

DOI:10.16136/j.joel.2022.11.0071

联合限幅和 μ 律压扩抑制可见光通信系统的峰均功率比

侯影影, 吕健鸿, 张丽娟, 薛林林, 王中鹏*

(浙江科技学院 信息与工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 直流偏置光正交频分复用(DC-biased optical orthogonal frequency division multiplexing, DCO-OFDM)可见光通信(visible light communication, VLC)系统具有较高的峰均功率比(peak-to-average power ratio, PAPR)。为解决此问题,提出一种联合限幅和归一化 μ 律压扩算法抑制 DCO-OFDM 系统的 PAPR。首先,该联合算法利用限幅操作对时域信号中的大峰值信号进行削波来降低信号的幅值;其次,对限幅后的信号再进行压扩变换。通过这种联合算法,DCO-OFDM 系统的 PAPR 可以显著降低。实验仿真结果表明,当采用 16QAM 调制方式,互补累计函数的值为 10^{-3} 时,相比较于联合限幅和传统 μ 律压扩算法,此联合算法的 PAPR 下降了约 2.206 dB。

关键词: 直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM);峰均功率比(PAPR);限幅;归一化 μ 律压扩技术
中图分类号: O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)11-1192-09

Reduction of peak-to-average power ratio in visible light communication system using clipping and normalized μ -law companding

HOU Yingying, LV Jianhong, ZHANG Lijuan, XUE Linlin, WANG Zhongpeng*

(School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: In order to solve the problem of peak to average power ratio (PAPR) in DC-biased optical orthogonal frequency division multiplexing (DCO-OFDM) visible light communication (VLC) system, a joint PAPR reduction algorithm based on combining clipping and normalized μ -law companding is proposed. Firstly, some big peak signal in the time-domain is clipped by amplitude limiting to reduce the amplitude of the signal, and then the clipped signal is further processed by a normalized μ -law companding transform. With this way, the PAPR of DCO-OFDM signal can be effectively reduced. Experimental simulation result shows that the value of complementary accumulative function is 10^{-3} when 16QAM modulation is adopted, compared with the algorithm combined amplitude limiting with traditional μ -law companding transform, the PAPR of the combined algorithm decreases by about 2.206 dB.

Key words: DC-biased optical orthogonal frequency division multiplexing (DCO-OFDM); peak-to-average power ratio (PAPR); clipping; normalized μ -law companding technique

1 引言

近年来,人们对无线通信数据服务的需求越来越大,由于射频(radio frequency, RF)通信存在频谱拥塞问题,而可见光通信(visible light com-

munication, VLC)具有抗电磁干扰、安全性较好和频谱资源丰富等优势,所以 VLC 作为 RF 通信的一种补充被提出并且广泛研究^[1,2]。但是在数据传输速率方面, VLC 具有受发光二极管(light emitting diode, LED)带宽限制的缺点,由于单载波

* E-mail: wzp1966@163.com

收稿日期:2022-02-08 修订日期:2022-03-22

基金项目:浙江省自然科学基金(LZ221F010001)和泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学)开放基金(KFKT-2020103)资助项目

的调制技术不具备良好的抗干扰能力,且传输速率较低,不能满足人们对于通信高速化的需求,而作为多载波调制技术^[3]的正交频分复用技术(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM),具有信息传输速率快、抗多径干扰能力强和频谱利用率高特性,因此在 VLC 中得到了广泛应用。相比较于传统的 OFDM 系统,可见光 OFDM 通信系统常常采用强度调制直接检测(intensity modulated and direct detection, IM-DD)的调制方式,要求传输信号必须为非负实数信号,而直流偏置光正交频分复用信号是通过添加一个直流偏置来满足非负实数的要求。

OFDM 信号中相位相同的子载波在叠加时会产生较大的信号峰值,导致系统的峰均功率比(peak-to-average power ratio, PAPR)较高^[4]。在直流偏置光正交频分复用(DC-biased optical orthogonal frequency division multiplexing, DCO-OFDM)通信系统中,发射端 LED 的线性工作电压范围有限,当 PAPR 值越大的时候,代表着系统在发射端所输出的信号幅度范围也就越大,从而导致信号在经过 LED 时,会产生严重的信号失真,最终系统的性能就会降低。要想改善系统的误比特率性能,就必须解决系统发射端信号过高的 PAPR 的问题^[5]。

近年来,前人研究出 3 类 PAPR 抑制方法。第一类是信号失真类方法,包括限幅^[6]和压扩等^[7]方法。限幅和压扩的基本原理都是通过改变系统发射端时域信号的幅度,达到抑制系统 PAPR 的目的;不同的是,限幅是在发射端根据设定的门限值对时域信号进行裁剪^[6],而压扩变换是在系统的发射端通过压缩大信号和扩展小信号来变换信号的幅度^[7]。第二类是信号编码类方法,包括分组编码^[8]和预编码^[9]等。分组编码的基本原理是在信号编码后传输 PAPR 最小的信号;预编码的基本原理是用设定好的预编码矩阵对星座映射后的信号比特序列进行相应的处理,从而达到 PAPR 抑制目的^[9];文献[10]采用混沌加密的恒包络零自相关矩阵与 OFDM 符号相乘的方法,以降低正交频分复用-无源光网络系统的 PAPR。第三类是概率类方法,主要包括选择性映射法^[11]和部分传输序列法等^[12],这两种方法的基本原理是通过增加系统冗余度,降低高 PAPR 出现的概率,传输 PAPR 最小的信号,文献[13]提出利用导频辅助的方法降低 DCO-OFDM 系统 PAPR。上述 3 类方法各有各的优势和缺点,信号失真类方法的优势是实现比较简单,缺点是带内失真和带外辐射会导致系统的误码率性能下降。编码类方

法和概率类方法都属于无失真技术,它们最大的优势是不会造成信号的失真,缺点是存在计算复杂度高的问题,因此使用编码类方法和概率类方法可以在不影响系统性能的情况下很好地抑制系统的 PAPR。

针对 VLC 系统,文献[14]采用削波和分段线性压扩相结合的方法降低 PAPR,文献[15]提出迭代限幅滤波技术和一种增强的非线性压扩技术结合方案降低 OFDM 系统的 PAPR。在上述文献的启发下,鉴于参考文献[16]所提出的 DCO-OFDM 限幅系统可以发现,单独地使用限幅技术不能很好地抑制发射端信号的 PAPR,本文在此基础上联合 μ 律压扩技术进一步降低 PAPR,提出了一种基于限幅和归一化 μ 律压扩联合抑制 PAPR 算法,使其应用到 VLC 系统中,达到最大限度地抑制系统发射端信号 PAPR 的效果。首先,在快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)后对频域信号限幅,将双极性时域信号转换为单极性时域信号,满足系统非负实数信号的要求,然后采用本文提出的归一化 μ 律压扩技术以进一步降低 DCO-OFDM VLC 系统的 PAPR。仿真实验结果表明,相比较基于限幅和传统 μ 律压扩联合抑制 PAPR 算法,所提联合算法可以更好地抑制 VLC 系统的 PAPR。

2 VLC 系统模型

在 VLC 系统的发射端,最先把原始数据进行串并变换(serial/parallel, S/P),然后将并行的原始数据进行正交振幅调制(quadrature amplitude modulation, QAM),转换成比特流数据,得到频域离散信号 $\{X_k\}_{k=1}^{N/2-1}$ 。

OFDM 系统是通过 IFFT 运算将频域信号转换为时域信号,与其不同的是,可见光 DCO-OFDM 通信系统在经过 IFFT 运算后得到的时域信号必须满足实数特性的要求。所以在 IFFT 之前需要对频域离散信号进行 Hermitian 共轭对称变换。即:

$$X_k = \begin{cases} X_k, k = 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ X_{N-k}^*, k = \frac{N}{2} + 1, \dots, N - 1, \\ 0, k = 0, \frac{N}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, k 是 OFDM 符号数, N 是 IFFT 点数, $*$ 表示共轭。图 1 为本文采用的 DCO-OFDM VLC 系统模型。

共轭对称变换后的信号为 $\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$, 式中, T 表示转置, 经过 IFFT 运算后得到 N 点的时域离散信号, 即:

$$x_m = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left\{\frac{j2\pi km}{N}\right\}, k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

此外,为减小码间干扰,对时域离散信号 $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T$ 添加循环前缀(cyclic prefix, CP)。信号在进入系统中的LED时需为单极性实数信号,所以本文的实验系统中通过限幅操作将双极性时域信号 x_m 转换为单极性实数信号 $x_{\text{clip},m}$,再经过数模转换(digital to analog, D/A)将信号转换为电信号,最后通过驱动LED将电信号以光的形式送入信道。即:

$$x_{\text{clip},m} = \begin{cases} 0, & x_m < -A \\ x_m + A, & x_m \geq -A \end{cases}, \quad (3)$$

式中, A 是限幅幅度, $\sigma = \sqrt{E_s}$, $E_s = E[|X_k|^2]$, CR 代表限幅比,定义如下式:

$$\text{CR} = 20 \lg \frac{A}{\sigma} \text{dB}. \quad (4)$$

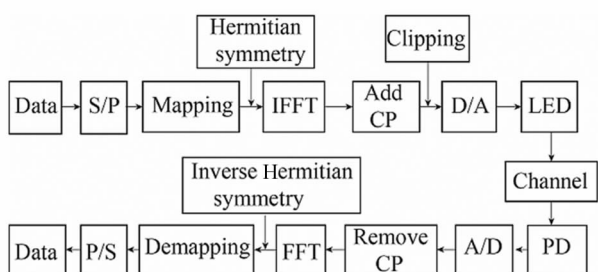


图1 DCO-OFDM 可见光系统模型

Fig. 1 DCO-OFDM visible light system model

信号经过 AWGN 信道进行传输,接收端信号经过光电检测器(photo-diode, PD)进行光电转换,然后进行模数转换和去循环前缀操作得到离散时域信号 y ,再经过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)操作得到频域信号 $\mathbf{Y} = [Y_0, Y_1, \dots, Y_{N-1}]$ 。在接收端,经过相应的逆操作,比如 Hermitian 反共轭对称、正交振幅解调和并串变换,还原出原始数据。

3 联合限幅与归一化 μ 律压扩抑制 PAPR 算法

本节主要从 PAPR 定义、限幅技术和归一化 μ 律压扩技术 3 个方面进行理论分析。

3.1 PAPR 定义

将 DCO-OFDM 峰值信号的功率值与信号的平均功率值之比定义为 PAPR,以 dB 为单位,表示为下式:

$$\text{PAPR} = 10 \lg \frac{\max |x_m|^2}{E[|x_m|^2]}, \quad (5)$$

式中, $E[|x_m|^2]$ 是信号的平均功率。

为了分析 PAPR 值的具体分布情况和描述系统 PAPR 的统计特性,可以选择使用互补累积分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF) [17]。CCDF 定义如下式:

$$\text{CCDF} = \Pr\{\text{PAPR} > \text{PAPR}_0\}, \quad (6)$$

式中, PAPR_0 是预先指定的门限值。在 CCDF 值一定时, PAPR_0 越小表示信号的 PAPR 性能越好。因此在实际仿真时,通常选择用 CCDF 来描述 PAPR 性能好坏。

3.2 限幅技术

直接限幅法(clipping)是降低 OFDM 信号 PAPR 的方法之一,属于信号失真类方法。其基本原理是把时域信号的最大幅度限制在预先设定的幅值水平,大于设定值的时域信号被削顶,小于设定值的时域信号保持不变,从而可以使信号顺利地通过非线性器件。在 DCO-OFDM 信号中运用直接限幅法的过程相当于在产生实数信号之后,对 OFDM 信号进行了非线性处理。本文使用的 DCO-OFDM VLC 系统是通过限幅操作将双极性 DCO-OFDM 时域信号转换为单极性的正实数信号 $x_{\text{clip},m}$,继而转变成光信号,具体限幅操作如式(3)。

3.3 归一化 μ 律压扩技术

压扩技术的全称是压缩扩展变换技术,它的基本原理是在发射端对信号进行压扩变换,在接收端则对信号进行反压扩变换。根据 PAPR 的定义式(5)可知, μ 律压扩技术主要是通过改变信号峰值功率和信号的平均功率两个方面来降低系统的 PAPR,传统的 μ 律压扩技术 [18] 只提高小信号功率,不改变峰值信号功率,在压扩变换后,信号的平均功率会明显变大,系统的 PAPR 就会降低,但是这样会导致使系统发射端消耗的功率过大,在实际应用中所需的成本过高,为了弥补这一缺点,本文提出了在 DCO-OFDM VLC 系统中使用归一化 μ 律压扩技术。

归一化 μ 律压扩技术的基本原理是通过压缩大信号功率,扩展小信号功率,使压扩后 DCO-OFDM 信号的平均功率等于压扩前信号的平均功率,同时由于信号的峰值功率变小,从而降低系统的 PAPR。由于在可见光 DCO-OFDM 系统中单独使用限幅技术不能很好地抑制 PAPR,本文提出在 DCO-OFDM 可见光通信系统中联合限幅和归一化 μ 律压扩技术

来进一步降低系统的 $PAPR$ 。图 2 为 DCO-OFDM 系统中联合限幅和归一化 μ 律压扩抑制 $PAPR$ 算法系统模型。

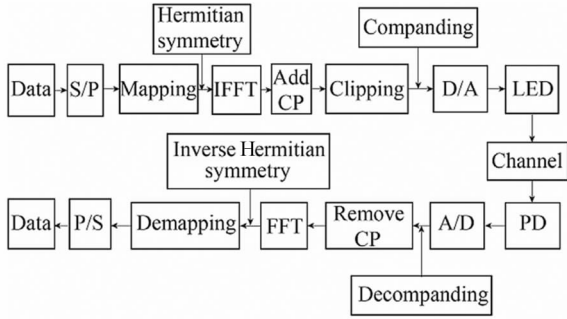


图 2 联合限幅与归一化 μ 律压扩抑制 $PAPR$ 算法系统模型

Fig. 2 System model of $PAPR$ suppression algorithm combined with clipping and normalized μ -law companding

归一化 μ 律压扩技术在发射端的压扩操作如下:

$$u_1(l) = \gamma \frac{\log(1 + \mu |x_{\text{clip},m}(l)|)}{\log(1 + \mu)} \text{sign}(x_{\text{clip},m}(l)), \quad (7)$$

接收端信号的反压扩如下式:

$$v_1(l) = \frac{1}{\mu} [(1 + \mu)^{\frac{r(l)}{\gamma}} - 1] \text{sign}(r(l)), \quad (8)$$

式中, $r(l)$ 是接收端经过模数转换后的信号, $x_{\text{clip},m}(l)$ 是 DCO-OFDM 系统中限幅后的信号, 即压扩前的信号, μ 表示压扩值, $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数。 γ 是归一化参数, 定义如式(10), 用于确保压扩前后信号的平均功率相同, 基本原理如下推导:

令 $v(l) = \frac{\log(1 + \mu |x_{\text{clip},m}(l)|)}{\log(1 + \mu)} \text{sign}(x_{\text{clip},m}(l))$, 则归一化压扩后的信号根据式(7) 可以表示为:

$$u_1(l) = \gamma \times v(l), \quad (9)$$

$$\gamma = \log(1 + \mu) \times \sqrt{\frac{E[|x_{\text{clip},m}(l)|^2]}{E\left[\left|\frac{\log(1 + \mu |x_{\text{clip},m}(l)|)}{\log(1 + \mu)}\right|^2\right]}}, \quad (10)$$

式中, $E[\cdot]$ 表示数学期望, 可以进一步将式(10) 转化为如下表达式:

$$\gamma = \sqrt{\frac{E[|x_{\text{clip},m}(l)|^2]}{E\left[\left|\frac{\log(1 + \mu |x_{\text{clip},m}(l)|)}{\log(1 + \mu)}\right|^2\right]}} = \sqrt{\frac{E[|x_{\text{clip},m}(l)|^2]}{E[|v(l)|^2]}}. \quad (11)$$

在上述推导过程中, $E[|x_{\text{clip},m}(l)|^2]$ 是压扩前

信号的平均功率, $u_1(l)$ 是压扩后的信号, $E[|u_1(l)|^2]$ 是压扩后信号的平均功率, 结合式(9) 和式(11) 可得:

$$\begin{aligned} E[|u_1(l)|^2] &= E[\gamma^2 \times |v(l)|^2] = \\ &= \gamma^2 \times E[|v(l)|^2] = \\ &= \frac{E[|x_{\text{clip},m}(l)|^2]}{E[|v(l)|^2]} \times E[|v(l)|^2] = \\ &= E[|x_{\text{clip},m}(l)|^2]. \end{aligned} \quad (12)$$

经过上述公式推导, 可以发现在归一化 μ 律压扩前后, DCO-OFDM 系统发射端信号的平均功率不变。

4 仿真结果及分析

本节首先通过仿真实验寻找较优的压扩值, 使本文提出的联合算法能够在确保 DCO-OFDM 可见光系统较好误比特率(bit error rate, BER)性能的情况下, 以最大限度地抑制系统的 $PAPR$ 。其次在选取较优压扩值后, 分别在 4QAM 和 16QAM 调制方式下进行实验仿真, 最后从 DCO-OFDM VLC 系统的压扩变换增益性能、 $PAPR$ 抑制性能和 BER 性能 3 个方面进行分析。

4.1 寻找较优压扩值

在 VLC 系统中, 给定不同的压扩值, 归一化 μ 律压扩技术抑制 $PAPR$ 的效果和带来的系统失真不同。随着设置的压扩值不断增大, 归一化 μ 律压扩技术抑制 $PAPR$ 的效果会越来越好, 然而系统的 BER 性能损失也会越来越大。为了确保联合限幅与归一化 μ 律压扩抑制 $PAPR$ 算法能够在最大限度抑制 DCO-OFDM 系统的 $PAPR$ 的同时, 保持较好的 BER 性能, 下面对本文提出联合算法的 $PAPR$ 抑制性能和 BER 性能进行仿真, 从而选取较优的压扩值作为后续的仿真实验参数。图 3 和图 4 中仿真了在 4QAM 调制下, 压扩值分别为 3、5 和 7 的情况下, 原始系统、限幅系统^[14] 和基于限幅与归一化 μ 律压扩联合算法的 $PAPR$ 抑制性能和 BER 性能。

通过仿真图 3 可以发现, 当 $\text{CCDF} = 10^{-3}$ 时, 原始系统的 $PAPR$ 为 12.55 dB, 限幅系统的 $PAPR$ 为 9.771 dB。当压扩值为 3, $\text{CCDF} = 10^{-3}$ 时, 本文提出的联合算法系统的 $PAPR$ 为 4.634 dB, 比原始系统改善了 7.916 dB, 比限幅系统改善了 5.137 dB; 当压扩值为 5, $\text{CCDF} = 10^{-3}$ 时, 本文提出的联合算法系统的 $PAPR$ 为 4.137 dB, 比原始系统改善了 8.413 dB, 比限幅系统改善了 5.634 dB; 当压扩值为

7, $CCDF=10^{-3}$ 时, 本文提出的联合算法系统的 $PAPR$ 为 3.786 dB, 比原始系统改善了 8.764 dB, 比限幅系统改善了 5.985 dB。结果表明, 随着压扩值的增加, 相比较于原始 DCO-OFDM 限幅系统, 本文提出的联合算法系统具有更好的 $PAPR$ 抑制效果。但是, 该方案会带来整个系统的失真, 通过图 4 可以发现, 当信噪比为 15 dB 时, 限幅系统的 BER 为 1.496×10^{-4} 。当压扩值为 3 时, 提出的联合算法系统的 BER 为 4.689×10^{-3} , 比限幅系统高; 当压扩值为 5 时, 提出的联合算法系统的 BER 为 1.208×10^{-2} ; 当压扩值为 7 时, 提出的联合算法系统的 BER 为 2.048×10^{-2} 。结果表明, 在相同的信噪比下, 随着压扩值的增加, 系统的 BER 性能越来越差。本文最终目的是要实现, 联合算法可以在最大限度抑制 DCO-OFDM 信号 $PAPR$ 的同时又可以保证整个系统的失真最小, BER 损失最小, 这就需要实验中寻找一个较优的压扩值。

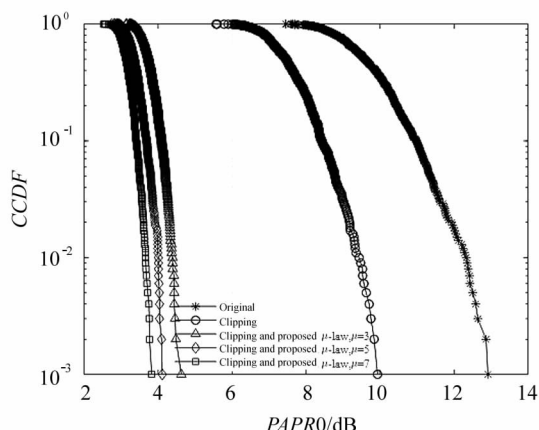


图3 联合限幅与归一化 μ 律压扩算法的 $PAPR$ 性能

Fig. 3 $PAPR$ influence of combined with clipping and normalized μ -law companding algorithm

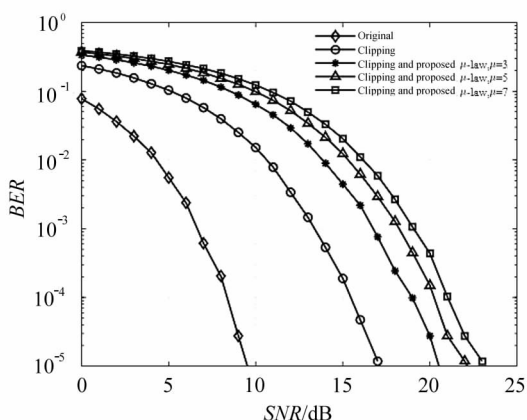


图4 联合限幅与归一化 μ 律压扩算法的 BER 性能

Fig. 4 BER influence of combined with clipping and normalized μ -law companding algorithm

图5仿真了在不同压扩值的情况下, 本文提出的基于限幅与归一化 μ 律压扩联合算法的 $PAPR$ 抑制性能和 BER 性能。

通过图 5 可以发现, 随着压扩值的增加, DCO-OFDM 信号的 $PAPR$ 在逐渐地下降, 表明压扩值越大, 本文提出联合方案抑制 $PAPR$ 的效果越好, 但是同时会带来信号失真, 产生噪声, 使整个系统的 BER 性能下降。为了使得其在更好地抑制 $PAPR$ 的同时又保证系统的失真较小, 从图中可以看到压扩值的较优取值范围在 4—5 之间。

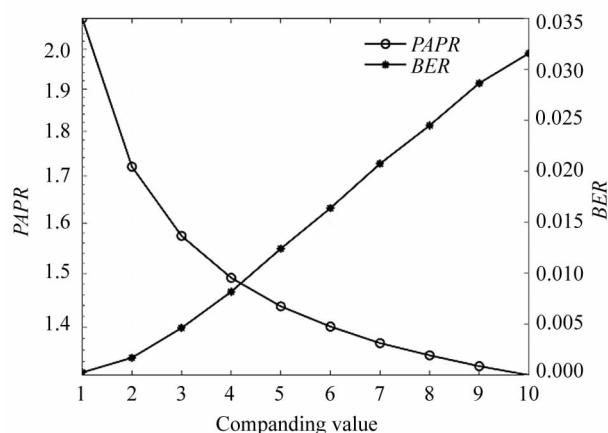


图5 随着压扩值 μ 变化的 $PAPR$ 和 BER 曲线图

Fig. 5 $PAPR$ and BER curves as μ value changes

4.2 变换增益性能

在 DCO-OFDM VLC 系统中, 可以用压扩变换增益来衡量 μ 律压扩变换技术抑制系统发射端信号 $PAPR$ 的能力, 将 μ 律压扩前信号的 $PAPR$ 与 μ 律压扩后信号的 $PAPR$ 两者之间的比值定义为 μ 律压扩变换增益, 以 dB 为单位。假设将 μ 律压扩变换前信号的 $PAPR$ 表示为 $PAPR_1$, 将 μ 律压扩变换后信号的 $PAPR$ 表示为 $PAPR_2$, 该可见光通信系统中的 μ 律压扩变换增益 G 定义如下式:

$$G = 10 \log_{10} \frac{PAPR_1}{PAPR_2} \quad (13)$$

图 6 仿真比较在不同压扩值的情况下, 传统 μ 律压扩技术和本文提出的归一化 μ 律压扩技术对 DCO-OFDM 可见光限幅系统的 $PAPR$ 抑制性能。图 7 是在 DCO-OFDM 可见光限幅系统中, 根据式 (13) 仿真比较传统 μ 律压扩技术和本文提出的归一化 μ 律压扩技术的变换增益性能。

通过图 6 可以发现, 随着压扩值不断地增加, 信号的 $PAPR$ 在逐渐地降低, 这是因为增加压扩值时, 信号的平均功率是恒定的, 而信号的峰值功率在逐

渐地降低。通过图 7 可以发现,随着压扩值不断地增加,压扩变换增益在不断地增大,表明峰值功率正在逐渐降低。同时从图 6 中可以明显地看出,在相同的压扩值下,本文提出的归一化 μ 律压缩扩展技术对可见光信号的 $PAPR$ 抑制效果要比传统的 μ 律压缩扩展技术更好。

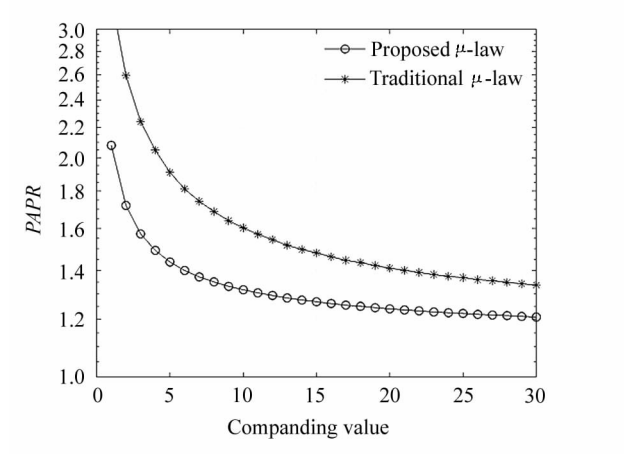


图 6 两种压扩技术的 $PAPR$ 抑制性能
Fig. 6 $PAPR$ suppression performance of two companding techniques

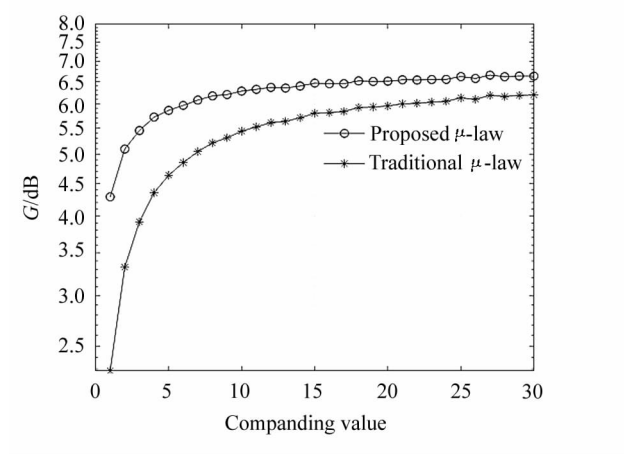


图 7 两种压扩技术的变换增益性能
Fig. 7 Transform gain performance of two companding techniques

4.3 $PAPR$ 抑制性能

为了验证本文提出的联合限幅与归一化 μ 律压扩算法在 DCO-OFDM VLC 系统中的优势,下面进行实验仿真分析原始系统、限幅系统、联合限幅与传统 μ 律压扩算法系统和本文提出的联合限幅与归一化 μ 律压扩算法的 $PAPR$ 抑制性能和 BER 性能。在整个仿真过程中,总的子载波数目为 256,IFFT 点数也设置为 256,总的 OFDM 符号数设置为 1 000,具体实验参数如表 1 所示。

图 8 仿真了原始系统、限幅系统、基于限幅与传

统 μ 律压扩联合算法系统和基于限幅与归一化 μ 律压扩联合算法系统在 4QAM 调制方式下的 $PAPR$ 性能,表 2 记录了实验数据。

表 1 实验参数
Tab. 1 Experiment parameter

Various parameters	Parameters size
The subcarrier number	256
IFFT points	256
Number of OFDM symbols	1 000
CR/dB	4
Companding value	4.2
SNR/dB	0—30
Modulation mode	4QAM/16QAM

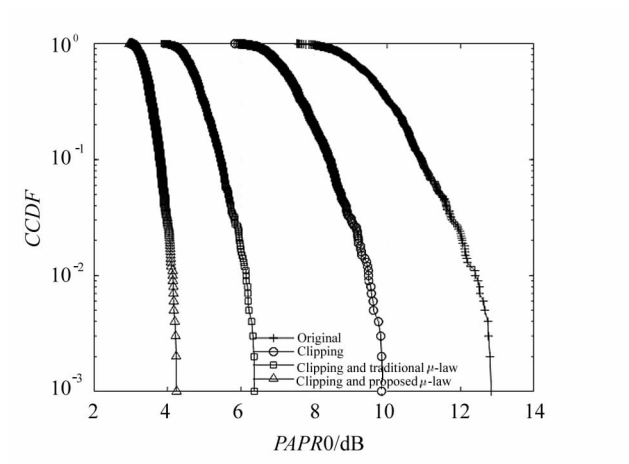


图 8 4QAM 调制下的 $PAPR$ 性能
Fig. 8 $PAPR$ performance of 4QAM modulation

表 2 4QAM 调制下的 $PAPR$ 值
Tab. 2 $PAPR$ value in 4QAM modulation

Reduction technique	$PAPR$ at CCDF	$PAPR$ /dB
Original	10^{-1}	10.95
	10^{-2}	12.06
	10^{-3}	12.83
Clipping	10^{-1}	8.373
	10^{-2}	9.304
	10^{-3}	9.906
Clipping and traditional μ -law	10^{-1}	5.428
	10^{-2}	6.049
	10^{-3}	6.436
Clipping and proposed μ -law	10^{-1}	3.791
	10^{-2}	4.091
	10^{-3}	4.265

通过图 8 可以发现,当原始系统信号的 $PAPR$ 大约为 7.017 dB 时开始下降,限幅系统信号的 $PAPR$ 大约为 5.717 dB 时开始下降,联合限幅与传统 μ

律压扩算法系统信号的 $PAPR$ 大约为 3.788 dB 时开始下降,联合限幅与归一化 μ 律压扩算法系统信号的 $PAPR$ 大约为 2.9 dB 时开始下降。通过表 2 的数据分析可得,当 $CCDF=10^{-3}$ 时,相比较于原始系统,所提联合算法进一步抑制 8.565 dB,相比较于限幅系统,所提联合算法进一步降低 5.641 dB,相比较于限幅与传统 μ 律压扩联合算法,所提联合算法进一步改善 2.171 dB;当 $CCDF=10^{-2}$ 时,相比较于原始系统,所提联合算法抑制了 7.969 dB,相比较于限幅系统,所提联合算法降低了 5.213 dB,相比较于限幅与传统 μ 律压扩联合算法,所提联合算法改善了 1.958 dB;当 $CCDF=10^{-1}$ 时,相比较于原始系统,所提联合算法抑制了 7.159 dB,相比较于限幅系统,所提联合算法降低了 4.582 dB,相比较于限幅与传统 μ 律压扩联合算法,所提联合算法改善了 1.637 dB。

图 9 仿真了原始系统、限幅系统、基于限幅与传统 μ 律压扩联合算法系统和基于限幅与归一化 μ 律压扩联合算法系统在 16QAM 调制方式下的 $PAPR$ 性能,表 3 是对图 9 的 $PAPR$ 数值记录。

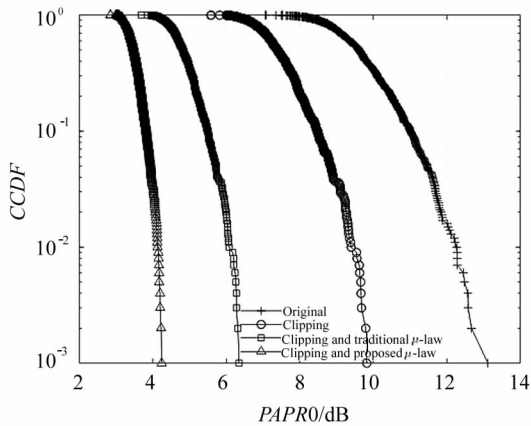


图 9 16QAM 调制下的 $PAPR$ 性能

Fig. 9 $PAPR$ performance of 16QAM modulation

通过图 9 可以发现,所提联合算法有着良好的 $PAPR$ 抑制性能。原始系统信号的 $PAPR$ 大约为 7.432 dB 时开始下降,限幅系统信号的 $PAPR$ 大约为 5.366 dB 时开始下降,联合限幅与传统的 μ 律压扩算法系统信号的 $PAPR$ 大约为 3.597 dB 时开始下降,联合限幅与归一化 μ 律压扩算法系统信号的 $PAPR$ 大约为 2.816 dB 时开始下降。通过表 3 的数据分析可得,当 $CCDF=10^{-3}$ 时,相比较于原始系统,所提联合算法进一步抑制 8.704 dB,相比较于限幅系统,所提联合算法进一步降低 5.774 dB,相比较

于限幅与传统 μ 律压扩联合算法,所提联合算法进一步改善 2.206 dB;当 $CCDF=10^{-2}$ 时,相比较于原始系统,所提联合算法抑制了 8.047 dB,相比较于限幅系统,所提联合算法降低了 5.31 dB,相比较于限幅与传统 μ 律压扩联合算法,所提联合算法改善了 2.014 dB;当 $CCDF=10^{-1}$ 时,相比较于原始系统,所提联合算法抑制了 7.12 dB,相比较于限幅系统,所提联合算法降低了 4.567 dB,相比较于限幅与传统 μ 律压扩联合算法,所提联合算法改善了 1.626 dB。

表 3 16QAM 调制下的 $PAPR$ 值

Tab. 3 $PAPR$ value in 16QAM modulation

Reduction technique	$PAPR$ at $CCDF$	$PAPR/dB$
Original	10^{-1}	10.9
	10^{-2}	12.16
	10^{-3}	13.05
Clipping	10^{-1}	8.347
	10^{-2}	9.423
	10^{-3}	10.12
Clipping and traditional μ -law	10^{-1}	5.406
	10^{-2}	6.127
	10^{-3}	6.552
Clipping and proposed μ -law	10^{-1}	3.78
	10^{-2}	4.113
	10^{-3}	4.346

通过对图 8 和图 9 的分析可以得出结论,相比较在原始限幅系统里使用传统的 μ 律压扩算法,使用本文提出的归一化 μ 律压扩算法有着更好的 $PAPR$ 抑制性能。

4.4 BER 性能

为了分析基于限幅与归一化 μ 律压扩联合 $PAPR$ 抑制算法对 DCO-OFDM 可见光系统的 BER 性能影响,图 10 仿真了原始系统、限幅系统、限幅与传统 μ 律压扩联合算法系统和限幅与归一化 μ 律压扩联合算法系统的 BER 性能。

通过图 10 和表 4 的数据分析可得,在 4QAM 调制系统中,当 $BER=10^{-1}$ 时,限幅和传统 μ 律压扩联合算法系统需要的最小 SNR 的值比限幅系统高 0.4 dB,限幅与归一化 μ 律压扩联合算法系统需要的最小 SNR 的值比限幅系统高 4.4 dB,比限幅和传统 μ 律压扩联合算法系统高 4 dB;当 $BER=10^{-3}$ 时,限幅和传统 μ 律压扩联合算法系统需要的最小 SNR 的值比限幅系统高 0.2 dB,限幅与归一化 μ 律压扩联合算法系统需要的最小 SNR 的值比限幅系统高 5.3 dB,比限幅和传统 μ 律压扩联合算法系统高

5.1 dB;当 $BER=10^{-5}$ 时,限幅和传统 μ 律压扩联合算法系统需要的最小 SNR 的值比限幅系统高 0.05 dB,限幅与归一化 μ 律压扩联合算法系统需要的最小 SNR 的值比限幅系统高 4.1 dB,比限幅和传统 μ 律压扩联合算法系统高 4.05 dB。

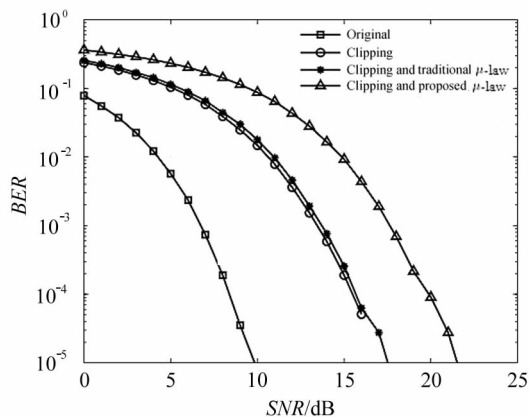


图 10 4QAM 调制下的 BER 性能

Fig. 10 BER performance of 4QAM modulation

表 4 记录了图 10 的具体数值。

表 4 4QAM 调制下的 BER

Tab. 4 BER in 4QAM modulation

Reduction technique	BER	SNR/dB
Original	10^{-1}	-1
	10^{-3}	6.8
	10^{-5}	9.6
Clipping	10^{-1}	5
	10^{-3}	13.3
	10^{-5}	17.1
Clipping and traditional μ -law	10^{-1}	5.4
	10^{-3}	13.5
	10^{-5}	17.15
Clipping and proposed μ -law	10^{-1}	9.4
	10^{-3}	18.6
	10^{-5}	21.2

图 10 的实验仿真结果表明,在相同信噪比的情况下,相比较于联合限幅与传统的 μ 律压扩算法的 BER 性能,联合限幅与归一化 μ 律压扩算法的 BER 性能略有不足之处,但是在实际应用中,由于传统的 μ 律压扩变换是保持峰值信号功率不变,通过提高小信号功率使信号的平均功率增大,这样会导致系统发射端耗费的功率过大,在实际应用中所需要的成本过高,发射端信号的不同步变换致使实际系统失真较为严重,因此,为了确保较好的 BER 性能的同

时,最大限度地抑制系统的 PAPR,在 VLC 系统中使用本文提出的联合算法更具有优势。

5 结 论

本文提出了一种联合限幅与归一化 μ 律压扩抑制 DCO-OFDM 系统 PAPR 的算法。在该联合算法中,归一化 μ 律压扩技术在系统发射端压缩大信号功率,扩展小信号功率,根据发射端的归一化 μ 律压扩变换,可以推导出压扩前后系统信号的平均功率不变。仿真结果表明,在采用 4QAM 调制方式的 DCO-OFDM 系统中,当 $CCDF=10^{-3}$ 时,相比较于原始系统、限幅系统、限幅与传统 μ 律压扩联合算法系统,基于所提联合算法系统分别改善了 8.565 dB、5.64 dB、2.171 dB;在采用 16QAM 调制方式的 DCO-OFDM 系统中,当 $CCDF=10^{-3}$ 时,相比较于原始系统、限幅系统、限幅与传统 μ 律压扩联合算法系统,基于所提联合算法系统分别改善了 8.704 dB、5.774 dB、2.206 dB。综上可知,所提联合算法在选取较优压扩值后,能够在确保较好的 BER 的情况下最大限度地抑制系统的 PAPR。因此,该算法适用于 LED 线性工作范围有限、放大器功率较小但误码率性能要求不高的 VLC 系统,而如何使得算法在抑制 PAPR 的同时也能进一步改善系统的 BER 性能是未来研究的方向。

参考文献:

- [1] CHI N, SHI M, NIU W Q, et al. LiFi: the development of visible light communication technology[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2019, 30(1): 1-9.
迟楠,石蒙,牛文清,等. LiFi: 可见光通信技术发展现状与展望[J]. 照明工程学报, 2019, 30(1): 1-9.
- [2] YUAN J G, ZHANG X R, YUAN C Z, et al. A construction method of QC-LDPC code with girth 8 in visible light communication[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 857-861.
袁建国,张希瑞,袁财政,等. 可见光通信中一种围长为 8 的 QC-LDPC 码构造方法[J]. 半导体光电, 2019, 40(6): 857-861.
- [3] WANG Y, XIE S, XIE Z. FISTA-based PAPR reduction method for tone reservation's OFDM system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7: 300-303.
- [4] ZHANG Y T, ZHAO L, ZHANG F. Performance optimization of visible light OFDM communication system based on wavelet transform[J]. Laser Technology, 2020, 44(2): 261-265.

- 张雨桐,赵黎,张峰. 基于小波变换的可见光 OFDM 通信系统性能优化[J]. 激光技术, 2020, 44(2): 261-265.
- [5] MIRIYALA G, MANI V V. A new PAPR reduction technique in DCO-OFDM for visible light communication system[J]. Optics Communications, 2020, 474: 126064.
- [6] AZARNIA G, SHARIFI A A. Clipping-based PAPR reduction of optical OFDM signals using compressive sensing; bayesian signal reconstruction approach[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 64: 102527.
- [7] ZHANG T, ZOU Y, SUN J, et al. Improved companding transform for PAPR reduction in ACO-OFDM-based VLC systems[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(6): 1180-1193.
- [8] IDRIS A, SAPARI N, IDRIS M S, et al. Reduction of PAPR using block coding method and APSK modulation techniques for F-OFDM in 5G system[C]//TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference, Jeju, Korea (South). New York: IEEE, 2018: 2456-2460.
- [9] SINGH R P, KUMAR A. PAPR reduction in OFDM using DCT precoded SLM technique[J]. International Journals Digital Communication and Analog Signals, 2018, 4(1): 33-39.
- [10] CHEN R L, BI M H, FU X S, et al. Chaos-based keys protection and PAPR reduction scheme for secure transmission in OFDM-PON system[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2018, 29(11): 1167-1172.
- 陈瑞兰, 毕美华, 付小松, 等. OFDM-PON 系统中基于混沌映射的密钥保护和 PAPR 降低的加密算法[J]. 光电子 · 激光, 2018, 29(11): 1167-1172.
- [11] 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.
- [12] SHARIFI A A, EMAMI H. PAPR reduction of asymmetrical-ly clipped optical OFDM signals; optimizing PTS technique using improved flower pollination algorithm[J]. Optics Communications, 2020, 474: 126057.
- [13] TANG F, XU Z Y, WANG J Y, et al. Pilot-assisted PAPR reduction technique for DCO-OFDM systems[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, 30(10): 1116-1122.
- 唐芳, 徐智勇, 汪井源, 等. DCO-OFDM 系统中导频辅助峰均比抑制技术[J]. 光电子 · 激光, 2019, 30(10): 1116-1122.
- [14] WANG Z, WANG P, NAN X, et al. PAPR reduction by combining clipping and piecewise linear companding for OFDM-based VLC systems[J]. Optical Engineering, 2021, 60(5): 066105.
- [15] TANG B, QIN K, MEI H. A hybrid approach to reduce the PAPR of OFDM signals using clipping and companding [J]. IEEE Access, 2020, 8: 18984-18994.
- [16] CUIWEI, ARMSTRONG, JEAN. Clipping noise mitigation in optical OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3): 548-551.
- [17] BAI J R, YANG S. In UOWC systems: a combined PAPR reduction method by PTS approach based on improved particle swarm optimization[J]. Optik, 2021, 232: 166581.
- [18] SHARAN N, GHORAI S K. PAPR reduction and non-linearity alleviation using hybrid of precoding and companding in a visible light communication (VLC) system[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(6): 304.

作者简介:

王中鹏 (1966—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事 5G/6G 移动通信物理层技术方面的研究.