ 计算得到。再根据式(7)给出的 $D_\varphi(r)$ ，由式(9)即可计算得到相位协方差函数 $C_\varphi(r)$ 。

2.4 插值法计算两时刻间多帧相位屏

为了模拟出海洋湍流随机相位屏在时间段 ($t_0 \sim t_0 + \tau$) 随时间的连续变化，对相位屏 $\varphi_{i,t_0}(x,y)$ 和 $\varphi_{i,t_0+\tau}(x,y)$ 上相同位置的每两点进行 3 次样条插值^[29]，可生成 $t_0 \sim t_0 + \tau$ 任意多帧的随机相位屏，得到海洋湍流时变信道模型。

3 海洋湍流时变信道 OAM 光通信仿真系统搭建

在海洋湍流时变信道模型的基础上，搭建了一个 OAM 复用 UWOC 系统模型，并通过数值仿真研究空时编码对系统误码率的改善效果。图 3 是该系统结构。

如图 3 所示，首先对比特流进行调制，然后将串行信号流转换为多路并行信号流，支路数取决于 OAM 复用的集合大小。信号在空时编码后生成携带信号的 OAM 光束并进行复用，从多个孔径发送。然后，光束经历时变的海洋湍流信道后到达接收端的多个接收孔径。在接收端将 OAM 光束解复用，利用信道估计的方法根据空时编码方案对信号进行解码，经过并串转换和解调后，最终可以得到比特流。

4 空时编码

空时分组码 (STBC, space-time block coding) 是空时编码的一种，编译码算法简单，并且能获得与最大比合并接收同样的分集增益，增加数据传输率或发送孔径数目对译码复杂度的影响都较小^[10]。在空时编码之前，2 个相邻时隙中的并行符号流表示为

$$\mathbf{X}_{\text{before}} = \begin{bmatrix} x_1^i, x_2^i \\ \vdots \\ x_1^n, x_2^n \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中， $\mathbf{X}_{\text{before}}$ 的每一行表示一路信号流共 n 路信号流，每一列表示一个时隙内的信号。 $\mathbf{X}_{\text{before}}$ 经过 STBC 编码得到矩阵 \mathbf{X}_{STBC} ， \mathbf{X}_{STBC} 的行数是 $\mathbf{X}_{\text{before}}$ 的两倍。 $l_j (j=1,2,\dots,n)$ 表示将信号加载到第 j 个 OAM 模式。使用 2 个发射孔径时，奇数行经 OAM 复用后由一个孔径发射，偶数行经 OAM 复用后由另一个孔径发射。矩阵 \mathbf{X}_{STBC} 可表示为

$$\mathbf{X}_{\text{STBC}} = \begin{bmatrix} x_1^i & -(x_2^i)^* \\ x_2^i & (x_1^i)^* \\ \vdots & \vdots \\ x_1^n & -(x_2^n)^* \\ x_2^n & (x_1^n)^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

信号经过湍流信道后到达接收孔径。对于其中某一个接收孔径，接收到的信号为

$$\begin{aligned} y_1^i &= h_1 x_1^i + h_2 x_2^i + w_1^i \\ y_2^i &= h_1 (-x_2^i)^* + h_2 (x_1^i)^* + w_2^i \\ &\vdots \\ y_1^n &= h_1 x_1^n + h_2 x_2^n + w_1^n \\ y_2^n &= h_1 (-x_2^n)^* + h_2 (x_1^n)^* + w_2^n \end{aligned} \quad (12)$$

其中， h_1 为发射孔径 1 到接收孔径的信道参数， h_2 为发射孔径 2 到接收孔径的信道参数。假设信道参

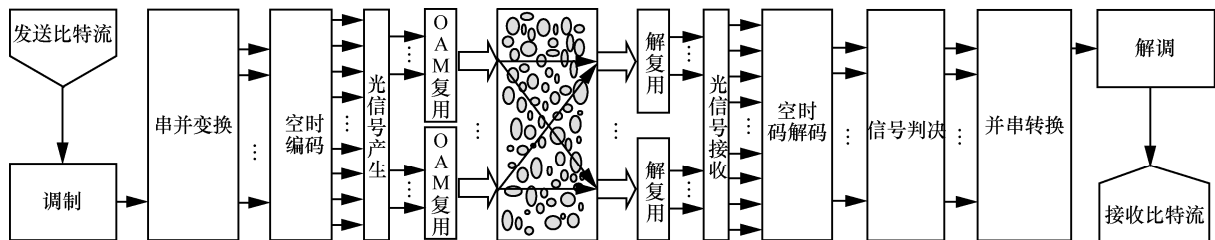


图 3 基于海洋湍流信道的 OAM 复用水下无线通信系统结构

数在一个编码间隔内是不变的。 y_1 表示第 1 个时隙传输的信号, y_2 表示第 2 个时隙传输的信号。 w_i^j 表示第 i 个时隙第 j 个 OAM 模式的随机噪声, 假设它们是方差为 $\sigma_n^2 = \frac{N_0}{2}$ 、均值为 0 的加性白高斯噪声, 由于它们在发射端被复用并经过相同的信道, 故满足 $w_i^j = w_i^k = \dots = w_i^n$ 。对于第 j 个 OAM 模式, 接收到的信号可以写成矩阵的形式, 如式(13)和式(14)所示。

$$\begin{bmatrix} y_1^j \\ y_2^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^j & h_2^j \\ (h_2^j)^* & -(h_1^j)^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^j \\ x_2^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1^j \\ w_2^j \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{Y}^j = \mathbf{H}^j \mathbf{X}^j + \mathbf{W}^j \quad (14)$$

通过信道估计得到信道参数 h_1^j 和 h_2^j 后, 可以对发射信号进行解码得到 \hat{x}_1^j 和 \hat{x}_2^j [30]。

5 仿真结果分析

5.1 海洋湍流时变仿真信道验证

下面使用相位结构函数来衡量计算出的相位屏是否具有正确的统计特性。在 512 像素×512 像素的正方形网格上, 按照 $D=1\text{ m}$, $\omega=-5$, $\chi_T=10^{-6}\text{ K}^2/\text{s}$, $\varepsilon=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}^3$, $\eta=0.001\text{ m}$, $N_{\text{col}}=2$, $v_x=0.2\text{ m/s}$, $v_y=0$, 传输距离 $L=20\text{ m}$ 进行海洋相位屏仿真, 以协方差法扩展原相位为得到的 512×2 512 的相位屏分布如图 4 所示, 其中通过协方差法得到最右侧的 2 000 列。



图 4 相位屏分布

本文利用上述方法产生了 20 s 内 2 000 个时刻的相位屏。根据空间相位结构函数的定义 $D_\varphi(r) = \langle [\varphi(\rho+r) - \varphi(\rho)]^2 \rangle$ [15], 可以计算得到空间相位结构函数的仿真曲线, 然后根据式(7)绘制出其对应的理论曲线, 如图 5 所示。

图 5(a)展示了前 100 个相位屏计算得到的相位结构函数。仿真结果与理论结果较为接近, 只在低频分量上有一定偏差。第 1 块相位屏是通过功率谱反演法产生的, 具有低频分量不足的特点。基于湍流谱相位结构函数的理论值利用协方差法去产生

新屏, 使后续生成的屏相位结构函数的统计值逐渐趋于理论值, 如图 5(b)所示。

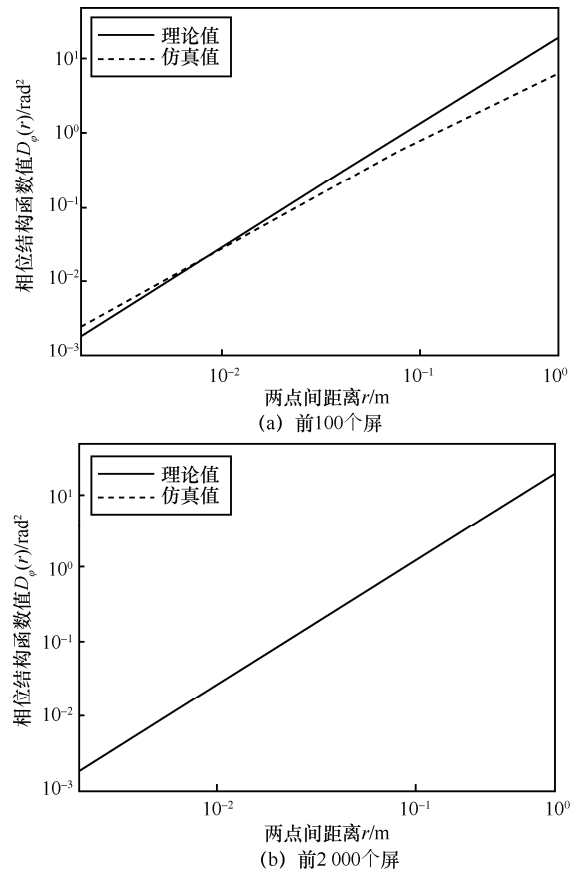


图 5 相位结构函数仿真曲线与理论曲线对比

不同时刻相位屏之间的时间相关特性可以用时间相位结构函数表示为 $D_\varphi(\tau) = \langle [\varphi(t+\tau) - \varphi(t)]^2 \rangle$ [15], 其中 τ 为 2 个时刻的间隔。对上述仿真产生的相位屏进行计算得到 $D_\varphi(\tau)$ 的曲线如图 6 所示, 由图 6 可以看出, 时间相位结构函数值随着 τ 的增加而增加, 体现了相隔时刻越远的相位屏之间的相位相关性越弱。

下面研究上述方法产生的相位屏模拟湍流信道对 OAM 光束传输准确性的影响。OAM 光束受湍流扰动后携带的 OAM 态无法保持在原有的本征态上, 将会向邻近的 OAM 模式进行弥散, 导致模式间发生串扰, 故可以用 OAM 探测概率的分布来表征 OAM 光束受海洋湍流的扰动情况 [31]。以 OAM 态 $l=1$, 光束波长 $\lambda=532\text{ nm}$, 光束束腰半径 $w=0.01\text{ m}$ 的拉盖尔高斯光束为例, 用 $\chi_T=10^{-6}\text{ K}^2/\text{s}$, $10^{-7}\text{ K}^2/\text{s}$, $10^{-8}\text{ K}^2/\text{s}$ 分别表示强、中和弱海洋湍流, 不同强度湍流下光束的 OAM 态探测概率分布如图 7 所示。

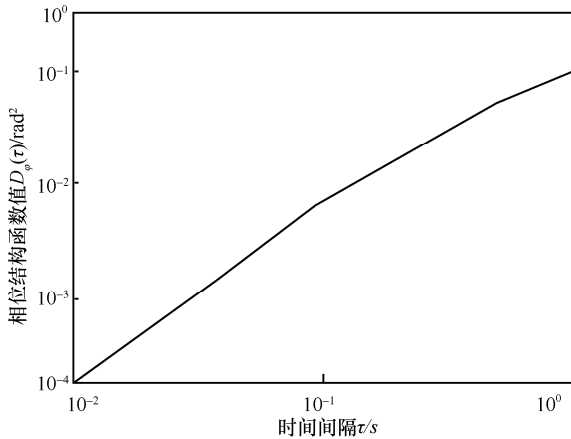


图 6 相位屏的时间相位结构函数曲线

从图 7 可以看出，仿真结果与使用理论公式计算得到的结果^[31]能够非常好地吻合，证明了上述方法产生的随机相位屏组成的海洋湍流信道能够用于仿真研究海洋湍流对 OAM 光束传输的影响。

5.2 系统传输特性和空时编码效果分析

利用海洋湍流时变信道仿真光束在水下 OAM 通信系统中的传输，并研究空时编码对系统误比特率 (BER, bit error rate) 的影响。系统的调制方式为四相移键控，使用 OAM 态 {1,3,5,7} 进行 4 路复用，传输距离 $L = 40\text{ m}$ ，采用 2 个发射孔径和 2 个接收孔径。在 SNR=15 dB、中强度湍流条件下，其他参数按照 $D=1\text{ m}$ ， $\omega=-5$ ， $\varepsilon=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}^3$ ， $\eta=0.001\text{ m}$ ， $N_{\text{col}}=2$ ， $v_x=0.2\text{ m/s}$ ， $v_y=0$ ， $\Delta L=2\text{ m}$ 进行仿真得到的接收信号的星座图如图 8 所示。

从图 8 可以看出，未使用空时编码时信号的星座图分布非常分散，难以判决符号的取值。使用空时编码后，信号分布集中了，星座图各部分易于区分。

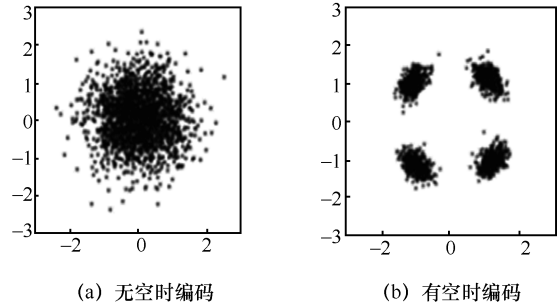


图 8 接收信号星座图

在不同湍流强度下，按以上条件仿真得到系统 BER 随信噪比 (SNR, signal noise ratio) 的变化曲线如图 9 所示。

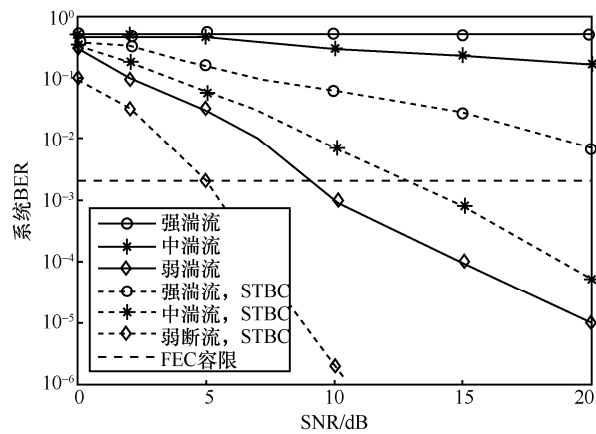


图 9 系统 BER 随信噪比变化曲线

从图 9 可以看出，湍流强度和 SNR 都会影响系统 BER。使用空时编码后，在 3 种湍流强度下系统 BER 都显著降低。例如在弱湍流情况下，不使用空时编码时需要 SNR 达到 9 dB 才能低于前向纠错编码 (FEC, forward error correction) 容限^[32]，使用空时编码后 SNR 仅需 5 dB 就能低至 FEC 容限；中强度湍流情况下，不使用空时编码时无法低于 FEC 容限，使用空时编码后 SNR=13 dB

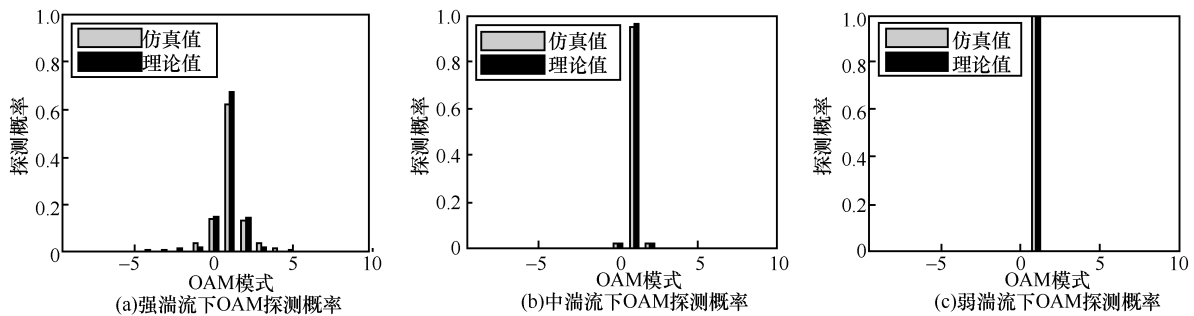


图 7 OAM 探测概率分布对比

时可低至 FEC 容限。这是因为在使用空时编码后信号将在空间和时间上获得分集增益^[33]。

在 SNR=15 dB 时，仿真得到系统 BER 随距离的变化曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出，随着传输距离的增加系统 BER 也随之增加。空时编码提高了 BER 低于 FEC 容限的最大传输距离（FEC 距离），弱、中和强湍流条件下，FEC 距离分别约为 550 m、52 m 和 7 m，提升了 4~6 倍。

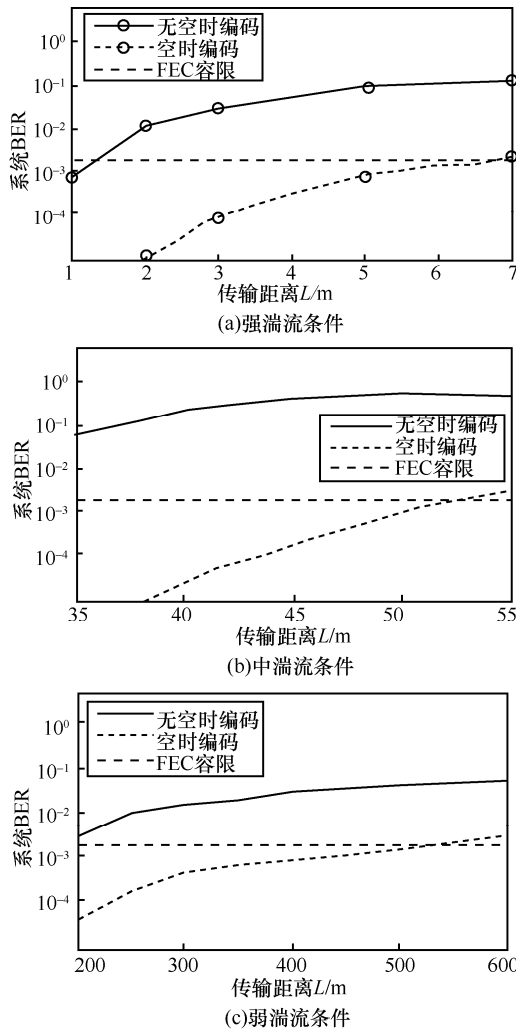


图 10 系统 BER 随距离变化曲线

图 11 展示了不同接收孔径数对系统 BER 的影响。

从图 11 可以看到，当接收孔径数固定为 2 时，系统的 BER 随着 SNR 的增加而显著降低。这是因为随着 SNR 的增加，系统有更大的分集增益，使得系统 BER 更低，但代价是提高了系统的复杂度。在湍流对系统影响较强时，增加接收孔径可以作为克服湍流对系统影响的措施之一。

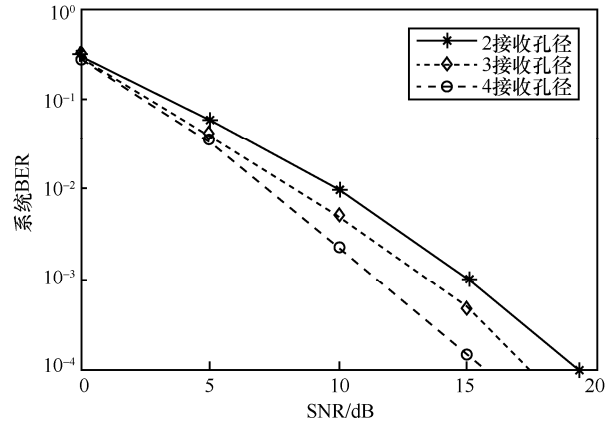


图 11 不同接收孔径数时系统 BER 随 SNR 变化

6 结束语

本文研究了空时编码在水下 OAM 复用光通信系统的应用，利用海洋湍流时变信道仿真模型对系统进行了数值仿真。仿真结果表明，信道模型中的海洋湍流相位屏的相位结构函数曲线与理论曲线相符，经信道后的 OAM 探测概率分布能够较好地吻合理论公式。使用该信道模型进行仿真，结果显示在不同湍流强度下，空时编码技术能够降低受湍流影响的水下 OAM 复用光通信系统的 BER，提高了 BER 低于 FEC 容限的最大传输距离，且增加接收孔径数能够进一步降低系统的 BER。

参考文献:

- [1] HANSON F, RADIC S. High bandwidth underwater optical communication[J]. Applied Optics, 2008, 47(2):277.
- [2] NEUNER B. Undersea laser communication using polarization and wavelength modulation[J]. Applied Optics, 2016, 53(11): 2283-2289.
- [3] 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, 1992, 45(11):8185-8189.
- [4] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. Optics Express, 2004, 12(22):5448-5456.
- [5] 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): 9794-9805.
- [6] REN Y, LI L, WANG Z, et al. Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. Scientific Reports, 2016, 6:33306.
- [7] BRANDON C, KAITLYN M, KEITH M, et al. Propagation of modulated optical beams carrying orbital angular momentum in turbid water[J]. Applied Optics, 2016, 55(31):C34.
- [8] THORPE S A. The turbulence ocean [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

- [9] 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*, 2008, 47(13):2414-2429.
- [10] 柯熙政, 谌娟, 邓莉君. 无线光 MIMO 系统中空时编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
KE X Z, CHEN J, DENG L J. Space-time coding theory in wireless optical MIMO system[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [11] 王惠琴, 柯熙政. 自由空间光通信中的混合空时编码[J]. *光学学报*, 2009, 29(1):132-137.
WANG H Q, KE X Z. Hybrid space-time code for free space optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 132-137
- [12] 曹明华, 王惠琴, 黄瑞, 等. FSO 中分层空时编码的误码性能[J]. *红外与激光工程*, 2012(7): 1842-1847.
CAO M H, WANG H Q, HUANG R, et al. BER performance of layered spacetime code in FSO[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012(7): 1842-1847.
- [13] 谌娟, 柯熙政, 张娜, 等. FSO-MIMO 中的自适应多层空时编码[J]. *激光技术*, 2013, 37(2): 158-164.
CHEN J, KE X Z, ZHANG N, et al. Adaptive multi-layer space-time coding in FSO-MIMO[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 158-164.
- [14] FARWELL N H, KOROTKOVA O. Multiple phase-screen simulation of oceanic beam propagation[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2014: 9224.
- [15] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. *Laser beam propagation through random media*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [16] 牛超君, 卢芳, 韩香娥. 相位屏法模拟高斯阵列光束海洋湍流传输特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 23-28.
NIU C J, LU F, HAN X E. Propagation properties of Gaussian array beams transmitted in oceanic turbulence simulated by phase screen method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 23-28.
- [17] 张凯宁, 刘永欣, 蒲继雄. 涡旋光束在海洋湍流中传输的闪烁因子[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 247-252.
ZHANG K N, LIU Y X, PU J X. Scintillation index of vortex beams propagating in oceanic turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 247-252.
- [18] 孙艳玲, 张家瑞, 鲁振中. 拉盖尔-高斯涡旋光束在水下湍流中的传输特性[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1001005.
SUN Y L, ZHANG J R, LU Z Z. Propagation characteristics of Laguerre-Gaussian vortex beams in underwater turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1001005.
- [19] FARWELL N H, KOROTKOVA O. Multiple phase-screen simulation of oceanic beam propagation[C]/*Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans III*. International Society for Optics and Photonics. Bellingham: SPIE Press, 2014, 9224: 922416.
- [20] YAN W, CHEN Z, DU T, et al. Atmospheric phase screen simulation using zernike polynomial[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 182-183:1002-1006.
- [21] NIKISHOV V. V, NIKISHOV V. I. Spectrum of turbulent fluctuation of the sea-water refractive index [J]. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 2000, 27: 82-98.
- [22] GREENWOOD D P. Bandwidth specification for adaptive optics systems[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 67(3): 390-393.
- [23] BAYKAL Y. Expressing oceanic turbulence parameters by atmospheric turbulence structure constant[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1228-1231.
- [24] 吴彤, 季小玲, 罗娟娟. 海洋湍流中自适应光学成像系统特征参量研究[J]. *物理学报*, 2018, 67(5): 054206.
WU T, JI X L, LUO Y J. Characteristic parameters of adaptive optical imaging system in oceanic turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(5): 054206.
- [25] HE G, JIN G, YANG Y. Space-time correlations and dynamic coupling in turbulent flows[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2017, 49(1): 51-70.
- [26] FRANÇOIS A, WILSON R, GENDRON E. Method for simulating infinitely long and nonstationary phase screens with optimized memory storage[J]. *Optics Express*, 2006, 14(3):988-999.
- [27] LU L, ZHI Q, ZHANG P, et al. Phase structure function and AOA fluctuations of plane and spherical waves propagating through oceanic turbulence.[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(8):085610.
- [28] LU L, JI X, BAYKAL Y. Wave structure function and spatial coherence radius of plane and spherical waves propagating through oceanic turbulence[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27112.
- [29] WILCOX C C, MARTINEZ T, SANTIAGO F, et al. Atmospheric turbulence generator for adaptive optical systems testing[J]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 2007, 6711:67110.
- [30] JANKIRAMAN M. *Space-time codes and MIMO systems*[M]. Fitchburg: Artech House, 2004.
- [31] CHENG M, GUO L, LI J, 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.
- [32] YIN X, SANG H, CUI X Z, et al. Offset tolerance of an orbital angular momentum optical communication system with angular deflection[J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 34-39.
- [33] DEUTSCH. *Channel coding for techniques wireless communications*[M]. Berlin: Springer, 2015.

[作者简介]



尹霄丽 (1970-), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线光通信。

郑桐 (1996-), 男, 四川成都人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线光通信。

孙志雯 (1995-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线光通信。

张兆元 (1997-), 男, 河南驻马店人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为无线光通信、光散射等。