

基于预编码与压扩技术 VLC 系统研究

范嘉欣, 潘儒, 邹林儿, 沈云
(南昌大学物理与材料学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 针对非对称削波光正交频分复用系统应用在可见光通信中峰值平均功率比过高的问题, 在研究编码技术和失真技术的基础上, 提出了一种 Hadamard 编码与归一化 μ 律压扩联合方案来降低峰值平均功率比。联合方案仿真结果表明, 与 Hadamard 编码技术相比, 在峰值平均功率比抑制性能方面提升了 5.8 dB; 另一方面, 与归一化 μ 律压扩技术相比, 在误码率上仍然取得了更好的性能, 优化了 2 dB。

关键词: 可见光通信; 归一化 μ 律压扩; 预编码; 峰值平均功率比

中图分类号: TN929.12; TN911.72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.021

Research on VLC system based on precoding and companding techniques

FAN Jia-xin, PAN Ru, ZOU Lin-er, SHEN Yun

(School of Physics and Materials Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Aiming at the problem of high peak-to-average power ratio of asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing system applied in visible light communication, a joint scheme combining Hadamard precoding with normalized μ -law companding is proposed to reduce peak-to-average power ratio on the basis of the study of coding technology and distortion technology. The simulation results of the joint scheme demonstrate an improvement of 5.8 dB in peak-to-average power ratio suppression performance compared to Hadamard precoding alone. Additionally, compared to normalized μ -law companding, it still exhibits superior performance in terms of error rate, achieving a 2 dB optimization.

Keywords: visible light communication; normalized μ -law companding; precoding; peak-to-average power ratio

1 引言

对比传统射频通信, 可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 拥有丰富频谱、更好的保密性^[1]、抗电磁性能好^[2]等优点, 在室内可见光系统中, 发送端采用发光二极管 (Light-Emitting Diode, LED) 传输信号, 在接收端使用光电探测器 (Photoelectric Detector, PD) 接收信号。正交频分复用 (Or-

thogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术应用于 VLC 系统, 它数据传输速率非常显著^[3], 但因频域信号的积累, 使得有高的峰值平均功率比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR), 并且随着子载波数量的增加而致 PAPR 进一步增高, 使得系统性能变得恶化。此外, VLC 系统的发送器件 LED 本身具有典型的非线性特性, 而这将导致这种高 PA-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62165008); 江西省自然科学基金项目 (No. 20212ACB201007) 资助。

作者简介: 范嘉欣 (1999 -), 女, 硕士研究生, 主要从事可见光通信技术研究。E-mail: 1406171363@qq.com

通讯作者: 邹林儿 (1971 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事集成光学、高速光通信、全光信息处理技术研究。

E-mail: linerzou@ncu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-13; **修订日期:** 2024-01-05

PR 的信号在通过 LED 器件会加剧 LED 的非线性失真,直接限制了系统的性能。因此,有效抑制 VLC 系统的 PAPR 是十分必要解决的问题,目前常用的解决此问题主要有:预失真技术(限幅类技术^[4]、压扩类技术^[5]等)、概率类技术(选择性映射^[6]、部分传输序列^[7]等)和预编码技术(离散余弦变换预编码^[8]、离散傅里叶变换预编码^[9]等)。在这三类的 PAPR 抑制技术中,预失真技术通过修改传输信号幅度来降低 PAPR,能较直观地抑制 PAPR,但通常引入了带内、带外失真^[10-11],恶化了系统性能;概率类技术是通过生成多个候选信号并选择 PAPR 最低的信号进行传输从而实现抑制 PAPR^[12],在无失真技术中抑制 PAPR 性能最佳,但其引入计算复杂度最大;预编码技术通过选择合适的码字来降低 PAPR,但会带来编码速率的损失^[13],其优点是实现较简单,计算复杂度适中。

综合分析,本文提出 Hadamard 编码技术与归一化 μ 律压扩技术联合方案应用于 VLC 系统,利用 Hadamard 预编码技术提高误码率性能,然后结合归一化 μ 律压缩扩展技术通过牺牲部分误码率性能来大幅度抑制 PAPR。仿真结果表明,该联合方案能进一步有效抑制 PAPR,提升误码率性能。

2 基于 ACO-OFDM 技术的 VLC 系统模型

采用非对称削波光正交频分复用(Asymmetrically Clipped Optical OFDM, ACO-OFDM)技术^[14]建立 VLC 系统模型,如图 1 所示。ACO-OFDM 技术主要是修改厄米特对称的结构,使所有的偶数子载波均不传输数据,这样经快速逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)变换后的数据遵循半波对称原则,可以在不丢失任何信息的情况下去掉复数信号,然后在接收端在相应位置恢复即可。

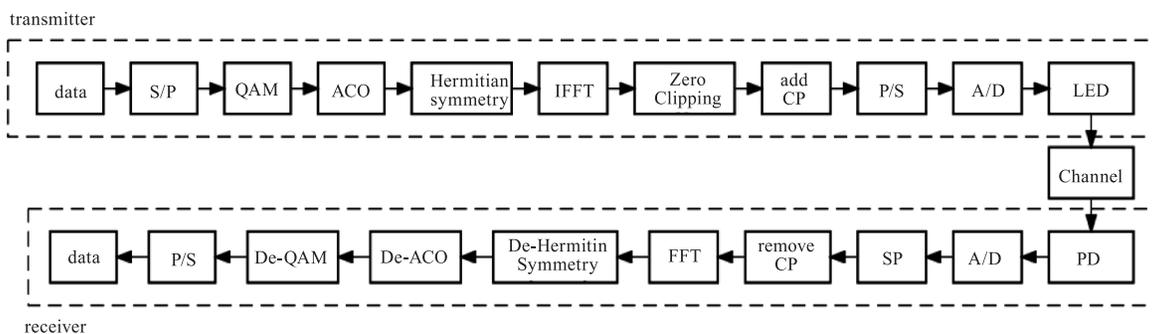


图 1 基于 ACO-OFDM 技术建立的 VLC 系统模型图

Fig. 1 VLC system model diagram based on ACO-OFDM technology

在该系统中,系统发送端发送原始数据,首先经串并转换、正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)后得到数据表示为 N 点数据序列 $A = [A_0, A_1, A_2, \dots, A_{N-2}, A_{N-1}]^T$, 然后经过 ACO 的非对称限幅调整为 $2N$ 点数据序列 $B = [0, B_0, 0, B_1, \dots, 0, B_{N-2}, 0, B_{N-1}]^T$ 。为了保证后续信号具有实数性,构建厄米特矩阵,使得其频域中正频和负频满足复共轭关系,在后面的 IFFT 操作后的时域信号的虚部为零。厄米特对称操作式为:

$$H_k = \begin{cases} 0, & k = 0, N \\ H_k, & k = 1, 2, \dots, N-1 \\ H_{N-k}^*, & k = N+1, \dots, 2N-1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, H_k 为第 k 个子载波数据(*表示复共轭); N 为子载波总数。 $2N$ 点数据序列 B 经厄米特对称操

作后的输出信号是由 $4N$ 个子载波组成的数据序列 C :

$$C = [0, C_0, 0, C_1, 0, C_2, \dots, 0, C_{N-1}, 0, C_{N-1}^*, 0, \dots, C_2^*, 0, C_1^*, 0, C_0^*]^T \quad (2)$$

该信号经 IFFT 操作,可得到实值时域 ACO-OFDM 信号,可表示为:

$$x(n) = \frac{1}{4N} \sum_{k=0}^{4N-1} X_k \exp\left(j \frac{2\pi kn}{4N}\right) \quad 0 \leq n \leq 4N-1 \quad (3)$$

其中, X_k 为数据序列 C 的第 k 个子载波数据,此后,对时域信号进行负数切割操作,让双极性实数信号转化为单极性实数信号,并插入循环前缀处理用于避免信号间干扰,再由串并转换、数模转换后驱动 LED 发送信号。

接受端使用光电探测器接受到信号,经过模数转换、串并转换,去除循环前缀后,使用 FFT 操作从

时域信号转变为频域信号,经过逆厄密特操作去除共轭部分的信号,解 ACO 调整,解 QAM 映射,最后再次并串转化还原成原始数据。

综上所述,在 ACO-OFDM 系统中,信号是由多个独立经过调制的子载波信号叠加而成的,当各个子载波相位相同或者相近时,叠加信号便会受到相同初始相位信号的调制,从而产生较大的瞬时功率峰值,由此进一步带来高的 PAPR 值。PAPR 值表达式为:

$$PAPR(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{\max\{|x(n)|^2\}}{E\{|x(n)|^2\}} \quad (4)$$

其中, $\max\{|x(n)|^2\}$ 为信号的峰值功率, $E\{|x(n)|^2\}$ 为信号的平均功率。结合公式(3), ACO-OFDM 信号的 $E\{|x(n)|^2\}$ 可表示为:

$$E\{|x(n)|^2\} = \frac{1}{16N^2} E\left\{ \left| \sum_{k=0}^{4N-1} x(n) \exp(j \frac{2\pi kn}{N}) \right|^2 \right\} \quad (5)$$

在本文中,使用互补累计分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)来评估 ACO-OFDM 系统中的抑制 PAPR 性能,它表示为多子载波传输系统中峰均值超过门限值 $PAPR_0$ 的概率,表示为:

$$CCDF[PAPR(x(n))] = \text{prob}[PAPR(x(n)) > PAPR_0] \quad (6)$$

3 Hadamard 预编码技术和归一化 μ 律压扩方法

3.1 Hadamard 预编码技术

在 ACO-OFDM 系统中,引入预编码操作对子载波波形进行整形,能有效降低系统的误码率。考虑到应用 Hadamard 矩阵运算^[15-16],能降低系统复杂度,且较好提升误码率性能,因此采用 Hadamard 预编码技术。 P_N 为一个 N 阶 Hadamard 矩阵,它满足 $P_N \cdot P_N^T = NI_N$,其中 P_N^T 表示 P_N 的转置矩阵; I_N 是 N 阶的单位矩阵,阶数除了 1,2 之外都是 4 的倍数。 N 阶 Hadamard 矩阵是由 1 阶、2 阶 Hadamard 矩阵层层递推而来,其表述为:

$$P_1 = [1], P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \dots, P_N = \begin{bmatrix} P_{\frac{N}{2}} & P_{\frac{N}{2}} \\ P_{\frac{N}{2}} & -P_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

原始数据序列首先通过串并转换、QAM 调制进行处理,得到的信号 A 可以表示为:

$$A = [A_0, A_1, A_2, \dots, A_{N-2}, A_{N-1}]^T$$

然后,采用本文提出的 Hadamard 预编码技术处理,预编码操作的输出 D 为 N 阶 Hadamard 矩阵和 QAM 调制数据符号的乘积: $D = P_N \cdot A$ 。对 D 进行 ACO 的非对称限幅操作,再根据公式(1)的方法对 D 进行厄米特共轭对称变换得到:

$$X = [X_0, X_1, X_2, \dots, X_{4N-2}, X_{4N-1}]^T$$

对 X 进行 IFFT 运算,输出为时域信号,再对时域信号进行负数切割操作,此时信号变为正极性实数信号,该信号添加循环前缀后可进入下一步的归一化 μ 律压扩步骤。图 2 显示了在 ACO-OFDM 可见光通信系统中原始信号未使用和使用 Hadamard 预编码得到的时域信号波形,可以看出:原始信号的峰值区间位于 0~6.3 之间,经过 Hadamard 预编码变换后的瞬时信号峰值降低至 0~5.5 之间,对子载波波形进行了整形。

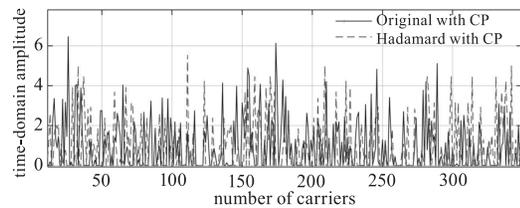


图 2 原始信号未使用与使用 Hadamard 变换的信号的时域值比较

Fig. 2 Comparison of time-domain values between original signals and signals multiplied by Hadamard matrix

3.2 归一化 μ 律压扩方法

在 ACO-OFDM 系统中,增加压扩技术可对信号进行预失真处理,一定程度上可降低高功率放大器的非线性对平均功率的敏感度,常采用 μ (μ 为压扩参数) 律压扩方法提高 OFDM 传输性能^[17]。在 μ 律压扩应用在 OFDM 系统中,可对小功率信号进行扩大,而对大功率信号不改变^[18],通过保持信号峰值幅度、提升信号平均功率^[19],来达到降低系统 PAPR 的目的。为了减小信号峰值幅度,将压缩拐点设置为平均功率点而不是最大功率点^[18],从而实现了对大功率信号进行压缩,但信号的平均功率仍然是增大的,只是增益变小。针对这情况,采用归一化的 μ 律压扩技术对 μ 律压扩进行改进,选取合适的压扩参数将小信号进行扩大和大信号进行压缩,从而保持压扩前后的平均功率不变,则可以有效地抑制压扩信号的平均功率变高,从而使得 PAPR 有效降低的同时,减少对误码率的影响。

在发送端里,归一化 μ 律压扩变换后的信号表示为:

$$t(n) = \gamma \frac{Aver_t \log_e(1 + \mu |v(n)|)}{\log_e(1 + \mu)} \text{sign}(v(n)) \quad (8)$$

在接收端里,经归一化 μ 律压扩技术逆变换过程后的信号表示为:

$$r(n) = \frac{1}{\mu} [(1 + \mu)^{\frac{u(n)}{\gamma}} - 1] \text{sign}(u(n)) \quad (9)$$

其中,sign 为符号函数; $v(n)$ 表示发送端里 $x(n)$ 经过负数切割后的信号, $Aver_t$ 为 $v(n)$ 信号的平均振幅; $u(n)$ 表示接收端里经过去 CP 操作后接收到的信号; $Aver_r$ 为 $u(n)$ 信号的平均振幅; γ 是归一化参数,表示为:

$$\gamma = \log_e(1 + \mu) \cdot \sqrt{\frac{E\{|v(n)|^2\}}{E\{|\log_e(1 + \mu |v(n)|)|^2\}}} \quad (10)$$

为了保证归一化 μ 律压扩技术可以最大限度地抑制 ACO-OFDM 系统中的 PAPR,同时保持良好的 BER(误码率)性能,因此需要选择合适的压扩参数 μ 。图 3 是不同压扩参数的归一化 μ 律压扩技术应用于 ACO-OFDM 系统中的表现的 PAPR、BER 性能。图 3(a)显示,当互补累计分布函数 CCDF 值为 1×10^{-3} 时,未使用归一化 μ 律压扩技术,其 PAPR 值约 15.3 dB,而采用归一化 μ 律压扩技术,系统显著抑制 PAPR,且随压扩参数 μ 的增加 PAPR 抑制性能变得更好, μ 分别为 1、2、3、5 时,可降低 PAPR 值到 10 dB,9.1 dB,8.9 dB,8.5 dB。但图 3(b)显示,随着压扩参数 μ 的增大,同时也会带来信号失真,当误码率为 10^{-4} 时跟未使用归一化 μ 律压扩技术相比,信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)分别下降了 1 dB,3 dB,3.7 dB,8 dB。综合所知,在 μ 达到 2 以后, μ 继续增大对抑制 PAPR 性能的提升较小,反而

将造成更多的失真。因此,归一化 μ 律压扩技术的 μ 取为 1 和 2。

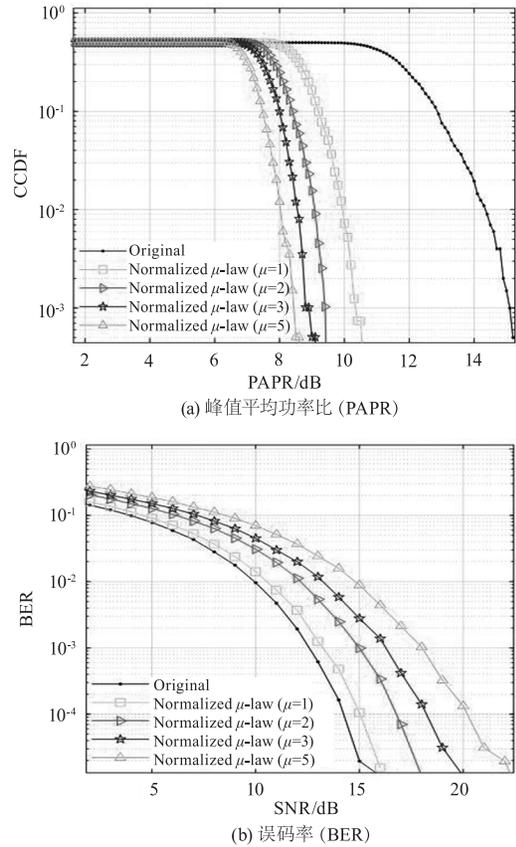


图 3 归一化 μ 律压扩技术应用于 ACO-OFDM 系统中的表现性能
Fig. 3 Performance of normalized μ -law companding technology applied to ACO-OFDM system

4 联合方案性能与结果分析

在上述基础上,采用 Hadamard 预编码技术与归一化 μ 律压扩技术联合(简称“联合方案”)应用于 ACO-OFDM 系统进行性能改善,如图 4 所示。在仿真实验过程中,数据子载波数目为 64,总的子载波数目为 256,IFFT 点数设置为 256,OFDM 块设置为 2000,循环前缀设置为 16,SNR 设定在 0~30 dB,使用 16 阶 QAM 调制,信道为高斯白噪声信道。

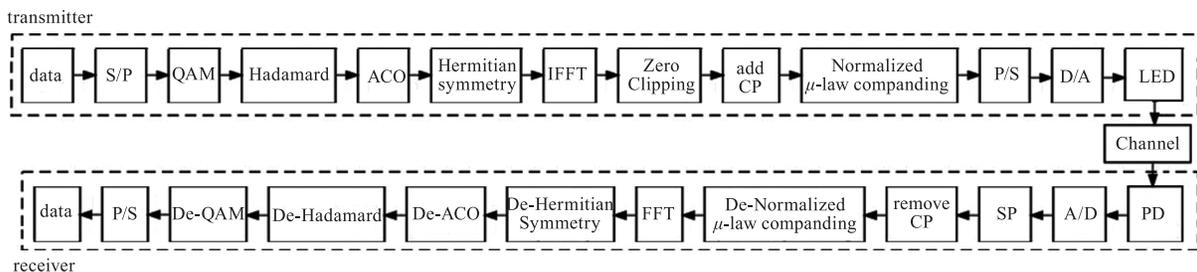


图 4 联合方案应用于 VLC 系统中的流程图
Fig. 4 VLC system based on hybrid approach

图5是未改进的ACO-OFDM系统(即图1)及在此系统增加Hadamard预编码技术、归一化 μ 律压扩技术、Hadamard预编码与归一化 μ 律压扩联合技术的不同信号系统在16阶QAM调制下的PAPR性能仿真结果。图5显示,未改进的ACO-OFDM系统在10.2 dB时才开始出现PAPR下降,在此系统上单独增加了Hadamard预编码技术操作后,信号在PAPR下降性能基本保持不变。但单独增加归一化 μ 律压扩技术后,在 $\mu=1$ 的信号在7.9 dB时PAPR开始出现下降趋势, $\mu=2$ 的信号在7.2 dB时PAPR开始出现下降。而联合应用Hadamard预编码与归一化 μ 律压扩技术在原始ACO-OFDM系统上, $\mu=1$ 的信号PAPR在7.8 dB时已经开始下降, $\mu=2$ 的信号PAPR则在7 dB时已经开始下降,信号PAPR性能有较大改善。表1是16-QAM调制下这几种不同系统方案下的PAPR情况,数据分析表明在未改进的ACO-OFDM系统中仅增加Hadamard预编码技术操作对于PAPR的改进较小,而增加归一化 μ 律压扩技术操作则能在一定程度上改进原始ACO-OFDM系统的峰值平均功率比:在CCDF = 10^{-1} 时,未改进的系统的PAPR为12.8 dB,而 $\mu=1$ 的归一化 μ 律压扩系统的PAPR为9.2 dB, $\mu=2$ 的归一化 μ 律压扩系统的PAPR为8.4 dB。而应用联合方案在抑制PAPR方面也体现显著改善:在CCDF = 10^{-1} 时, $\mu=1$ 的系统PAPR值为8.8 dB, $\mu=2$ 的系统PAPR值为8.1 dB。

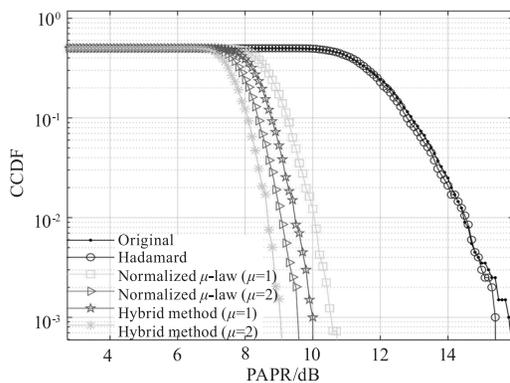


图5 16-QAM调制下PAPR性能

Fig. 5 PAPR performance under 16-QAM modulation

图6为ACO-OFDM系统在各方案下的误码率性能比较,与未改进的系统相比较,单独使用Hadamard预编码技术操作后误码率性能得到大幅提升,单独使用归一化 μ 律压扩技术则会恶化系统误

码率性能,而采用联合方案则在在一定程度上改善单独使用归一化 μ 律压扩技术带来的误码率性能恶化,使得误码率性能得到提升,接近于单独使用Hadamard预编码技术操作后误码率性能。表2是ACO-OFDM系统在各方案下的误码率性能数据,在BER = 10^{-4} 时,未改进的ACO-OFDM系统需要的最小SNR值为14.3 dB;使用Hadamard预编码系统需要的最小SNR的值为11 dB,比原始系统降低了3.3 dB;归一化 μ 律压扩($\mu=1$)系统需要的最小SNR值为15 dB,相较恶化了0.7 dB;归一化 μ 律压扩($\mu=2$)系统需要的最小SNR值为17 dB,对比原始系统恶化了2.7 dB;而联合方案系统所需要的最小SNR值为13.3 dB,比未改进的系统低1 dB,比单独归一化 μ 律压扩($\mu=1$)系统降低了1.7 dB。

表1 16-QAM调制下,不同系统方案下的PAPR情况

Tab. 1 PAPR value under different system solutions in 16-QAM modulation

System Solutions	PAPR at CCDF/dB		
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
Original	12.8	14.1	15.8
Hadamard	12.6	14	15.4
Normalized μ -law companding ($\mu=1$)	9.2	10.1	10.6
Normalized μ -law companding ($\mu=2$)	8.4	9	9.5
Hybrid method ($\mu=1$)	8.8	9.5	10
Hybrid method ($\mu=2$)	8.1	8.6	9.1

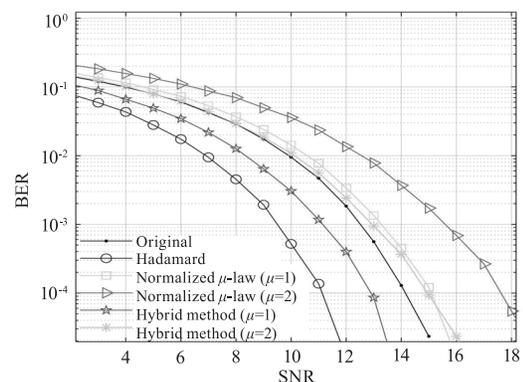


图6 16-QAM调制下BER性能

Fig. 6 BER performance under 16-QAM modulation

由此综合图5、图6可以看出,在压扩参数选择 $\mu=1$ 时(BER选择 10^{-3} , PAPR选择 10^{-3}),联合应用Hadamard与归一化 μ 律压扩技术的系统取得了较好的BER性能、PAPR抑制性能,比原始系统分别

优化了 1.1 dB、5.8 dB。仿真结果充分验证了 Hadamard 与归一化 μ 律压扩联合方案在提升 BER 性能、抑制 PAPR 值这两方面的优越性。

表 2 16-QAM 调制下,不同系统的误码率情况

Tab.2 BER value under different system solutions

in 16-QAM modulation

System Solutions	BER	SNR/dB
Original	10^{-3}	12.5
	10^{-4}	14.3
Hadamard	10^{-3}	9.5
	10^{-4}	11
Normalized μ -law companding($\mu = 1$)	10^{-3}	13.4
	10^{-4}	15
Normalized μ -law companding($\mu = 2$)	10^{-3}	15.2
	10^{-4}	17.3
Hybrid method($\mu = 1$)	10^{-3}	11.4
	10^{-4}	13.3
Hybrid method($\mu = 2$)	10^{-3}	13.4
	10^{-4}	15.2

5 结论

在 ACO-OFDM 系统中, μ 律压扩方法是抑制系统 PAPR 的有效方法,但存在压扩后平均功率过高,导致系统误码率严重恶化的缺点,经过改进后的归一化 μ 律压扩方法可以达到压扩前后平均功率大体不变的效果,并更好的降低 ACO-OFDM 系统 PAPR,同时对系统的误码率恶化程度相较于普通 μ 律压扩方法更低。Hadamard 预编码技术操作在 ACO-OFDM 系统上体现出优秀的误码率性能,但其对系统 PAPR 的优化程度较小。将 Hadamard 预编码技术与归一化 μ 律压扩技术联合应用到 ACO-OFDM 系统上时,可以同时实现降低 PAPR 与误码率。另外,仿真结果表明,在压扩参数 $\mu = 1$ 时,Hadamard 预编码技术与归一化 μ 律压扩技术的联合方案系统的 PAPR 抑制效果较佳,且提升了系统误码率性能,在 CCDF = 10^{-3} 时,PAPR 比原始系统、单独增加 Hadamard 预编码技术、单独增加归一化 μ 律压扩系统($\mu = 1$) 分别降低了 5.8 dB、4.5 dB、0.6 dB;在 BER = 10^{-4} 时,最小 SNR 比原始系统、单独增加归一化 μ 律压扩系统($\mu = 1$) 分别降低化了 1 dB、1.7 dB。综上可知,采用压扩参数 $\mu = 1$ 的联合方案系统能够在保持较好误码率性能的情况下最大程度

的抑制 ACO-OFDM 系统 PAPR。

参考文献:

- [1] Chi N, Haas H, Kavehrad M, et al. Visible light communications: demand factors, benefits and opportunities [J]. IEEE Wirel. Commun., 2015, 22(2): 5-7.
- [2] Dang Yuchao, Cao Yang, Peng Xiaofeng, et al. Analysis of the influence of LED topology on visible light communication [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(6): 729-735. (in Chinese)
党宇超, 曹阳, 彭小峰, 等. LED 拓扑结构对可见光通信性能影响的分析 [J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 729-735.
- [3] Zhang Yun, Wang Xiang, Zhao Shanghong, et al. Analysis of BER performance for OFDM optical link under exponentiated weibull atmospheric turbulence [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(3): 311-317. (in Chinese)
张韵, 王翔, 赵尚弘, 等. 基于 Exponentiated Weibull 湍流模型的 OFDM 光链路性能分析 [J]. 激光与红外, 2018, 48(3): 311-317.
- [4] Cuiwei, Armstrong, Jean. Clipping noise mitigation in optical OFDM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3): 548-551.
- [5] Yang Yang. Research on OFDM modulation technique in visible light communication systems [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
杨洋. 可见光通信系统中的 OFDM 调制技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [6] Wu Y, He C, Zhang Q, et al. Low-complexity recombined SLM scheme for PAPR reduction in IM/DD optical OFDM systems [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 32237-32247.
- [7] Aghdam M H, Sharifi A A. PAPR reduction in OFDM systems: an efficient PTS approach based on particle swarm optimization [J]. ICT Express, 2019, 5(3): 178-181.
- [8] M Sung, J Lee, J Jeong. DCT-precoding technique in optical fast OFDM for mitigating fiber nonlinearity [J]. IEEE Photon Technol. Lett., 2013, 25: 2209-2213.
- [9] T A Truong, M Arzel, H Lin, et al. Jézéque DFT-precoded OFDM-an alternative candidate for next generation PONs [J]. J. Light. Technol., 2014, 32: 1228-1238.
- [10] B M Lee, Y Kim. An adaptive clipping and filtering technique for PAPR reduction of OFDM signals [J]. Circuits Syst. Signal Process., 2013, 32(3): 1335-1349.
- [11] N Ali, R Almahainy, A Al-Shabli, et al. Analysis of improved mu-law companding technique for OFDM systems

- [J]. IEEE Trans. Consum. Electron., 2017, 63(2): 126–134.
- [12] H B Jeon, J S No, D J Shin. A low-complexity SLM scheme using additive mapping sequences for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Trans. Broadcast., 2011, 57(4): 866–875.
- [13] D W Lim, S J Heo, J S No. An overview of peak-to-average power ratio reduction schemes for OFDM signals [J]. J. Commun. Netw., 2009, 11(3): 229–239.
- [14] Armstrong J, Lowery A J. Power efficient optical OFDM [J]. Electronics Letters, 2006, 42(6): 370–372.
- [15] Compilation Committee of Mathematic Dictionary. Volume II of mathematic dictionary [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2002. (in Chinese)
数学辞海编辑委员会. 数学辞海第二卷 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [16] Compilation Committee of Modern Mathematics Handbook, Xu Lizhi. Modern mathematics handbook · Computer mathematics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2001. (in Chinese)
- 《现代数学手册》编纂委员会, 徐利治. 现代数学手册 · 计算机数学卷 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [17] X B Wang, T T Tjung, C S Ng. Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique [J]. IEEE Trans. Broadcast., 1999, 45(3): 303–307.
- [18] Wang Yifei, Zhang Xin. Reducing peak to average power ratio based on for OOFDM signals based on companding technique [C]//CSEE-B13. Research and Application of Power Line Communication Technology. Beijing: Posts & Telecom Press, 2019: 7. (in Chinese)
王艺霏, 张鑫. 基于压扩变换的 OOFDM 信号 PAPR 抑制技术 [C]//中国电机工程学会电力通信专业委员会. 电力通信技术研究及应用. 北京: 人民邮电出版社, 2019: 7.
- [19] Lu Yanli. Reducing peak to average power ratio based on low complexity companding technique [D]. Jilin: Jilin University, 2009. (in Chinese)
卢艳丽. 基于压扩变换的低复杂度 PAPR 降低技术研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2009.