

激光与光电子学进展

基于反向传播神经网络盲均衡算法的水下涡旋光复用系统性能研究

王明军^{1,2*}, 屠思凯¹¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710126

摘要 在水下信道中使用涡旋光复用通信技术可以有效提高通信系统的信道容量,然而海洋湍流会引起涡旋光束的模式间串扰,造成通信系统的性能下降。为了缓解模式串扰问题,本文引入基于反向传播(BP)神经网络的盲均衡算法,采取4路涡旋光进行复用传输,使用随机相位屏法模拟海洋湍流,仿真分析了系统在加入BP盲均衡算法后,改变海洋湍流强度、传输距离以及涡旋光复用模式等因素下,系统误码率的改善情况。仿真结果表明,利用BP神经网络的盲均衡算法能够有效降低海洋湍流对系统误码率的影响,且在复用模式间隔选为2时,系统性能改善明显。

关键词 海洋光学; 涡旋光复用通信; 海洋湍流; 反向传播神经网络; 盲均衡; 误码率

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222356

Performance Research on Underwater Vortex Optical Multiplexing System Based on Back Propagation Neural Network Blind Equalization Algorithm

Wang Mingjun^{1,2*}, Tu Sikai¹¹School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;²Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710126, Shaanxi, China

Abstract Vortex optical multiplexing communication technology can effectively improve the channel capacity of a communication system in an underwater channel. However, ocean turbulence causes the inter modal crosstalk of the vortex beam, degrading the performance of the communication system. To alleviate the modal crosstalk problem, this study presents a blind equalization algorithm based on a back propagation (BP) neural network. Four channels of vortex light are used for multiplexing transmission, and the random phase screen method is used to simulate ocean turbulence. After the BP blind equalization algorithm is implemented, the improvement in the system bit error rate is simulated and analyzed under conditions of varying ocean turbulence intensities, transmission distances, and vortex light multiplexing modes. The simulation results show that the blind equalization algorithm using the BP neural network can effectively reduce the impact of ocean turbulence on the bit error rate of the system, and the system performance significantly improves when the multiplexing mode interval is 2.

Key words ocean optics; vortex optical multiplexing communication; ocean turbulence; back propagation neural network; blind equalization; bit error rate

1 引言

随着人们对海洋资源的探索不断加剧以及相关环境监测、勘探以及潜艇间通信等水下工作的展开,传统水声和光纤通信已经无法满足水下通信的需求,而

水下无线光通信(UWOC)技术由于具有高带宽、易于操作、低延迟等优势,成为水下通信的又一重要技术^[1]。

近年来,随着基于轨道角动量(OAM)的识别技术^[2]以及复用解复用技术^[3]的发展,使得高质量通信的

收稿日期: 2022-08-21; 修回日期: 2022-09-16; 录用日期: 2022-09-27; 网络首发日期: 2022-10-10

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(92052106)、国家自然科学基金(61771385,62101313)、陕西省杰出青年科学基金(2020JC-42)、固体激光技术重点实验室开放基金(6142404190301)、西安市高校人才服务企业工程项目(GXYD14.26)

通信作者: *wangmingjun@xaut.edu.cn

涡旋光复用通信系统成为可能。而将具有 OAM 的涡旋光用于水下通信中,可以进一步提高 UWOC 的信道容量^[4],使得水下涡旋光复用通信系统受到了不少关注。2016 年,Baghdady 等^[5]使用开关键控(OOK)调制,搭建了长度为 2.96 m 的水下涡旋光复用通信系统,采用了 2 路涡旋光进行复用。同年,Ren 等^[6]在 1.2 m 的水箱中,使用空间分集技术实现了 4 路涡旋光复用、传输速率为 40 Gbit/s 的水下涡旋光复用通信系统。

涡旋光在水下进行复用传输时,海洋湍流会破坏涡旋光束之间的正交性,从而造成涡旋光复用模态之间的串扰^[7]。为了缓解海洋湍流信道引起的串扰,2018 年,尹霄雨团队^[8]将等增益分集合并技术应用到水下涡旋光复用通信系统中,发现分集合并技术可以有效降低信道导致的串扰,缓解海洋湍流对通信系统性能的影响。2020 年,该团队又引入空时编码技术搭建了 2×2 的水下涡旋光复用通信系统,仿真结果表明空时编码技术也能进一步提升通信系统性能^[9]。2022 年,张佳琳等^[10]基于广义 Mie 理论,建立了水下悬浮球形藻类粒子对拉盖尔-高斯涡旋光束的散射模型,这对水下涡旋光复用通信的信道模型建立具有重要价值。

目前,缓解涡旋光束在湍流信道中串扰的方法除了空间分集技术和空时编码技术外,还有均衡技术^[8-9]。盲均衡技术是一种用户不用发送训练序列,直接通过均衡器输入信号的信息特征自动调整均衡器抽头系数,就能实现自适应均衡的技术,其能有效缓解信号在信道中传输的码间串扰影响,以此来改善通信系统性能^[11]。2018 年,Alan E. Willner 等使用均衡技术中的恒模算法(CMA)来缓解湍流对水下涡旋光复用通信系统引起的串扰问题^[12]。而与传统的盲均衡算法相比,基于反向传播(BP)神经网络的盲均衡算法不仅性能显著优于前者,而且还具有收敛速度快、平均误差更低等特点^[13]。

因此,本文将基于 BP 神经网络的盲均衡算法应用于海洋湍流信道下的涡旋光复用通信系统,利用数值模拟方法分析了系统的误码率性能,研究了关键参数对系统性能的影响。

2 基本原理

2.1 OAM 基本理论

拉盖尔高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束是实验室最具代表性的一种涡旋光束,在 OAM 光通信系统中被广泛应用。它具有螺旋相位项 $\exp(il\varphi)$,其中 l 为涡旋光的拓扑荷数, φ 为方位角变量,在柱坐标系 (r, φ, z) 中,沿 z 轴方向传播的 LG 光束的光场表达式^[14]为

$$U_{p,l}(r, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \times \frac{1}{\omega(z)} \left[\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right]^{|l|} \times \exp\left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right] L_p^{|l|}\left[\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right] \exp(il\varphi) \times \exp\left[\frac{ik_0 r^2 z}{2(z^2+z_R^2)}\right] \times \exp\left[-i(2p+|l|+1)\arctan\left(\frac{z}{z_R}\right)\right], \quad (1)$$

式中: p 为阶数; r 为柱坐标系下的半径;瑞利长度 $z_R = \frac{\pi\omega^2}{\lambda}$;波束 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为光束的波长; $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$, ω_0 为高斯光束的束腰半径; $L_p^{|l|}$ 为拉盖尔多项式。

2.2 海洋湍流信道模型

涡旋光在海洋湍流中传输可以通过分布传输法采用多块随机相位屏法进行模拟^[15]。本文所用的相位屏是通过功率谱反演法得到的,其产生的步骤为:首先产生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具有随机性的相位屏,再将得到的相位屏作用于光束,以此模拟水下湍流对光束相位的改变^[8,15]。

本文使用的是 Nikishov 提出的一种涉及温度、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^[16],其在均匀各向同性海水中可表示为

$$\Phi_n(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} \epsilon^{-\frac{1}{3}} \kappa^{-\frac{11}{3}} \left[1 + 2.35(\kappa\eta)^{\frac{2}{3}} \right].$$

$$\chi_T [\exp(-A_T \delta) + \omega^{-2} \exp(-A_S \delta) - 2\omega^{-1} \exp(-A_{Ts} \delta)], \quad (2)$$

式中: 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 $10^{-4} \sim 10^{-10} \text{ K}^2/\text{s}$;其他参数为 $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_{Ts} = 9.341 \times 10^{-3}$, $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{\frac{4}{3}} + 12.978(\kappa\eta)^2$ 。

2.3 海洋湍流信道下 BP 盲均衡算法的涡旋光复用通信系统

海洋湍流信道下基于 BP 神经网络盲均衡算法的涡旋光复用通信系统如图 1 所示。在发射端,首先对输入的用户信号进行调制得到调制信号 $s_n(t)$, $n \in [1, N]$,然后将其加载到高斯光载波上,再通过 OAM 模式转换器将高斯光束转变成所需的模态的涡旋光束,最后使用 OAM 模式复用器进行涡旋

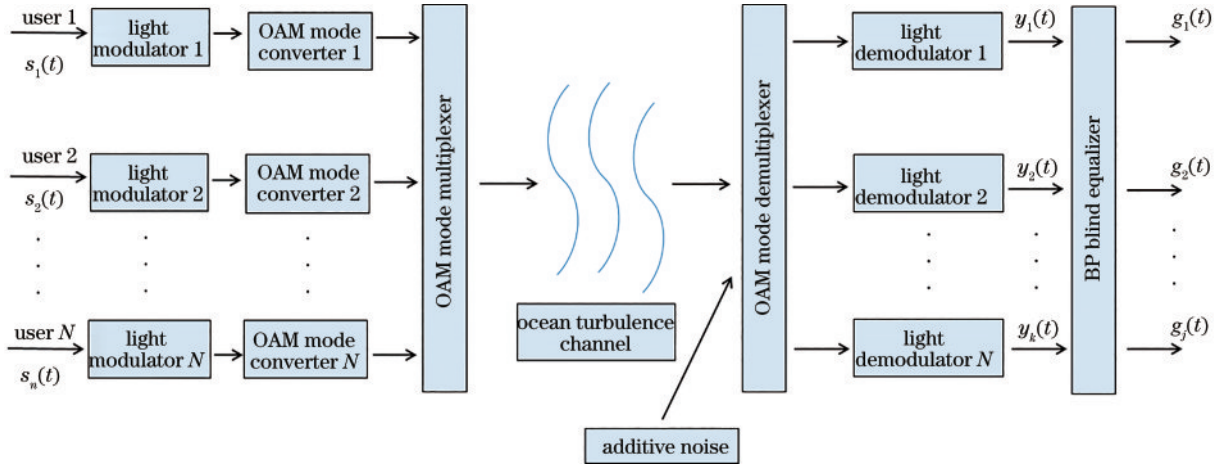


图1 海洋湍流信道下BP盲均衡算法的涡旋光复用通信系统

Fig. 1 Vortex optical multiplexing communication system based on BP blind equalization algorithm in ocean turbulence channel

光束复用,通过发射天线将复用光束发射到海洋湍流信道中进行传输。 N 个涡旋光复用^[17]可表示为

$$U_{\text{MUX}} = \sum_{n=1}^N s_n'(t) U_{l_n}(r, \varphi, z=0), \quad (3)$$

式中: $s_n(t)$ 表示第 N 个发射天线经过调制的信号; U_{l_n} 表示OAM模式为 l_n 的光涡旋光束。

经过海洋湍流信道后,假设接收端可以将复用的涡旋光束完整接收,那么接收端接收到的涡旋光复用波束表示为

$$U'_{\text{MUX}}(r, \varphi, z) = \sum_{n=1}^N s_n'(t) U'_{l_n}(r, \varphi, z), \quad (4)$$

式中: U_{l_n} 代表初始的光束; U'_{l_n} 代表经过海洋湍流信道传输后的光束。经过信道的光束到达接收端后,根据涡旋光不同模态的正交性进行解复用,再通过解调制就可以得到每路失真后的信号 $y_k(t)$, $k \in (1, 2, \dots, N)$,此过程^[18-19]可表示为

$$\begin{aligned} y_k(t) &= \langle U'_{\text{MUX}}(r, \varphi, z), U_k(r, \varphi, z) \rangle = \\ & \iint U'_{\text{MUX}}(r, \varphi, z) U_k^*(r, \varphi, z) r dr d\varphi + V_k(t) = \\ & \iint \sum_{n=1}^N s_n'(t) U'_{l_n}(r, \varphi, z) U_k^*(r, \varphi, z) r dr d\varphi + \\ V_k(t) &= s_n'(t) \iint U'_{l_n}(r, \varphi, z) U_k^*(r, \varphi, z) r dr d\varphi + \\ & \sum_{n=1, n \neq k}^N s_n'(t) \iint U'_{l_n}(r, \varphi, z) U_k^*(r, \varphi, z) r dr d\varphi + \\ V_k(t) &= s_n'(t) \zeta_k + I_k + V_k(t), \end{aligned} \quad (5)$$

式中: U_k 是搭载第 k 路信号的初始光束; $(\cdot)^*$ 表示共轭; $s_n'(t) \zeta_k$ 是期望信号; I_k 是指涡旋光复用传输时串扰到其他模式的信号; $W_k(t)$ 是每一个信道的加性高斯白噪声。将式(5)写成矩阵形式为

$$\mathbf{Y}_{N \times 1} = \mathbf{H}_{N \times N} \mathbf{S}_{N \times 1} + \mathbf{V}_{N \times 1}, \quad (6)$$

式中: \mathbf{Y} 代表接收到的信号; \mathbf{H} 代表涡旋光模态串扰的串扰矩阵; \mathbf{S} 是发送信号; \mathbf{V} 是加性高斯白噪声。将式(6)展开为

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_N(t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中,矩阵 \mathbf{H} 的对角线元素 h_{NN} ,对应式(5)中的第一项,非对角元素对应式(5)中的第二项。

因此,涡旋光复用系统会受海洋湍流的影响,使得各个涡旋光模态之间产生串扰,从而导致系统误码率的提升。本文利用盲均衡算法来改善信号间的串扰问题。对经过解复用器后的信号 $y(t)$ 进行均衡,均衡矩阵为 \mathbf{Q} ,经过均衡器输出的信号表示为 $g_j(t)$, $j \in [1, N]$,具体过程^[20-21]可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \mathbf{Q} * \mathbf{Y} = \mathbf{Q} * (\mathbf{H} * \mathbf{S} + \mathbf{V}) = \\ & \mathbf{Q} * \mathbf{H} * \mathbf{S} + \mathbf{Q} * \mathbf{V}. \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)表明了 \mathbf{Q} 矩阵是对 \mathbf{H} 矩阵的信道均衡,均衡后的信号越接近输入信号 $s_n(t)$,系统误码率也就越低。

2.4 基于BP神经网络的盲均衡算法

基于BP神经网络的盲均衡算法最常用的代价函数是基于CMA盲均衡算法的代价函数,运用最速下降法的数值优化算法进行权值的更新^[22]。本文采用3层结构的BP神经网络^[23],如图2所示。

设输入 M 个输入信号 $y(n)$,隐含层有 N 个神经元,输入层与隐含层间的连接权值用 $w_{ij}(n)$ ($i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$)表示;隐含层与输出层的连接权值为 $w_j(n)$,隐含层神经元的输入为 $u_j(n)$,输出为 $c_j(n)$;输出层神经元的输入为 $o(n)$,网络总输出为 $\tilde{x}(n)$ 。则此BP神经网络的状态方程可表示为

$$u_j(n) = \sum_{i=1}^M w_{ij}(n) y(n-i+1), \quad (9)$$

$$c_j(n) = f[u_j(n)] = f\left[\sum_{i=1}^M w_{ij}(n) y(n-i+1)\right], \quad (10)$$

$$o(n) = \sum_{j=1}^N w_j(n) c_j(n), \quad (11)$$

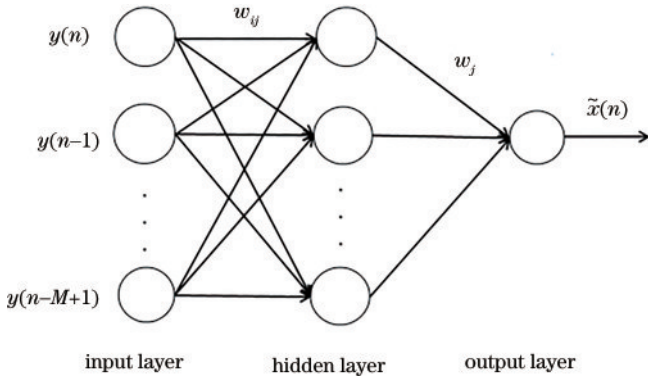


图 2 BP 神经网络结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of BP neural network

$$\tilde{x}(n) = f[o(n)] = f\left[\sum_{j=1}^N w_j(n)c_j(n)\right], \quad (12)$$

式中, $f(\cdot)$ 表示隐含层、输出层的输入和输出之间的传递函数。由于本文使用正交幅度调制(QAM), 将双曲正切函数作为传递函数。它把神经元的输入范围映射到 $(-1, +1)$, 其表达式为

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}. \quad (13)$$

本文基于 BP 神经网络的盲均衡算法采用的代价函数与传统 CMA^[24] 相同为

$$J = \frac{1}{2} |\tilde{x}(n)^2 - R|^2, \quad (14)$$

式中: $\tilde{x}(n)$ 为神经网络均衡器的输出; $R = E\{|\tilde{x}(n)|^4\} / \{E|\tilde{x}(n)|^2\}^2$ 。

根据最速梯度下降法, 可以得到网络权值的迭代公式为

$$W(n+1) = W(n) + \Delta W(n) = W(n) - \mu \frac{\partial J(n)}{\partial W(n)}, \quad (15)$$

式中: μ 是迭代步长; $\frac{\partial J(n)}{\partial W} = 2[\tilde{x}^2(n) - R]\tilde{x}(n) \frac{\partial \tilde{x}(n)}{\partial W(n)}$ 。

从而可推得 BP 神经网络各层权值迭代公式^[25] 分别如下。

1) 输出层权值迭代公式:

$$w_j(n+1) = w_j(n) + \mu l(n)c_j(n), \quad (16)$$

式中, $l(n) = -2[|\tilde{x}(n)|^2 - R]\tilde{x}(n)f'[o(n)]$;

2) 隐含层的权值迭代公式:

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \mu l_j w_j(n)y(n-j+1), \quad (17)$$

式中, $l_j(n) = f'[u_j(n)]w_j(n)l(n)$ 。

3 分析与讨论

本文利用海洋湍流相位屏仿真分析涡旋光复用系统在水下环境中的传输, 并研究 BP 盲均衡算法对通

信系统的星座图、收敛曲线、系统误码率(BER)的影响。系统使用 QAM 调制方式对信号进行调制, 选择涡旋光的模态为 $l=1, 3, 5, 7$ 的 4 束光束进行复用传输, 使用 11 个海洋湍流随机相位屏。

通过观察星座图的变化可以很明显地看出信号的改善情况。在信噪比为 20 dB 时, 传输距离 $L=30$ m, $\omega = -5$, $\epsilon = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$, $\chi_T = 10^{-6} \text{ K}^2/\text{s}$, $\eta = 10^{-3} \text{ m}$, 即中强度湍流。BP 盲均衡算法选择 3 层神经网络结构, 只有一层隐含层, 每一层都使用 8 个神经元, 网络的训练目标设为 0.01, 学习率设为 0.005。在上述情况下, 未使用和使用 BP 神经网络盲均衡算法后的星座图如图 3 所示。图 4 为上述条件下, BP 盲均衡算法下系统迭代后的均方误差(MSE)收敛图。

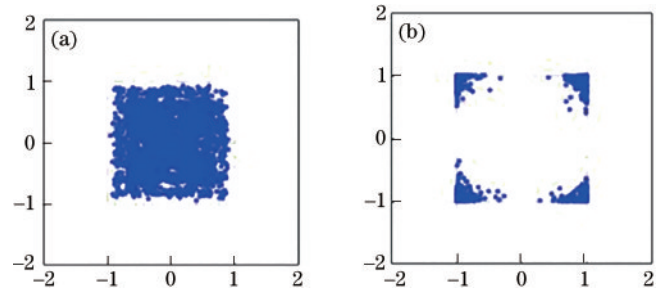


图 3 系统接收信号的星座图。(a) 未使用 BP 盲均衡算法; (b) 使用 BP 盲均衡算法后

Fig. 3 Constellation diagram of system received signal. (a) Without BP blind equalization algorithm; (b) after using BP blind equalization algorithm

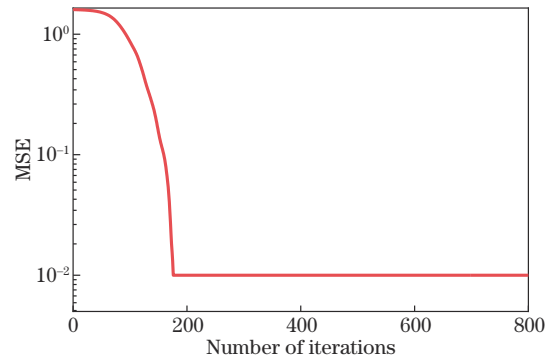


图 4 BP 盲均衡算法下系统均方误差(MSE)随迭代步长的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of system mean square error (MSE) with iteration step using BP blind equalization algorithm

从图 3 中可以看出, 在水下涡旋光复用通信系统中不使用 BP 盲均衡算法时, 输出信号的星座图混乱分布在中心没办法进行区分, 无法判决符号的取值, 而加入 BP 盲均衡算法后, 系统星座图的各部分可以更容易进行区分和判决。图 4 可以看出 BP 盲均衡算法在迭代步数接近 200 步时, MSE 就能达到预期设定的训练目标, 证明该算法有较好的收敛速度。

按上述参数条件下, 只改变均方温度耗散率 χ_T ,

仿真在不同海洋湍流强度下系统 BER 随信噪比 (SNR) 的变化曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 系统的误码性能会随着海洋湍流强度的增大而变差。在加入了 BP 盲均衡算法后, 通信系统在 3 种(弱、中、强)海洋湍流强度下的 BER 都有一定程度的降低。在弱湍流强度下, 使用 BP 盲均衡算法的通信系统在 SNR 为 11 dB 的时候就能低于前项纠错编码(FEC) 容限^[26], 相比未使用 BP 盲均衡算法的系统, 系统性能可提升 2~3 dB; 而在中强度湍流条件下, SNR 达到 20 dB 时, 未使用 BP 盲均衡算法的通信系统已不能低于 FEC 容限, 而在使用 BP 神经网络盲均衡算法后 SNR 在 15 dB 时就能低于 FEC 容限, 系统 BER 下降明显。

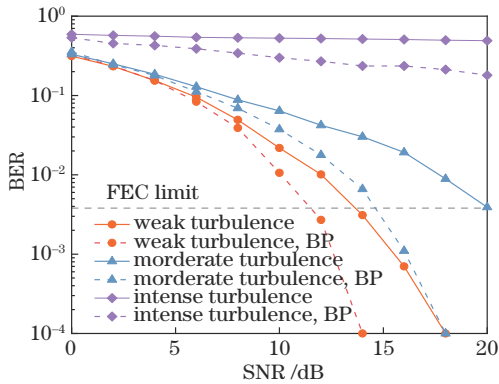


图 5 不同强度湍流下系统 BER 随 SNR 变化图

Fig. 5 Variation trend of system BER with SNR under different turbulence intensities

图 6 为仿真条件在中强度湍流、不同传输距离(15、30、50 m)、温度-盐度梯度率为 $w=-5$ 和 $w=-3$ 、其他

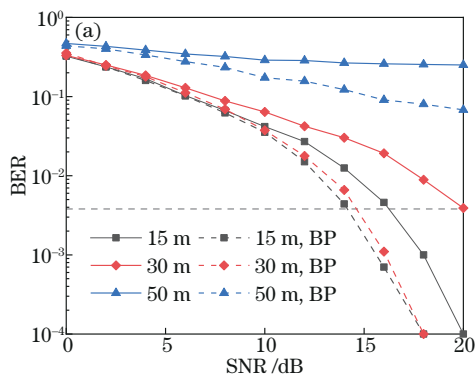


图 7 传输距离和温度-盐度梯度率不同时均衡前后系统的 BER 图

Fig. 7 BER diagram of system before and after equalization when transmission distance and temperature salinity gradient rate are different

涡旋光束在海洋湍流信道中传输时, 相邻模式涡旋光对传输的涡旋光束的串扰影响最大^[28]。所以在系统中对于复用光束的模式选择也是一个较为值得考虑的问题。本文选取了 3 种涡旋光复用态集合进行了研究, 分别为 $\{1, 2, 3, 4\}$ 、 $\{1, 3, 5, 7\}$ 、 $\{1, 4, 7, 10\}$, 即模式间隔 1、2、3 分别用 step 1、step 2、step 3 表示。图 8 展示了 $L=30\text{ m}$ 、 $w=-5$ 、 $\chi_T=10^{-6}\text{ K}^2/\text{s}$ 、 $\eta=$

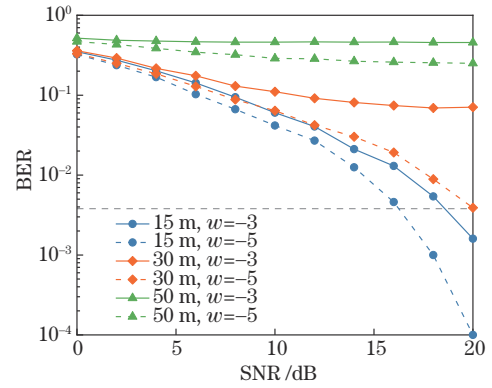
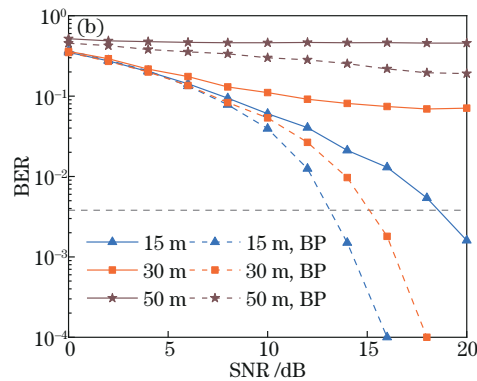


图 6 不同传输距离和温度-盐度梯度率下系统 BER 随 SNR 变化图

Fig. 6 Variation trend of system BER with SNR under different transmission distances and temperature salinity gradient rates

条件不变的情况下, 系统 BER 随 SNR 变化图, 从图 6 中可以看出, 在湍流强度一样的条件下, 随着传输距离增加, 通信系统的性能会越来越差; 盐度导致湍流的比重越大时, 海洋湍流越强, 对通信系统的影响也越大^[27]。

图 7 为上述 $w=-5$ 和 $w=-3$ 两种信道, 使用和不使用 BP 盲均衡算法情况下, 系统 BER 变化图。从图中可以看出, BP 盲均衡算法对两种海洋湍流信道下的通信系统 BER 都有一定改善效果, 且系统在传输 50 m 后, 通信系统性能变得非常差, 但在传输距离为 30 m 时, BP 盲均衡算法对两种信道下的通信系统都有较为明显的改善效果。这就说明采用 BP 盲均衡算法时, 一定要根据具体的场景选择合适的训练样本集, 否则, 不仅不会带来系统性能的改善, 还会恶化系统性能。



10^{-3} m 条件下, 不同复用态集合的涡旋光复用系统 BER 随 SNR 的变化图。

从图 8 中可以看出, 对 3 种 OAM 复用态集合使用 BP 盲均衡算法后, BER 均有显著改善。与其他两种情况相比, 在模式间隔为 2 时, 算法对系统误码性能的改善效果更为明显。

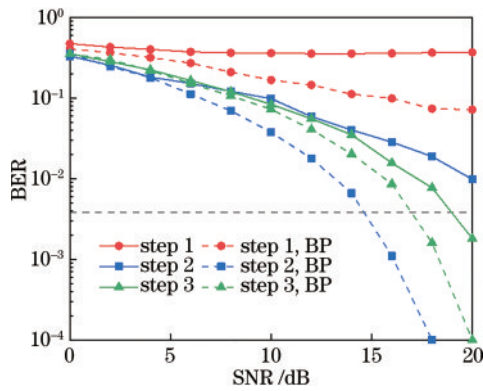


图8 中湍流强度下不同OAM复用态集合的BER随SNR变化图

Fig. 8 Variation trend of BER with SNR of different OAM multiplexing state sets under medium turbulence intensity

4 结 论

本文研究了基于BP神经网络的盲均衡算法在水下涡旋光复用通信系统的应用,利用随机相位屏法模拟了海洋湍流,并搭建了4路涡旋光复用的水下涡旋光通信系统。仿真分析了BP盲均衡算法对通信系统的星座图、收敛曲线,以及不同湍流强度、传输距离、复用模式选择对通信系统BER的影响。仿真结果表明,利用BP神经网络的盲均衡算法能够有效改善通信系统的误码性能,且更适合在复用模式间隔为2时使用。本文的研究结果为海洋湍流中基于涡旋光复用通信系统的发展提供了理论参考,同时也加速了水下光通信的实用化发展。

参 考 文 献

- [1] Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater optical communication[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 277-283.
- [2] 吴琼, 李海英, 丁炜, 等. 基于ResNeXt网络的扰动轨道角动量谱识别[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1706003.
Wu Q, Li H Y, Ding W, et al. Disturbance orbital angular momentum spectrum recognition based on ResNeXt network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1706003.
- [3] 郭代芳, 张鹏, 宫喜宇, 等. 基于多平面光转换的拉盖尔-高斯模解复用混频器设计及仿真分析[J]. *中国激光*, 2022, 49(9): 0906002.
Guo D F, Zhang P, Gong X Y, et al. Design and simulation analysis of laguerre Gaussian mode demultiplexing hybrid based on multi-plane light conversion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(9): 0906002.
- [4] 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*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [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 X, 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] 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.
- [8] 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.
Yin X L, Sun Z W, Cui X Z, 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.
- [9] 尹霄丽, 郑桐, 孙志雯, 等. 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[J]. *通信学报*, 2020, 41(12): 110-117.
Yin X L, Zheng T, Sun Z W, et al. Simulation of transmission characteristics of oceanic wireless optical communication systems based on orbital angular momentum multiplexing with space-time coding[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(12): 110-117.
- [10] 王明军, 张佳琳, 王主玉, 等. 水下悬浮球形藻类粒子群对拉盖尔-高斯涡旋光束的散射[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1829001.
Wang M J, Zhang J L, Wang Z Y, et al. Scattering of Laguerre-Gaussian vortex beams by underwater suspended spherical algal particle swarms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1829001.
- [11] Huang H, Xie G D, Ren Y, 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 (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London. London: IET, 2013.
- [12] Xu Z D, Gui C C, Li S H, et al. Fractional orbital angular momentum (OAM) free-space optical communications with atmospheric turbulence assisted by MIMO equalization[C]//Advanced Photonics for Communications, July 13-17, 2014, San Diego, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2014: 13-17.
- [13] 赵娟, 高正明. 盲均衡技术在通信系统中的仿真应用研究[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2022: 1-2.
Zhao J, Gao Z M. Research on simulation application of blind equalization technology in communication system [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2022: 1-2.
- [14] 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.
- [15] 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.
Yang T X, Zhao S M. Random phase screen model of

- ocean turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1201001.
- [16] Nikishov V V, Nikishov V I. Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index[J]. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 2000, 27(1): 82-98.
- [17] 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.
- [18] Zou L, Wang N, 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): 114215.
- [19] Zhang Y, Wang P, Guo L X, et al. Performance analysis of an OAM multiplexing-based MIMO FSO system over atmospheric turbulence using space-time coding with channel estimation[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19995-20011.
- [20] Zou L, Wang L, Xing C, et al. Turbulence mitigation with MIMO equalization for orbital angular momentum multiplexing communication[C]//2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), October 13-15, 2016, Yangzhou, China. New York: IEEE Press, 2016.
- [21] Ke X Z, Li J. Using MCMA-MUK algorithm to suppress crosstalk in orbital angular momentum multiplexing communication system[J]. *Optical Review*, 2021, 28(4): 331-341.
- [22] 张立毅. 神经网络盲均衡理论、算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 22-23.
- Zhang L Y. Theory, algorithm and application of neural blind equalization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 22-23.
- [23] 王宏生. 人工智能及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 14.
- Wang H S. Artificial intelligence and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 14.
- [24] Cadzow J A. Blind deconvolution via cumulant extrema[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 13(3): 24-42.
- [25] 张晓琴, 白煜, 张彬彬, 等. 基于模糊神经网络控制的变步长盲均衡算法[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(12): 44-46, 106.
- Zhang X Q, Bai Y, Zhang B B, et al. A variable step-size blind equalization algorithm based on the fuzzy neural network controller[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(12): 44-46, 106.
- [26] Yin X L, Sang H Q, 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.
- [27] Cheng M J, Guo L X, Li J T, 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.
- [28] Cheng M J, Guo L X, Li J T, 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): 7901411.