

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.06.007

一种抑制 OFDM 可见光通信系统 PAPR 的混合算法

曹 辉, 李炉焦, 陈 龙, 胡仕刚

(湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 针对翻转正交频分复用可见光通信系统峰值平均功率比高的问题, 提出了一种基于离散余弦变换预编码和改进的 μ -law 压扩技术来抑制系统 PAPR 的混合算法。该混合算法首先对频域信号进行预编码操作, 降低信号峰值; 然后, 对编码后的时域信号进行基于平均功率的压扩处理, 进一步降低信号幅值, 实现抑制信号 PAPR 的目的。仿真结果表明, 改进的混合算法对信号峰值的抑制效果优于传统混合算法, 在脉冲幅度调制、互补累积分布函数值为 10^{-3} 时, 与采用预编码和 μ -law 压扩的算法相比, 改进算法的 PAPR 下降了 1.09 dB。

关键词: 可见光通信; 正交频分复用; 峰均功率比; 改进的 μ -law 压扩算法

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)06-0044-06

引文格式: 曹 辉, 李炉焦, 陈 龙, 等. 一种抑制 OFDM 可见光通信系统 PAPR 的混合算法 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(6): 44-49.

A Hybrid Algorithm for PAPR Suppression in OFDM Visible Light Communication Systems

CAO Hui, LI Lujiao, CHEN Long, HU Shigang

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology,
Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: A hybrid algorithm, which is based on discrete cosine transform precoding and improved μ -law compression technique, has thus been proposed to suppress the peak to average power ratio of a flipped orthogonal frequency division multiplexing visible light communication system. The proposed hybrid algorithm first performs precoding operation on the frequency domain signal so as to reduce the signal peak value. Then, the encoded time-domain signal is compressed and spread based on average power for a further reduction of the signal amplitude and achieve the goal of suppressing signal PAPR. The simulation results show that the improved hybrid algorithm is characterized with a better suppression effect on signal peak values than traditional hybrid algorithms. With a value of 10^{-3} in the complementary cumulative distribution function and the pulse amplitude modulation, the PAPR of the improved algorithm decreases by 1.09 dB compared with the algorithm using precoding and μ -law companding.

Keywords: visible light communication; orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; improved μ -law companding algorithm

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年科学研究基金资助项目 (22B0479)

作者简介: 曹 辉, 男, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为光无线通信, E-mail: chzaikaoyan@163.com

通信作者: 李炉焦, 男, 湖南科技大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为光纤通信, 光无线通信,
E-mail: lujiao-li@hnust.edu.cn

1 研究背景

近年来, 可见光通信 (visible light communication, VLC) 被认为是满足日益增长的高带宽需求和解决射频 (radio frequency, RF) 频谱拥塞问题的关键技术之一, 其具有频谱丰富、安全可靠、抗电磁干扰等多种优势^[1-3]。正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术是一种多载波传输技术, 因其频谱效率高、抗符号间干扰 (inter symbol interference, ISI) 能力强而在 VLC 中得到了广泛应用^[4-5]。在强度调制 (intensity modulated, IM) / 直接检测 (direct detection, DD) 系统中, OFDM 信号必须是正信号和实信号, 实信号可通过限制输入矢量具有厄密特对称性来生成, 对于正信号的获取可以通过直流偏置光 OFDM 和非对称削波光 OFDM 来实现。^[7]李炉焦等^[8]提出了一种使用快速哈特莱变换 (fast Hartley transform, FHT) 的翻转 -OFDM (Flip-OFDM) 系统。该系统的输入信号不需要满足厄密特对称性, 信号的负部分在传输前被翻转, 从而得到非负信号。FHT 的应用弥补了 Flip 操作牺牲的频谱效率, 同时与快速傅里叶变换相比, 其计算复杂度更低, 系统具有更好地应用前景。

当 OFDM 信号中每个子载波的振幅相似或接近时, 合成的时域波形会产生较大的峰值, 从而导致较高的峰均功率比 (peak to average power ratio, PAPR)^[9]。而高 PAPR 可能会导致信号失真, 影响系统的误码率 (bit error rate, BER) 性能。近年来, 研究人员提出了许多降低 PAPR 的技术, 主要分为信号预失真^[10]、信号预编码^[11-14]和概率算法^[15-16]3 类。柯熙政等^[17]提出了一种离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT) 联合迭代限幅滤波的方法抑制系统的 PAPR, 并研究了哈特莱变换下 Hadamard 预编码与 DCT 预编码分别对 PAPR 的抑制作用, 结果表明 DCT 预编码对 PAPR 的抑制优于 Hadamard 预编码, 同时表明哈特莱变换相较于 FFT 具有更高的频谱效率和更低的计算复杂度。Tang B. 等^[18]提出了一种迭代限幅滤波和增强型非线性压缩降低 PAPR 的算法, 增强型非线性压扩具有更优的 PAPR 抑制效果。候影影等^[19]提出了一种联合限幅和归一化压扩来降低 PAPR 的算法, 相较于传统压扩算法, 归一化压扩算法具有更好的 PAPR 抑制效果, 该技术虽然降低了 PAPR, 但引入了限幅, 损失了更多的误码性能。

结合上述内容, 本文提出了一种将 DCT 预编码与改进的 μ -law 压扩技术混合抑制系统 PAPR 的算法, 仿真分析了不同方案下信号 PAPR 的 CCDF 特性和误码率性能。仿真结果表明, 与预编码联合 μ -law 压

扩算法相比, 本文提出的联合算法在抑制系统 PAPR 上具有更好的表现。

2 系统模型和理论分析

图 1 为应用 IM/DD 可见光通信系统的 Flip-OFDM 系统框图。在文献 [8] 的基础上, 增加了预编码模块和压扩模块, 以降低 Flip-OFDM 系统的 PAPR。在发射端, 数据序列经过串-并转换后被发送到星座映射器 (BPSK/m-PAM)。

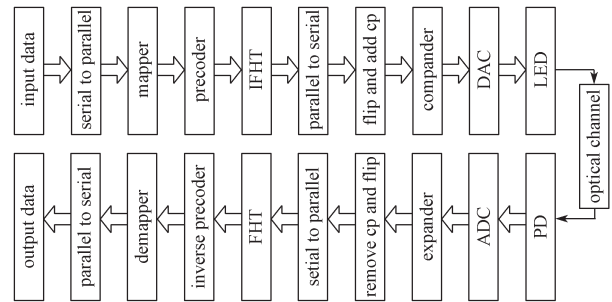


图 1 Flip-OFDM 可见光通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of Flip-OFDM visible communication system

映射后的输出定义为 $\mathbf{S}=[S_0 \ S_1 \ \cdots \ S_{N-1}]^T$ 。序列 $\mathbf{S}$ 经过预编码块 $\mathbf{P}$ 变换后得到矢量 $\mathbf{X}=[X_0 \ X_1 \ \cdots \ X_{N-1}]^T$ 。经过逆快速哈特莱变换 (IFHT) 后, 时域信号 $\mathbf{x}(n)$ 表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(n) &= \text{IFHT}\{\mathbf{P} \cdot \mathbf{S}(k)\} = \text{IFHT}\{\mathbf{X}(k)\} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{P} \cdot \mathbf{S}(k) \text{cas}\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{P} \cdot \mathbf{S}(k) \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \right]. \quad (1) \end{aligned}$$

式中: $\text{cas}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)$ 为哈特莱变换核函数; $\mathbf{S}(k)$ 为映射的第 k 条子载波信号; $n=0, 1, \cdots, N-1$; $\mathbf{P}$ 为预编码矩阵, 可表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{0,0} & \cdots & P_{0,N-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N-1,0} & \cdots & P_{N-1,N-1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

DCT 变换涉及数据输入与余弦方程之间的乘法运算, 表达式中的元素都小于 1。矩阵 $\mathbf{P}$ 的每行和每列元素的大小由式 (3)^[14] 给出:

$$P_{m,n} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & m=0; \\ \frac{1}{\sqrt{N}} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi m}{2N}\right], & 1 \leq m \leq N-1. \end{cases} \quad (3)$$

双极性信号通过翻转操作获得单极性信号, 然后

添加循环前缀 (cyclic prefix, CP)。经过压扩模块后, 将得到的信号进行数模转换 (digital to analog, D/A), 最后通过驱动 LED 将电信号转换为光信号。

Flip-OFDM 系统的 PAPR 由式 (4) 得出:

$$PAPR = 10 \log \frac{P_{\text{peak}}}{P_{\text{aver}}} = 10 \log \frac{\max |x|^2}{E[|x|^2]} \quad (4)$$

式中: $E[\cdot]$ 、 P_{peak} 和 P_{aver} 分别为统计期望值、峰值功率和平均功率。

互补累积分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF) 通常用于计算 PAPR 超过某一阈值的概率, 其表达式为

$$CCDF = P(PAPR > PAPR_0) = 1 - P(PAPR < PAPR_0) = 1 - (1 - e^{-PAPR_0})^N \quad (5)$$

式中: P 为概率; $PAPR_0$ 为给定的阈值; 通常用 CCDF 表示系统 PAPR 性能的好坏。

μ -law 压扩变换通过对信号进行压缩扩展变换来改变信号的幅值, 进而达到抑制系统 PAPR 的目的。与传统 μ -law 压扩算法使用 V_{max} (信号 x 的最大值) 进行归一化处理信号不同, 本文使用信号的平均功率进行处理信号, 本文改进后的 μ -law 压扩算法为

$$y(x) = \lambda \log \left(1 + \frac{\mu |x|}{\lambda} \right) / \log(1 + \mu) \text{sign}(x) \quad (6)$$

式中: $\lambda = \alpha \sqrt{P_{\text{aver}}}$, 其中 α 为常数; μ 为压扩值, 通常取 0~255。

图 2 为经过传统 μ -law 压扩算法和改进的 μ -law 压扩算法后的 OFDM 信号时域波形, 从图中可以看出, 传统 μ -law 压扩算法的 OFDM 信号峰值在 ± 0.3 范围内, 而本文改进的 μ -law 压扩算法的 OFDM 信号峰值在 ± 0.2 范围内。表明本文改进的 μ -law 压扩算法可以更好地减小信号峰值, 降低系统的峰值功率, 进而可以更好地抑制系统的 PAPR。

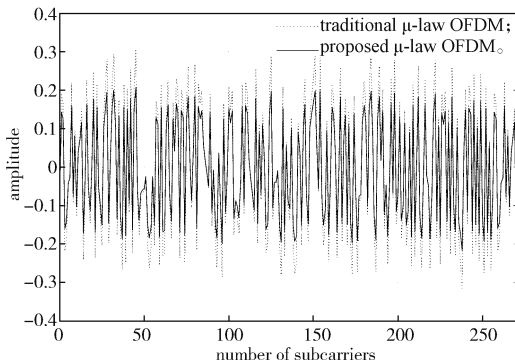


图 2 信号幅度比较

Fig. 2 Signal amplitude comparison

信号在加性高斯白噪声 (AWGN) 环境中传输, 并在接收器上进行光电转换。经过模数转换 (A/D) 后,

对信号进行解压扩操作。然后, 去除 CP 并进行翻转操作。最后, 通过解映射和并/串转换得到原始信号。

3 性能分析

本节主要对第 2 节中建立的 Flip-OFDM 系统抑制 PAPR 的方案进行性能分析。主要从系统不同信噪比下误码率性能和信号 PAPR 的 CCDF 特性两方面进行比较, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

Various parameters	Parameters size	Various parameters	Parameters size
Number of OFDM symbols	4 000	SNR/dB	0~25
The subcarrier number	256	IFHT points	256
Companding value	2, 3, 5	Modulation mode	BPSK/4PAM

3.1 与预编码系统的性能比较

本节主要介绍了在不同调制方式和压扩值条件下, 原始系统、预编码系统和改进的系统的 PAPR 和误码率性能, 所得仿真结果见图 3~6。

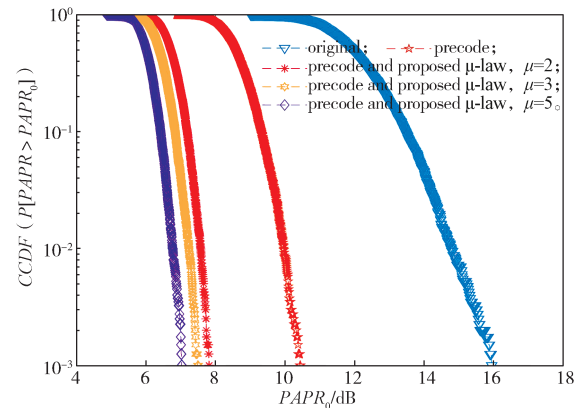


图 3 BPSK 下的 PAPR 性能比较

Fig. 3 PAPR comparison under BPSK modulation

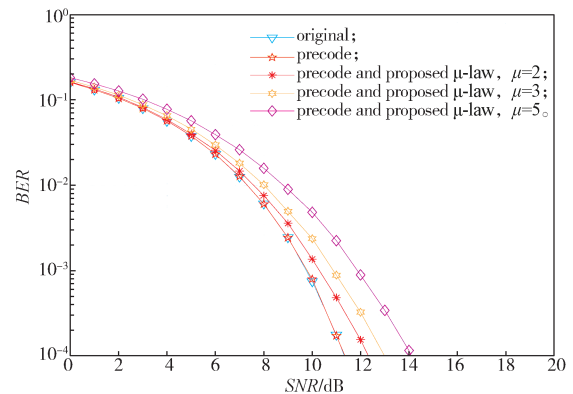


图 4 BPSK 下的 BER 性能比较

Fig. 4 BER comparison under BPSK modulation

图 3 所示仿真结果表明, 在 $CCDF=10^{-3}$ 时, 原始系统和预编码系统的 PAPR 值分别为 15.94 dB 和 10.43 dB。改进系统在 $\mu=2$ 时, PAPR 值为 7.81 dB, 相

比之下 PAPR 分别降低了 8.13, 2.62 dB。同样, 在 $\mu=3$ 时, 改进系统的 PAPR 值为 7.39 dB, PAPR 分别降低了 8.55, 3.04 dB。在 $\mu=5$ 时, 改进系统的 PAPR 值为 7.02 dB, PAPR 降低值分别为 8.92 dB 和 3.41 dB。

图 4 表明, 在 $BER=10^{-4}$ 时, 原始系统和预编码系统所需的 SNR 值约为 11.3 dB。然而, 对于改进的系统, 在 $\mu=2$ 时所需的 SNR 值为 12.3 dB, 比原始系统和预编码系统高 1 dB。此外, 在 $\mu=3$ 时, 改进的系统所需的信噪比比上述系统增加了 1.7 dB, 达到 13 dB。当 $\mu=5$ 时, 改进系统所需信噪比为 14.1 dB, 比上述的系统高 2.8 dB。

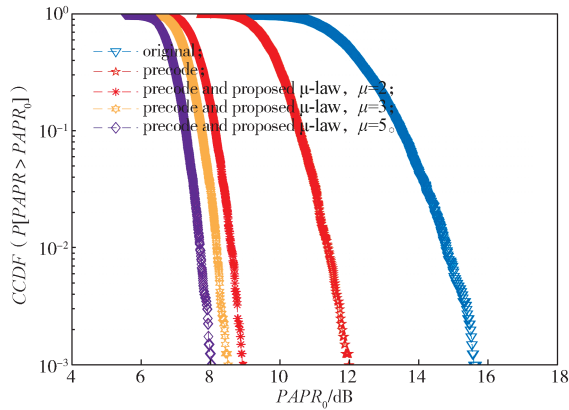


图 5 4PAM 下的 PAPR 性能比较

Fig. 5 PAPR comparison under 4PAM modulation

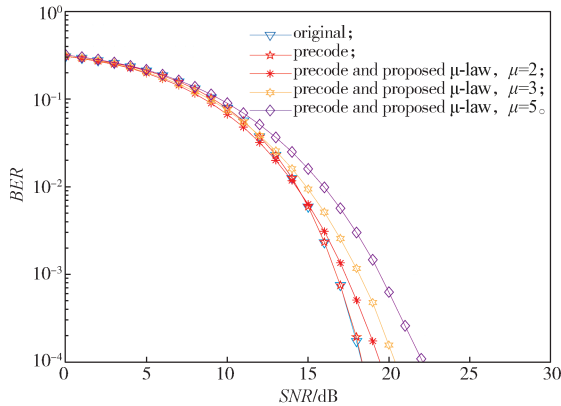


图 6 4PAM 下的 BER 性能比较

Fig. 6 BER comparison under 4PAM modulation

图 5 显示, 在 $CCDF=10^{-3}$ 时, 原始系统和预编码系统的 PAPR 值分别为 15.58 dB 和 12 dB。对于改进的系统, 当 $\mu=2$ 时, PAPR 值降低到 8.9 dB。与原始系统和预编码系统相比, 分别降低了 6.68 dB 和 3.1 dB。同样, 在 $\mu=3$ 时, 改进系统的 PAPR 值为 8.42 dB, 与上述系统相比, 分别降低了 7.16 dB 和 3.58 dB。当 $\mu=5$ 时, 改进的系统的 PAPR 值为 8 dB, 与上述系统相比, 分别降低了 7.58 dB 和 4 dB。

如图 6 所示, 在 $BER=10^{-4}$ 时, 原始系统和预编码系统所需的信噪比约为 18.35 dB。相比之下, 在

$\mu=2$ 时, 改进系统所需的信噪比为 19.4 dB, 比原始系统和预编码系统增加了 1.05 dB。在 $\mu=3$ 时, 改进系统所需的信噪比为 20.35 dB, 与之前的系统相比增加了 2 dB。在 $\mu=5$ 时, 改进系统所需的信噪比比先前系统增加了 3.72 dB, 达到 22.07 dB。

3.2 与传统联合算法的性能比较

由上节可知, 随着 μ 值的增加, 对系统 PAPR 的抑制效果也随之提升, 但系统在保持误码率不变的情况下, 所需的信噪比也随之增大。为在抑制系统 PAPR 的同时保持较优的误码率, 本节对上述不同压扩值下的 PAPR 和 SNR 进行分析, 以寻求较优的压扩值。比较在 $CCDF=10^{-3}$ 、 $BER=10^{-4}$ 条件下, 原始系统的 $PAPR=15.58$ dB、 $SNR=18.35$ dB 时进行。改进后的压扩算法系统与原始系统的 PAPR 和 SNR 性能参数差值如表 2 所示, 图 7 为对应参数曲线。

表 2 当 $CCDF=10^{-3}$ 、 $BER=10^{-4}$ 时, PAPR 和 SNR 性能分析结果

Table 2 PAPR and SNR performance analysis results with $CCDF=10^{-3}$ 、 $BER=10^{-4}$

value	PAPR/dB	PAPR reduction/dB	SNR/dB	SNR difference/dB
2	8.90	6.68	19.40	1.06
3	8.42	7.16	20.35	2.00
4	8.22	7.36	21.28	2.93
5	8.00	7.58	22.07	3.72
7	7.75	7.83	22.95	4.60

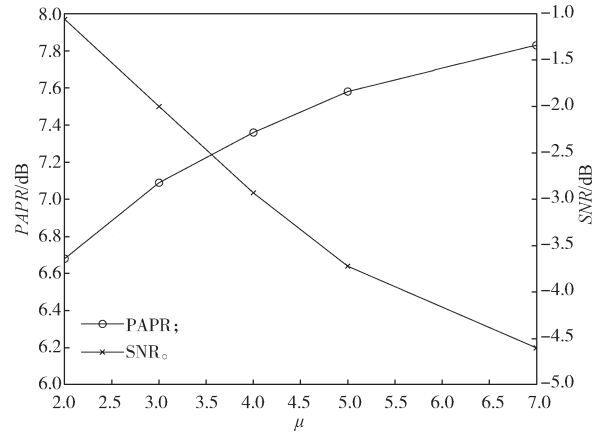


图 7 不同压扩值下的 PAPR 和 SNR 变化曲线

Fig. 7 PAPR and SNR change curves under different μ values

结合表 2 和图 7, 可以看出当 μ 的取值为 3 时, 所提出的方案具有良好的 PAPR 抑制效果, 同时系统信噪比损失相对较小。因此, 本节以 $\mu=3$ 为例进行仿真比较, 所得仿真结果见图 8~11。

如图 8 所示, 当 $CCDF=10^{-3}$ 时, 改进系统的 PAPR 值为 7.39 dB, 而原始系统、预编码系统和传统联合算法系统的 PAPR 值分别为 15.94, 10.43, 8.23 dB。因此, PAPR 值分别降低 8.55, 3.04, 0.84 dB。在

图 9 中, 当 $BER=10^{-4}$ 时, 原始系统、预编码系统、传统联合算法系统和改进的系统所需的信噪比分别为 11.35, 11.35, 12.2, 13.0 dB。与原始系统、预编码系统和传统联合算法系统相比, 改进的系统所需的信噪比分别提高了 1.65, 1.65, 0.8 dB。

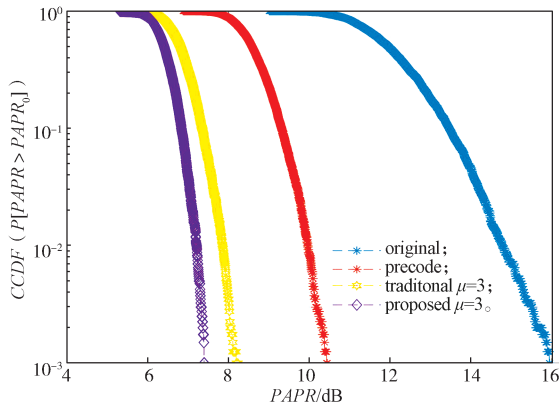


图 8 BPSK 下的 PAPR 比较

Fig. 8 PAPR comparison under BPSK modulation

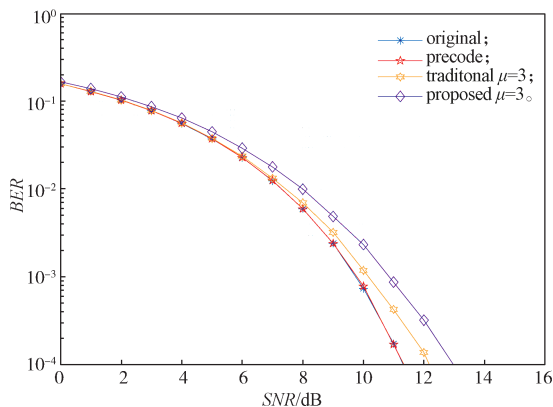


图 9 BPSK 下的 BER 比较

Fig. 9 BER comparison under BPSK modulation

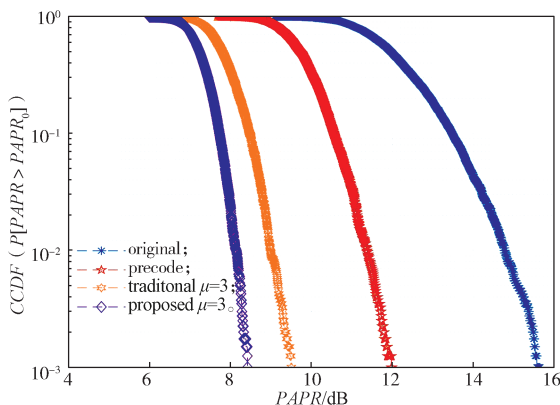


图 10 4PAM 下的 PAPR 比较

Fig. 10 PAPR comparison under 4PAM modulation

如图 10 所示, 当 $CCDF=10^{-3}$ 时, 原始系统、预编码系统和传统联合算法系统的 PAPR 值分别为 15.58, 12.0, 9.51 dB, 改进系统的 PAPR 值为 8.42 dB, 与之相比可知, PAPR 值分别降低 7.16, 3.58, 1.09

dB。由图 11 可以看出, 当 $BER=10^{-4}$ 时, 原始系统、预编码系统、传统联合算法系统和提出的联合算法系统所需的信噪比分别为 18.5, 18.5, 19.5, 20.35 dB。与原始系统、预编码系统和传统联合算法系统相比, 所需的信噪比分别提高了 1.85, 1.85 dB 和 0.85 dB。

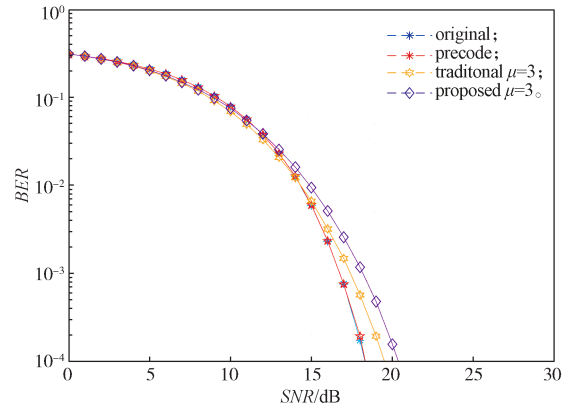


图 11 4PAM 下的 BER 比较

Fig. 11 BER comparison under 4PAM modulation

上述结果表明, 改进系统采用信号平均功率代替传统算法中的归一化参数, 然后对信号进行压扩处理, 可以更好地降低系统峰值, 具有更好地抑制系统峰均功率比的效果。同时, 与传统联合算法相比, 改进算法没有额外增加计算复杂度, 而且由于没有额外占用信号带宽, 所以在频谱效率方面, 两者具有近似的性能。

4 结论

本文将 DCT 预编码与 μ -law 压扩技术相结合, 并对 μ -law 压扩算法进行改进, 使其在处理时域信号的效果优于传统 μ -law 压扩算法, 进而更好地抑制系统的 PAPR。仿真结果表明, 在 BPSK 调制下, 与原始系统、预编码系统和传统联合 μ -law 压扩系统相比, 改进系统的 PAPR 分别降低了约 8.55, 3.04, 0.84 dB。在 4PAM 调制下, 与原始系统、预编码系统和传统的联合 μ -law 压扩算法系统相比, 本文改进系统的 PAPR 分别降低了约 7.16, 3.58, 1.09 dB。该算法相比于传统混合算法进一步抑制了系统的 PAPR, 但在误码性能上有一定损失。为更好地适用可见光通信系统, 在抑制系统 PAPR 的同时, 优化 BER 性能是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] MOHAMMED N A, ELNABAWY M M, KHALAF A A M. PAPR Reduction Using a Combination Between Precoding and Non-Linear Companding Techniques for ACO-OFDM-Based VLC Systems[J]. Opto-Electronics

- Review, 2021, 29(2): 59–70.
- [2] JAHID A, ALSHARIF M H, HALL T J. A Contemporary Survey on Free Space Optical Communication: Potentials, Technical Challenges, Recent Advances and Research Direction[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2022, 200: 103311.
- [3] YU T C, HUANG W T, LEE W B, et al. Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications[J]. Crystals, 2021, 11(9): 1098.
- [4] ZHAO L, CAI K Y, JIANG M. Multiuser Precoded MIMO Visible Light Communication Systems Enabling Spatial Dimming[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(20): 5624–5634.
- [5] MAHMUD M H, HOSSAIN M M, KHAN A A, et al. Performance Analysis of OFDM, W-OFDM and F-OFDM Under Rayleigh Fading Channel for 5G Wireless Communication[C]//2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS). Thoothukudi: IEEE, 2020: 1172–1177.
- [6] CHEN R, PARK K H, SHEN C, et al. Visible Light Communication Using DC-Biased Optical Filter Bank Multi-Carrier Modulation[C]//2018 Global LIFI Congress (GLC). Paris: IEEE, 2018: 1–6.
- [7] IBRAHIM A, PRAT J, ISMAIL T. Asymmetrical Clipping Optical Filter Bank Multi-Carrier Modulation Scheme[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(5): 230.
- [8] 李炉焦, 陈 君, 唐志军, 等. 光无线通信中基于哈特莱变换的翻转 OFDM 技术 [J]. 光学学报, 2021, 41(19): 82–88.
LI Lujiao, CHEN Jun, TANG Zhijun, et al. Flip-OFDM Based on Hartley Transform for Optical Wireless Communications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 82–88.
- [9] 孙柏昶, 李佳宣, 张金波, 等. 正交频分复用信号峰均比抑制技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(1): 126–131.
SUN Baichang, LI Jiaxuan, ZHANG Jinbo, et al. Research on the Crest Factor Reduction Algorithm for OFDM Signal[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(1): 126–131.
- [10] LIU X R, ZHANG X Y, ZHANG L, et al. PAPR Reduction Using Iterative Clipping/Filtering and ADMM Approaches for OFDM-Based Mixed-Numerology Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(4): 2586–2600.
- [11] TAHA B, FAYED H A, ALY M H, et al. A Reduced PAPR Hybrid OFDM Visible Light Communication System[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(12): 815.
- [12] FENG S M, FENG H L, ZHOU Y, et al. Low-Complexity Hybrid Optical OFDM with High Spectrum Efficiency for Dimming Compatible VLC System[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3666.
- [13] PRADHAN J, HOLEY P, KAPPALA V K, et al. Performance Analysis of ACO-OFDM NOMA for VLC Communication[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(8): 531.
- [14] EI-GANINY M Y, KHALAF A A M, HUSSEIN A I, et al. Hybrid PAPR Reduction Schemes for Different OFDM-Based VLC Systems[J]. Opto-Electronics Review, 2022, 30(3): e141951.
- [15] GOPI S, KALYANI S. An Optimized SLM for PAPR Reduction in Non-Coherent OFDM-IM[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(7): 967–971.
- [16] JAWHAR Y A, AUDAH L, TAHER M A, et al. A Review of Partial Transmit Sequence for PAPR Reduction in the OFDM Systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 18021–18041.
- [17] 柯熙政, 雷 妍, 张 颖. Hartley 变换 OFDM 调制的可见光通信研究 [J]. 信号处理, 2019, 35(2): 266–274.
KE Xizheng, LEI Yan, ZHANG Ying. Research on OFDM System Based on Hartley Transform in Visible Light Communication[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(2): 266–274.
- [18] TANG B, QIN K Y, MEI H B. A Hybrid Approach to Reduce the PAPR of OFDM Signals Using Clipping and Companding[J]. IEEE Access, 2020, 8: 18984–18994.
- [19] 侯影影, 吕健鸿, 张丽娟, 等. 联合限幅和 μ 律压扩抑制可见光通信系统的峰均功率比 [J]. 光电子·激光, 2022, 33(11): 1192–1200.
HOU Yingying, LÜ Jianhong, ZHANG Lijuan, et al. Reduction of Peak-to-Average Power Ratio in Visible Light Communication System Using Clipping and Normalized M-Law Companding[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2022, 33(11): 1192–1200.

(责任编辑: 申 剑)