

文章编号: 1001-3806(2021)05-0647-07

## 一种改进的 OFDM 水下可见光无线通信系统

白菊蓉, 郭宇成, 王彦本

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

**摘要:** 在水下直流偏置光无线通信正交频分复用(UOWC-DCO-OFDM)系统中, 为了保证光信号在发射端具有较低峰均比(PAPR)并在水下可进行远距离低误比特率传输, 采用了子载波预留、最小二乘算法(TR-LSA)与压扩变换相结合的方法, 同时运用优化的神经网络对水下环境进行信道估计, 并基于该方法在接收端设计信道均衡器, 以应对水下环境对光信号的强衰减。结果表明, UOWC-DCO-OFDM 系统的 PAPR 降低 9dB, 且在信噪比为 10dB 时误比特率低于  $10^{-3}$ , 达到水下无线光通信的误比特率标准。该系统可实现光信号水下远距离、低误比特率传输。

**关键词:** 光通信; 正交频分复用; 峰均比; 子载波预留; 最小二乘; 压扩; 信道估计; 误比特率

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.05.019

## An improved scheme of OFDM underwater visible wireless optical communication system

BAI Jurong, GUO Yucheng, WANG Yanben

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** In the underwater optical wireless communication-direct current bias-optical-orthogonal frequency division multiplexing (UOWC-DCO-OFDM) system, in order to ensure that the optical signal has a low peak-to-average power ratio (PAPR) at the transmitting end and can carry out long-distance low underwater, the method combining the tone reservation-least squares algorithm (TR-LSA) and companding transformation was adopted. At the same time, the optimized neural network was used to estimate the channel of the underwater environment. Based on this method, the channel equalizer was designed at the receiving end to deal with the strong attenuation of the optical signal in the underwater environment. The results show that the PAPR of the UOWC-DCO-OFDM system is reduced by 9dB, and the bit error rate is  $10^{-3}$  lower when the signal-to-noise ratio is 10dB, which is under the bit error rate standard of wireless optical communication. The system can realize long-distance underwater transmission of optical signals with low bit error rate.

**Key words:** optical communication; orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; tone reservation; least squares; companding; channel estimation; bit error rate

### 引言

水下无线光通信(underwater optical wireless communication, UOWC)是近年来备受关注的一种通信方式。UOWC 选用发光二极管(light-emitting diode, LED)或激光二极管(laser diode, LD)作为信息载体, 具有更快的传输速度和较高的保密性<sup>[1]</sup>。直流偏置光正交频分复用(direct current bias-optical-orthogonal

frequency division multiplexing, DCO-OFDM)有传输速度快、频谱效率高的优点, 在射频无线通信领域有着成熟的发展与应用<sup>[2]</sup>。

峰均比(peak-to-average power ratio, PAPR)性能的好坏是衡量 OFDM 系统的重要指标, 在参考文献[3]中提出的最小二乘-信号与削波比算法(least squares algorithm-signal-to-clipping noise ratio, LSA-SCR)不仅具有良好的 PAPR 性能, 且收敛速度更快。信号压缩属于信号失真技术, 在参考文献[4]中, 结合选择映射(select mapping, SLM)方法与  $\mu$  律压缩法, 提出了一种 SLM-C(select mapping-companding)法降低 UOWC 系统的 PAPR。为了获得更好的 PAPR 性能, 本文中结合子载波预留-最小二乘算法(tone reservation-

基金项目:陕西省重点研发计划资助项目(2019KW-052)

作者简介:白菊蓉(1974-),女,副教授,现主要从事无线光通信 OFDM 的研究。

E-mail:jurongbai@163.com

收稿日期:2020-10-15;收到修改稿日期:2020-12-01

least squares algorithm, TR-LSA) 和  $A$  律压缩法<sup>[5]</sup>, 该方法命名为 TR-LSA-A。同时, 采用遗传算法<sup>[6]</sup> 优化后的反向传播(back propagation, BP) 神经网络作为 UOWC 系统的信道估计来补偿水下信道所产生的衰减, 从而获得更好的误码性能。

## 1 水下信道模型

不同于大气环境, 水下无线光通信的信道干扰因素更为复杂, 例如叶绿体、悬浮体所带来的干扰, 而水介质对光的吸收及散射也会给光信号带来一定程度的衰减<sup>[7]</sup>, 结合水下环境给光信号带来的各类影响因素, 建立信道激光光源模型。UOWC 信道激光光源模型如图 1 所示。

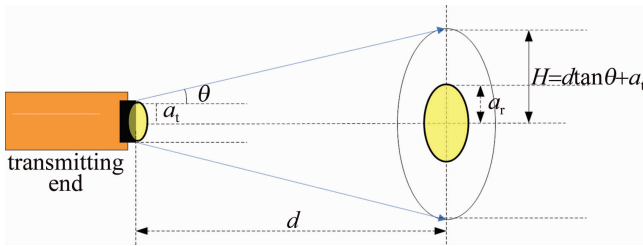


Fig. 1 UOWC channel model

信道函数如下式所示:

$$P_r = P_t \times \eta_t \times \eta_r \times \frac{a_r^2}{(d \tan \theta + a_t)^2} \times \exp[-c(\lambda, h, D) \times d] \quad (1)$$

式中,  $P_t$  和  $P_r$  分别为信号的传输光功率和接收光功率,  $\eta_t$  和  $\eta_r$  分别表示信号传输及接收的效率,  $a_t$  与  $a_r$  分别为传输和接收天线的孔径,  $d$  是传输距离,  $c(\lambda, h, D)$  是水下衰减系数,  $\lambda$  为所选用激光波长,  $h$  为叶绿素的密度,  $D$  为悬浮粒子浓度,  $\theta$  为激光光源发散角。

## 2 OFDM 原理与峰均比抑制技术

### 2.1 OFDM 原理

正交频分复用调制是一种多载波调制技术, 首先将串行的数据流进行相移键控(phase shift keying, PSK) 或者正交振幅调制(quadrature amplitude modulation, QAM) 映射, 接着对映射后数据进行并行处理, 之后对其进行逆傅里叶变换(inverse Fourier transform, IFFT) 运算, 即得到调制后的 OFDM 信号<sup>[8]</sup>。

设  $X_i[k]$  是位于第  $k$  个子载波的第  $i$  个符号( $i = 0, 1, \dots, \infty; k = 0, 1, \dots, N-1$ )。连续时域 OFDM 信号如下式所示:

$$x_i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} X_i[k] \exp[j2\pi f_k(t - iT)] \quad (2)$$

式中,  $T$  表示每个 OFDM 符号的传输周期,  $f_k$  表示第  $k$  个子载波的频率, 与(2)式对应的离散时域 OFDM 信号如下式所示:

$$x_i[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X_i[k] \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (3)$$

### 2.2 峰均比定义及其抑制

在 OFDM 系统中, 多载波调制后各个子载波发生叠加, 会产生较大的峰值, 高峰值信号的输入会导致功率放大器的非线性所引起的带内失真以及带外非线性辐射<sup>[9]</sup>, 从而致使系统无法进行远距离低误比特率的传输, 因此 PAPR 抑制是 OFDM 系统的重要技术, PAPR 表达式如下所示:

$$r_{\text{PAPR}}(x(t)) = \frac{\max |x(t)|^2}{E |x(t)|^2} \quad (4)$$

式中,  $E$  为平均功率。

通常采用互补累积分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF) 衡量 PAPR, 表示如下:

$$P_b = [P_b(Z_{\max} > Z)] > 1 - (1 - e^{-Z^2})^N \quad (5)$$

式中,  $P_b$  表示  $Z_{\max} > Z$  的概率;  $Z$  表示复数采样信号的幅值;  $Z_{\max}$  表示信号通频带的波峰因数(crest factor, CF), 其数值为 PAPR 的平方根, 即(5)式表示了 CF 超过  $Z$  的概率。

### 2.3 子载波预留法(TR)

子载波预留法将载波划分为数据载波  $X$  和峰值抑制载波  $S$  两个部分<sup>[10]</sup>, 在此设  $B$  为峰值抑制信号所保留的子载波数的集合,  $B^c$  表示其补集, 分配给数据信号作为载波。其思路是运用  $S[k]$  将高峰值信号抵消掉, 从而达到抑制 PAPR 的目的。该方法的频域表达如下式所示:

$$X[k] + S[k] = \begin{cases} X[k], & (k \in B) \\ S[k], & (k \in B^c) \end{cases} \quad (6)$$

时域上, 常规 TR 法的 PAPR 为:

$$r_{\text{PAPR}}(x_n) = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} |x_n + s_n|^2}{E |x_n|^2} \quad (7)$$

式中,  $N$  为子载波数,  $x_n$  为时域数据信号,  $s_n$  为时域峰值抵消信号。

### 2.4 TR-LSA-A 技术

TR 法需要找到削峰因子  $p$ , 使峰值抑制信号  $s_n$  与  $p$  相乘后尽可能逼近信号限幅噪声  $f$ , 从而降低发送信号的峰值, 达到峰均比抑制的目的。TR-LSA 的时域迭代公式如下式所示:

$$x_n^{i+1} = x_n^i - p \cdot s_n \quad (8)$$

首先,通过下式软限幅找到所需要的第  $n$  个限幅噪声:

$$f_n = \begin{cases} 0, & (|x_n| \leq R) \\ x_n - Re^{j\theta_n}, & (|x_n| > R) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $R$  为限幅阈值,  $\theta_n$  表示第  $n$  个子载波符号的相位, 当  $|x_n| > R$  时, 可滤掉一定数量的高峰值, 为了保证信号的峰值尽可能地减小, 因此运用一定的限幅比对阈值  $R$  进行迭代限幅, 令  $R = 2.17\bar{x}$ , 其中  $\bar{x}$  表示  $x$  的均值。

限幅后信号如下所示:

$$x_n^{i+1} = x_n^i - f_n \quad (10)$$

为了使(8)式与(10)式进一步的逼近, 因此选用 LSA 对其进行处理, 所构造优化函数  $T(p)$  如下所示:

$$T(p) = \min(\sum_{n \in P} [p \cdot |s_n| - |f_n|]^2) \quad (11)$$

式中,  $P$  为第  $n$  个信号幅度大于  $R$  的集合。通过上式对  $p$  取偏导运算, 并令其等于 0, 即:

$$\frac{\partial T(p)}{\partial p} = 2(p \cdot \sum_{n \in P} |s_n|^2 - \sum_{n \in P} |s_n^i| \cdot |f_n|) = 0 \quad (12)$$

所求  $p$  的结果如下式所示:

$$p = \frac{\sum_{n \in P} |s_n| \cdot |f_n|}{\sum_{n \in P} |s_n^i|^2} \quad (13)$$

将(13)式代入(8)式, 得到 TR-LSA 结果, 时域表达式如下式所示:

$$x_n^{i+1} = x_n^i - \frac{\sum_{n \in P} |s_n| \cdot |f_n|}{\sum_{n \in P} |s_n|^2} \cdot s_n = x_n^i - \frac{\sum_{n \in P} |s_n| \cdot (x_n^i - Re^{j\theta_n})}{\sum_{n \in P} |s_n|^2} \cdot s_n \quad (14)$$

上述公式的频域表达式如下式所示:

$$X_n^{i+1} = X_n^i - (p \cdot s_n) \cdot \mathbf{G}(n) = \left[ X_n^i - \frac{\sum_{n \in P} |s_n| \cdot (x_n^i - Re^{j\theta_n})}{\sum_{n \in P} |s_n|^2} \cdot s_n \right] \cdot \mathbf{G}(n) \quad (15)$$

式中,  $X$  为时域信号  $x$  的频域形式,  $\mathbf{G}(n)$  为傅里叶变换系数矩阵。

$A$  律压缩可以有效降低 OFDM 信号的 PAPR<sup>[5]</sup>, 压缩曲线如图 2 所示。输入输出呈一一映射的关系, 弱放大高幅值信号, 强放大低幅值信号, 使信号的峰值

与均值差距缩小, 从而使 OFDM 信号的 PAPR 进一步地降低。  $A$  律压缩函数如下式所示:

$$A(X_n) = \begin{cases} \text{sgn}|X_n| \cdot \frac{1 + \ln(A|X_n|)}{1 + \ln A}, & \left(\frac{1}{A} \leq |X_n| \leq 1\right) \\ \text{sgn}|X_n| \cdot \frac{A|X_n|}{1 + \ln A}, & \left(0 \leq |X_n| \leq \frac{1}{A}\right) \end{cases} \quad (16)$$

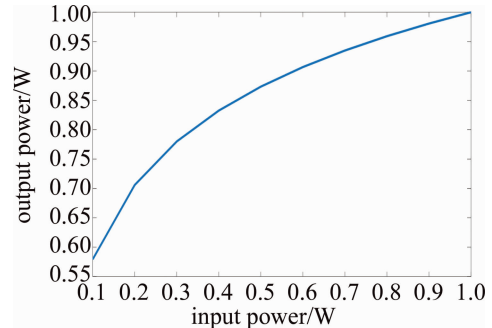


Fig. 2 A-law companding curve

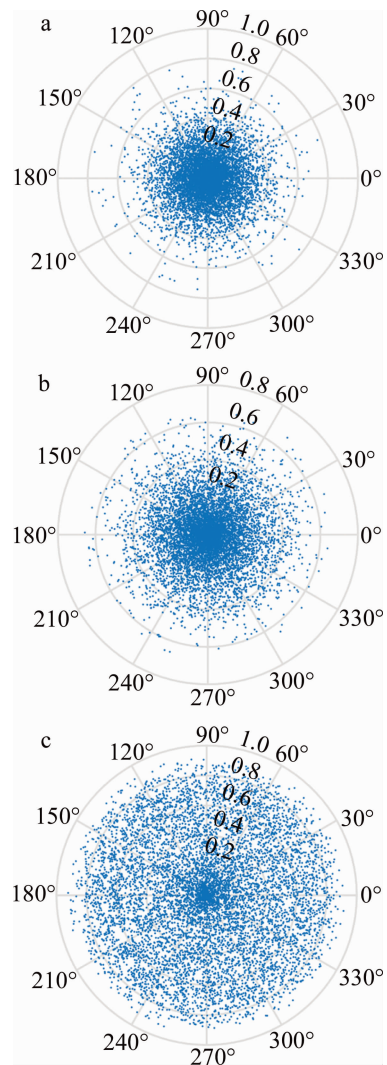


Fig. 3 Signal polar scatter diagram

a—original signal b—TR-LSA signal c—TR-LSA-A signal

图3所示为不同处理阶段的信号极坐标散点图。原始 OFDM 信号散点分布均匀程度较差,在边缘处散点分布稀疏,表现出其具有较多的高峰值信号,相比之下,经过 TR-LSA 处理之后,信号峰值得到了明显的抑制,而后进一步通过 A 律压缩,信号散点边缘密度稀疏程度变小,并且散点分布更为均匀,因此信号经过 TR-LSA-A 处理后表现出更加优异的 PAPR 性能。

### 3 信道估计技术

由于水下信道的特殊性,光信号在水下信道传输时会产生更大的衰减<sup>[1,11]</sup>,对于该问题的解决有编码与信道估计技术两种方案,本文中选用信道估计技术。

目前较为常用的信道估计技术为最小二乘信道估计,其采用对所构造代价函数求偏导数的方法得出所需要的信道估计结果。但是由于最小二乘估计法的均方误差函数与信噪比成反比,因此其在信道处于深度衰落的情形下亦会使噪声增强<sup>[12-13]</sup>,故该方法不能良好适用于水下强衰落环境。因此,本文中采用遗传算法优化的 BP 神经网络进行水下信道估计来解决这一问题。

#### 3.1 BP 神经网络

在 BP 神经网络中,信号以输入层、隐含层、输出层的顺序逐步进行处理,并且每层之间的影响为后向的,即该层神经元的状态被上一层所影响,当输出没有得到想要的结果时,信号传输方向发生转变,即进行反方向传输,以更新阈值与权重的方式使得网络输出达到所期望的效果<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm,GA)流程图如图4所示。

在图4所示的遗传算法流程中,对编码后数据进行初始化种群后便开始进行迭代循环操作。首先对传入数据进行适应性评估,考核其是否达到既定的要求,

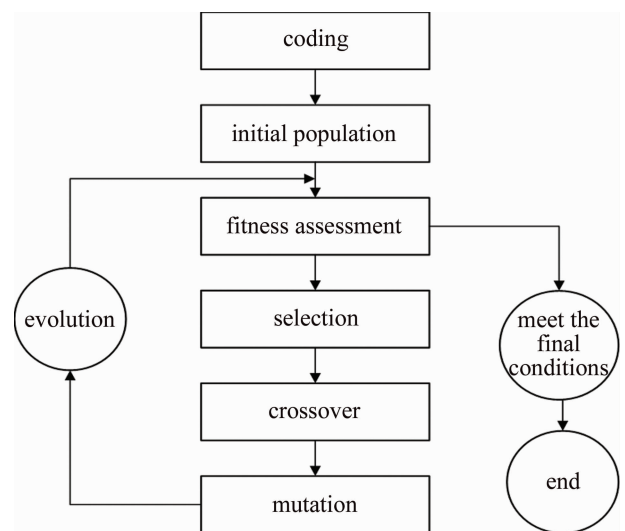


Fig. 4 Flow chart of genetic algorithm

若达到,输出结果结束循环,否则传入选择阶段。处于选择阶段时,将会在数据群中选中部分个体,接着对筛选后数据进行交叉操作,其主要思路为对输入数据的部分内容进行相互交换,形成两个新的个体,而后通过交叉操作的个体有一定概率会产生变异,接着将进化后的数据传输到适应度评估模块进行再评估,以此过程进行迭代循环。

#### 3.3 基于优化的 BP 神经网络设计的接收端信号均衡器

优化神经网络算法<sup>[15-16]</sup>框图如图5所示。首先决定拓扑网络结构并且初始化网络的权重以及阈值,接着采用遗传算法对初始值进行编码,再传输至神经网络进行训练并且获取误差,以提供适应度值,而后进行选择、交叉、适应度计算的循环,直到满足条件获取到最优权/阈值为止,接着循环计算误差并对权/阈值进行更新,直到满足条件即可得出结果。

综合上述理论,提出一种自适应训练信号均衡器,并将其放置在接收端以适应水下信道。将训练信号发

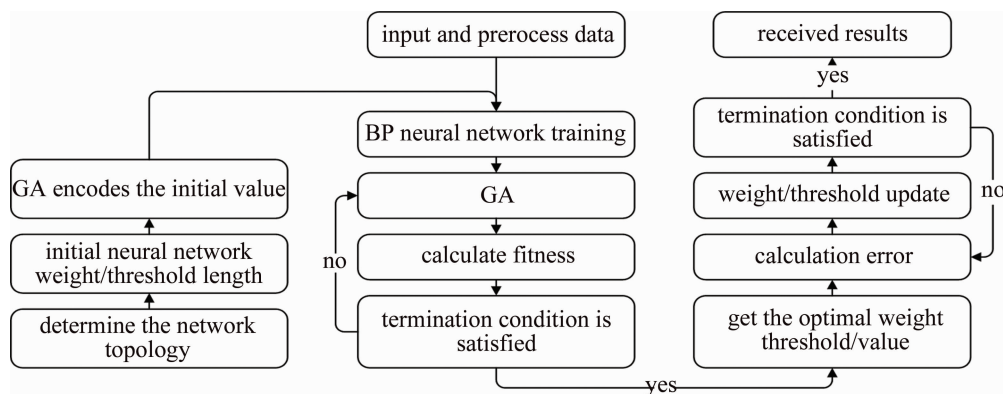


Fig. 5 Flow chart of optimized neural network algorithm

送到接收端均衡器,经过训练后可以得到自适应的水下信道估计,继而可根据估计出的信道数据做出信道均衡,以减小水下信道带来的信号衰减,从而实现低误比特率的远距离水下信号传输。

### 4 基于自适应均衡器的 UOWC-DCO-OFDM 无线光通信系统

#### 4.1 DCO-OFDM 系统

由于在水下可见光通信中发送端的强度调制直接检测 (direct detection/intensity modulation, IM/DD) 要求信号为单极性实信号,因此对实数 OFDM 信号进行厄米特对称的逆变换,即在信号经过 IFFT 之前,将信号进行厄米特对称处理,从而使得处理后的信号经过 IFFT 将转变为实信号,最后采用加直流偏置的方法,使信号从原有双极性信号转变为单极性信号<sup>[17]</sup>。

#### 4.2 基于自适应均衡器的 UOWC-DCO-OFDM 无线光通信系统

本文中所提出的一种 DCO-OFDM 系统如图 6 所

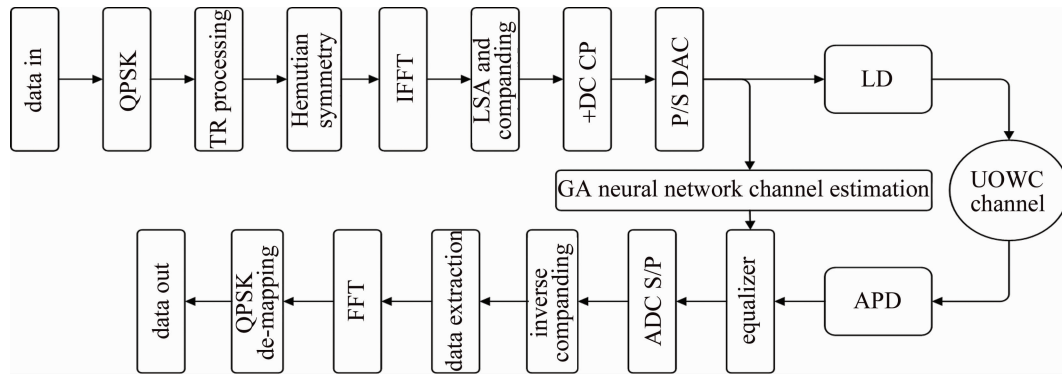


Fig. 6 UOWC-DCO-OFDM wireless optical communication system based on adaptive equalizer

信号处理,进而还原出原始信号。

### 5 仿真结果

设置 1024 个子载波和 1000 个 OFDM 符号,其它参量设置如表 1 所示。

Table 1 System simulation parameters

parameter	value	parameter	value
$\eta_t$	0.91	$\lambda$	514nm
$\eta_r$	0.91	$\theta$	0.33rad
$D$	1	neural network learning rate	0.01
$h$	$5\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	genetic iterations	20
$a_r$	0.003m	nodes in single hidden layer	6
$a_t$	0.003m	the population size	100
$c$	0.151		

图 7 显示了 SLM-C、 $\mu$  律压缩、A 律压缩以及 TR-

示。信号首先经过正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK) 映射,再经过子载波预留法对映射后的信号进行处理,并进行厄米特对称映射,之后通过 IFFT 运算得到实数序列,再传输至 LSA 和压扩模块对系统的 PAPR 性能进一步优化,之后加入循环前缀 (cyclic prefix, CP),最后加直流偏置 (direct current, DC) 完成光电转换处理,经过并串转换 (parallel-serial conversion, P/S) 以及数模转换 (digital-to-analogue conversion, DAC) 后输出 DCO-OFDM 信号。为保证信号的传输,在发射端选用蓝绿光作为载体<sup>[18-19]</sup>;在接收端,光信号通过信道由雪崩二极管探测器 (avalanche photodiode detector, APD) 进行接收,使用优化的神经网络进行信道估计,将信道估计的结果传输至接收端并设计信道均衡器,完成自适应均衡,从而降低光信号远距离传输的误比特率,再以模数转换 (analog-to-digital conversion, ADC) 与串并转换 (serial-parallel conversion, S/P)、反压扩、提取有用信息、快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)、QPSK 反映射的顺序进行

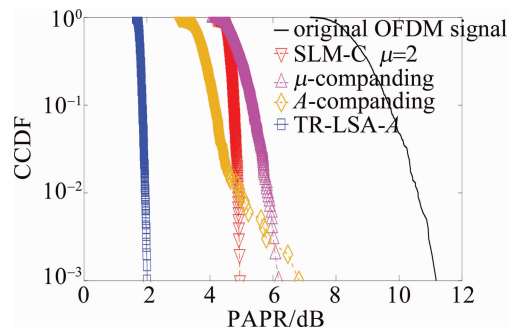


Fig. 7 Peak-to-average power ratio comparison

LSA-A 法的 PAPR 性能。通过仿真结果可以看出:TR-LSA-A 比参量  $\mu = 2$  的 SLM-C、A 律压缩和  $\mu$  律压缩具有更加优异的 PAPR 抑制性能,能够将 PAPR 分别降低 2.5dB, 4.2dB 和 4.9dB,其互补累计分布函数取  $10^{-3}$  时,PAPR 为 2dB。

如图8所示,TR-LSA-A算法在比特信噪比(即比特能量 $E_b$ 与噪声功率密度 $N_0$ 之比)等于10dB时误比特率(bit error rate, BER)低于 $10^{-3}$ ,即满足UOWC系统的误比特率要求。TR-LSA-A算法的误比特率性能优于对比算法。

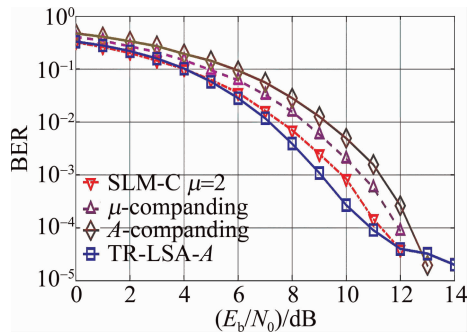


Fig. 8 Bit error rate comparison

如图9所示,在水下强衰减信道中,未加均衡器的DCO-OFDM系统的采用TR-LSA-A算法抑制PAPR时,误比特率保持在 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 的范围之间;当信噪比大于7.4dB时,其性能劣势开始显现,无法达到水下无线光通信的误比特率要求。由此可见,在接收端

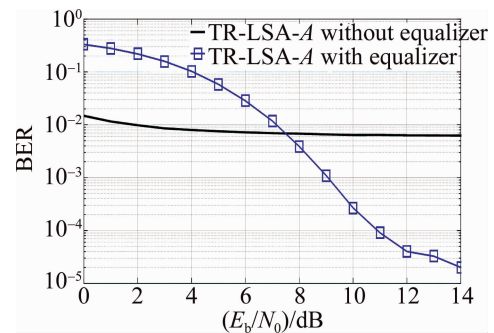


Fig. 9 Bit error rate comparison before and after equalization

加入均衡器对于UOWC系统通信性能的提升是十分关键的。

图10a为发送端经QPSK映射后的原始数据星座图。该发送信号在UOWC信道中传输时,受水下信道严重衰减的影响,接收端星座图发生很大程度的扰乱。如图10b所示,未加入均衡器的接收端信号星座图出现较强的噪声干扰,解调模块误判概率增加;加入均衡后的接收信号依然具有噪声干扰,如图10c所示,但其干扰程度得到了较大程度的抑制,解调模块误比特率可被大幅降低。

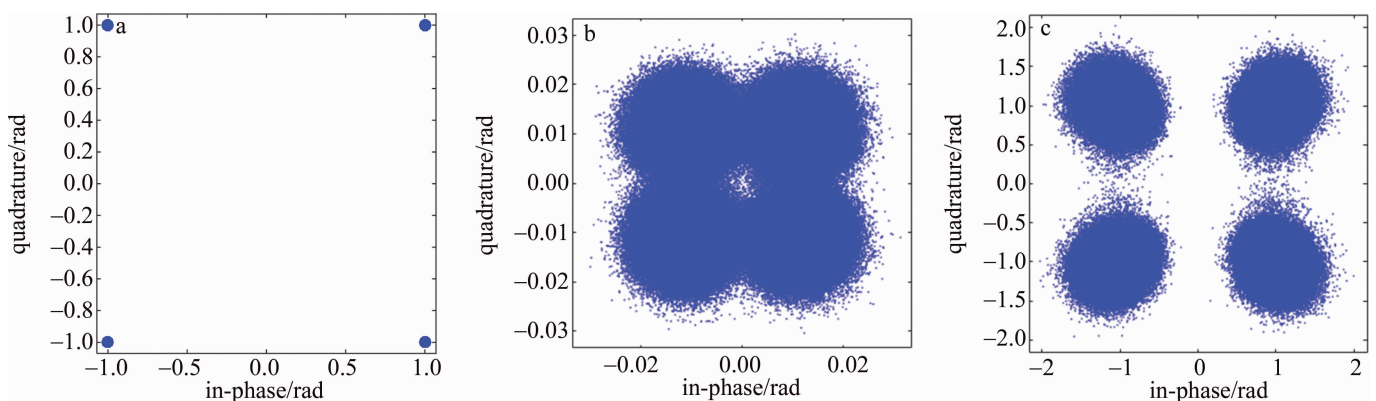


Fig. 10 Signal constellations

a—original constellation diagram b—constellation diagram without equalizer c—constellation diagram with equalizer

原始OFDM信号的功率谱密度(power spectral density, PSD)主要集中在中央平台区。图11为TR-LSA-A算法的PSD与原始OFDM信号、A律算法、 $\mu$ 律

算法的对比图。与原始OFDM系统相比,TR-LSA-A算法在大幅降低PAPR的前提下,与其它对比算法带来的带外频谱扩散接近。

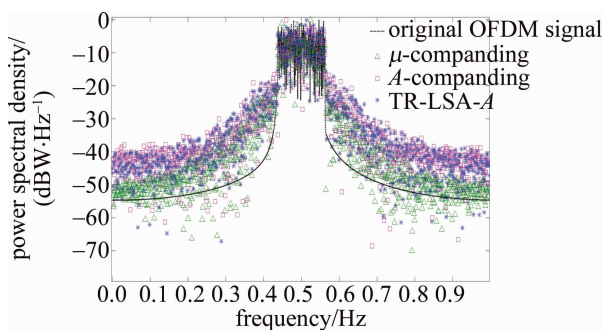


Fig. 11 Signal power spectral density

## 6 结论

提出了一种新型的水下无线光通信DCO-OFDM系统。仿真结果显示,该系统的峰均比具有优异的收敛性,系统误比特率亦优于其它几种对比算法。所提系统采用优化的神经网络进行水下信道估计,并基于估计结果设计出信号均衡器,用以抵抗水下信道所带来的传输损耗,使系统误比特率性能满足水下无线光通信的要求。

## 参 考 文 献

- [1] ZENG Z, FU S, ZHANG H, *et al.* A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Survey & Tutorials*, 2017, 19(1): 204-238.
- [2] DJORDJEVIC I B, VASIC B. Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9):3767-3775.
- [3] BAI J R, LI Y, YANG Y, *et al.* PAPR reduction based on tone reservation scheme for DCO-OFDM in door visible light communications [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20):24630-24638.
- [4] BAI J R, DAI H, YANG Y, *et al.* A combining PAPR reduction method for DCO-OFDM UOWC[EB/OL]. [2018-11-31]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8596029>.
- [5] KAREEM A N, SATAR S M A, HUSEIN M A. Performance improvement of OOFDM systems based on modified A-law companding technique[J]. *Journal of Engineering and Applied sciences*, 2018, 13(13):4022-4027.
- [6] LIU Y, LI Y, SHENG M, *et al.* Reliability prediction method and application in distribution system based on genetic algorithm-back-propagation neural network[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2019, 13(7):984-988.
- [7] WANG F, YANG Y, DUAN Z L, *et al.* Characteristic analysis of underwater laser signal transmission channel based on visible light[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(3):26-28 (in Chinese).
- [8] ARMSTRONG J. OFDM for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(1):189-204.
- [9] JIANG T, WU Y. An overview: Peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2008, 54(2):257-268.
- [10] WANG B, SI Q, JIN M. A novel tone reservation scheme based on deep learning for PAPR reduction in OFDM systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(6):1271-1274.
- [11] JAMALI M V, MIRANI A, PARSAY A, *et al.* Statistical studies of fading in underwater wireless optical channels in the presence of air bubble, temperature, and salinity random variations (long version) [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(10):4706-4723.
- [12] MORELLI M, MENGALI U. A comparison of pilot-aided channel estimation methods for OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 49(12):3065-3073.
- [13] BAGADI K P, DAS S. MIMO-OFDM channel estimation using pilot carries[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2010, 2(3):81-88.
- [14] BASHEER I A, HAJMEER M N. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2000, 43(1):3-31.
- [15] HAO Z, KEFA C, JIANBO M. Combining neural network and genetic algorithms to optimize low NO<sub>x</sub> pulverized coal combustion[J]. *Fuel*, 2001, 80(15):2163-2169.
- [16] SUPRAJA P, GAYATHRI V M, PITCHAI R. Optimized neural network for spectrum prediction using genetic algorithm in cognitive radio networks[J]. *Cluster Computing*, 2018, 22(1):157-163.
- [17] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(7):1063-1072.
- [18] HE F T, WANG M, YANG Y. Analysis of spatial transmission characteristics of laser beam in seawater [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(11):28-33 (in Chinese).
- [19] HUANG A P, ZHANG Y L, TAO L W. Monte Carlo simulation on channel characteristics of underwater laser communications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4):219-224 (in Chinese).