

可见光通信 OFDM 系统 PAPR 抑制技术研究进展

宋小庆,王慕煜*,邢松,赵梓旭

(陆军装甲兵学院,北京 100072)

摘要:正交频分复用(OFDM)技术可以提高可见光通信系统的通信速率,抑制码间串扰,但是也会产生较高的峰值平均功率比(PAPR),导致非线性失真,为了解决该问题,研究学者们采用 PAPR 抑制技术来降低 OFDM 信号的高 PAPR。总结了近年来可见光通信系统中的 PAPR 抑制技术的研究进展,从原理上将它们分为 3 类:基于信号限幅的 PAPR 抑制策略、基于概率选择的 PAPR 抑制策略和基于信号预编码的 PAPR 抑制策略。对这 3 类 PAPR 抑制策略的性能进行仿真分析对比,总结出其优势和不足以及适用的场合,并对下一步工作进行展望。

关键词:可见光通信;正交频分复用;峰均比;发光二极管;误码率

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)12-0001-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.12.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress on the PAPR reduction technology for the OFDM systems in visible light communication

SONG Xiaoqing, WANG Muyu*, XING Song, ZHAO Zixu

(Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology can improve the communication rate of visible optical communication system and suppress intersymbol interference, but it also produces high peak-to-average power ratio (PAPR) and non-linear distortion. In order to solve this problem, researchers have used PAPR suppression technology to reduce the high PAPR of OFDM signal. This paper summarizes the research progress of PAPR suppression technology in visible light communication system in recent years, and divides them into three categories in principle: PAPR suppression strategy based on signal limiting, PAPR suppression strategy based on probability selection and PAPR suppression strategy based on signal precoding. The performance of these three kinds of PAPR suppression strategies is simulated, analyzed and compared, their advantages and disadvantages are summarized, and the applicable occasions are discussed, and the future work is prospected.

Key words: visible light communication; orthogonal frequency division multiplexing; peak to average power ratio; light emitting diode; bit error rate

0 引言

正交频分复用(OFDM)技术是一种多载波调制技术,具有较高的频谱利用率、较强的抗码间干扰能力,适用于存在多径效应的高速传输环境中。OFDM 技术已被采纳为多种无线通信系统的标准技术,并且在高

收稿日期:2019-05-08。

基金项目:国家某项目资助。

作者简介:宋小庆(1971-),女,博士,教授,主要从事车辆综合电子系统、车载网络技术和室内可见光通信技术方面的研究。作为主研人员参加国家重点科研课题 6 项,出版学术专著 1 部,发表学术论文 50 余篇。获科技进步二等奖 4 项,授权发明专利 4 项,新型实用专利 6 项。

*通信作者:王慕煜(E-mail: aafewmy@163.com)。



速可见光通信(VLC)系统中得到了广泛应用^[1-4]。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,导致峰值平均功率比(PAPR)较高,会带来频谱扩展干扰以及带内信号畸变。在 VLC 系统中,发光二极管(LED)是非线性器件,过高的 PAPR 会使得 OFDM 信号超过 LED 线性工作区,导致整个系统的传输过程中信号失真,降低系统的误码率。所以,人们通常会结合 LED 的非线性特性,采用 PAPR 抑制技术来降低 OFDM 信号的 PAPR,以此来提升 VLC 系统的通信性能。

近年来,有学者针对 VLC 系统中 OFDM 信号,研究出多种 PAPR 抑制技术,并取得了一定成果。例如,

直接限幅法^[5]是最简单的 PAPR 抑制方法,通过调整限幅比,可以很大程度降低信号的 PAPR,但同时也会使信号失真,造成系统的误码率上升。迭代限幅法^[6]是在直接限幅法基础上的改进方法,虽然可以降低信号的失真程度,但需要进行多次迭代运算,计算复杂度较高。指数压扩变换法^[7,8]是一种基于压缩扩展变换的方法,该方法虽然降低了系统的计算复杂度,但由于压扩变换也会带来非线性失真,导致系统的误码率上升。选择映射法(SLM)^[9]和部分传输序列法(PTS)^[10]都是基于概率类的方法,这些方法不会产生非线性失真,但是会给系统带来边带信息,并增大计算复杂度。载波注入法(TI)^[11]是在星座映射过程中引入额外的自由度来降低 PAPR,该方法也可以降低系统的误码率,但同样有较大的计算复杂度。

本文对近年来应用到 VLC 系统中的 PAPR 抑制技术进行分析研究,从抑制原理上将它们分成 3 大类:基于信号限幅的 PAPR 抑制策略、基于概率选择的 PAPR 抑制策略和基于信号预编码的 PAPR 抑制策略。并从计算复杂度、PAPR 抑制效果和误码率的角度对这 3 类抑制策略进行仿真对比分析。

1 可见光通信 OFDM 系统的 PAPR 概率分布特性

1.1 LED 非线性特性

LED 输入输出特性曲线如图 1 所示。当加载到 LED 上的信号过小时,LED 未导通,处于死区,无法输出信号;当输入信号超过一定值时,LED 进入饱和区,会造成输出的信号严重失真,从而降低了整个系统的通信性能。为了保证加载到 LED 上的信号始终处于线性工作区,需要对 OFDM 信号进行处理,然后再加载到 LED 上,才能保证系统通信的准确性。

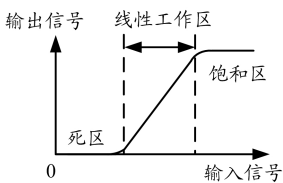


图 1 LED 输入输出特性曲线

1.2 OFDM 信号的 PAPR 概率分布

在 VLC 系统中,加载到 LED 上的 OFDM 信号如图 2 所示。可以看出,该 OFDM 信号在某些时刻存在较大的瞬时功率峰值,这是因为当一部分子载波信号的相位相同或者相近时,叠加后会产生较大的瞬时功率峰值,从而带来较高的 PAPR。PAPR 主要是用来描述信号的变化特征,定义为信号峰值功率和信号平均功率之间的比值^[12]。

在 VLC 系统中,OFDM 时域信号可以表示为^[13]:

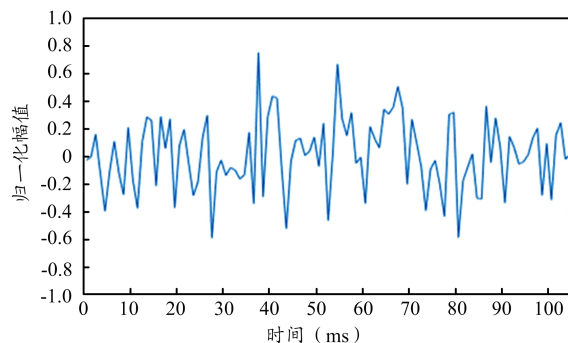


图 2 OFDM 信号示意图

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^N a_{ki} s_k(t - iT_s) \quad (1)$$

其中, a_{ki} 是指第 k 路子载波上的第 i 个信息符号; $s_k(t)$ 是指第 k 路调制子载波波形; N 是指子载波的数目; T_s 是指符号周期。

那么,加载到 LED 上 OFDM 信号的 PAPR 值可以表示为:

$$PAPR = 10 \lg \left(\frac{\max(|s(t)|^2)}{E(|s(t)|^2)} \right), t \in [0, T_s] \quad (2)$$

为了能够更加直观地分析判断 OFDM 信号的 PAPR 概率分布特性,研究人员引入了互补累计分布函数 (CCDF)^[14]。在 VLC 系统中,PAPR 的 CCDF 值为 OFDM 信号处于 LED 非线性工作区的概率 P ,因此在奈奎斯特采样频率下,一个 OFDM 信号峰均比的 CCDF 值可以表示为^[15]:

$$CCDF = P(PAPR > \lambda) = 1 - (1 - e^{-\lambda})^N \quad (3)$$

其中, λ 是 PAPR 的阈值。

文献[16]指出,由于 OFDM 时域信号是连续的,奈奎斯特采样频率并不能够完全正确地反映信号的 PAPR 特性,所以需要增大系统的采样频率,进行过采样操作。此时,OFDM 信号 PAPR 的 CCDF 值可以表示为:

$$CCDF = P(PAPR > \lambda) = 1 - (1 - e^{-\lambda})^{\alpha N} \quad (4)$$

其中, α 的值与过采样系数和对应的 N 值有关。

2 典型 PAPR 抑制策略

本文根据 PAPR 抑制策略在系统中的位置以及抑制的原理,将这些策略分为 3 类:基于信号限幅的 PAPR 抑制策略、基于概率选择的 PAPR 抑制策略和基于信号预编码的 PAPR 抑制策略。图 3 为可见光通信 OFDM 系统的结构框图。

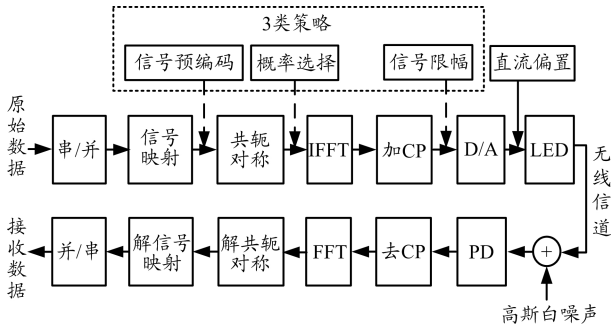


图3 可见光通信 OFDM 系统结构框图

2.1 基于信号限幅的 PAPR 抑制策略

基于信号限幅的 PAPR 抑制策略是在系统加循环前缀(CP)之后和数模(D/A)转换之前进行。该策略的主要思想是在 VLC 系统的发射端,OFDM 信号加载到 LED 之前,对信号的幅度通过阈值进行限制,实现对 PAPR 的抑制,进一步确保 LED 工作在线性工作范围内。

本文以直接限幅法为例,对基于信号限幅的 PAPR 抑制策略原理进行分析。图 4 为直接限幅法的结构框图。

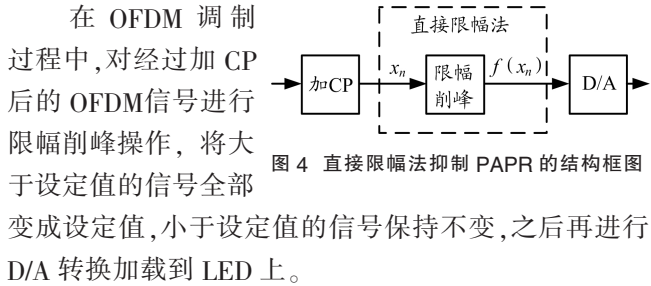


图4 直接限幅法抑制 PAPR 的结构框图

限幅削峰的过程可以表示为^[17]:

$$f(x_n) = \begin{cases} x_n, & |x_n| < A \\ \text{sgn}(x_n)A, & |x_n| \geq A \end{cases} \quad (5)$$

其中, x_n 表示原始的 OFDM 信号, $f(x_n)$ 表示限幅之后的 OFDM 信号, A 表示限幅阈值, $\text{sgn}(x_n)$ 表示 x_n 的相位信息。

定义限幅比(CR)为限幅阈值和信号功率均方根值的比:

$$\eta_{\text{CR}} = \frac{A}{\sigma} \quad (6)$$

其中, η_{CR} 表示限幅比, σ 表示信号功率的均方值。

直接限幅法虽然具有较好的 PAPR 抑制效果,且计算量小、实现简单,但是限幅削峰的过程会带来信息的损失,最终导致系统的误码率性能的下降。

除了直接限幅法以外,还有其它的基于信号限幅的 PAPR 抑制策略。例如,文献[18]针对采用非对称限幅 OFDM (ACO-OFDM)的 VLC 系统,结合该系统在

频域上的非对称结构,提出了一种可恢复的限幅策略。文献[19]提出了一种基于信号限幅的改进策略,在发送端进行信号的指数压缩并在接收端进行信号扩展恢复。

2.2 基于概率选择的 PAPR 抑制策略

基于概率选择的 PAPR 抑制策略是在系统完成共轭对称之后和逆傅里叶变换(IFFT)之前进行,该策略的主要思想是在 VLC 系统的发射端对 OFDM 信号进行分组,然后将信号加载到不同的分组中,产生带有相同信息的多个副本,然后选取出 PAPR 最小的副本作为最终的传输副本,以此减小高 PAPR 信号出现的概率。

本文以部分传输序列法(PTS)为例,对基于概率选择的 PAPR 抑制策略原理进行分析。在 VLC 系统的发送端,将共轭对称后数据块长度(即子载波数目 N)的原始信号分割成多个数据块,然后对各个数据块分别进行 IFFT,并对每个变换后数据的相位因子进行加权,最后把叠加的信号加载到 LED 上。在这个过程中,可以设置不同的相位因子,使叠加的 OFDM 信号具有较低的 PAPR。

PTS 法抑制 PAPR 的结构框图如图 5 所示。

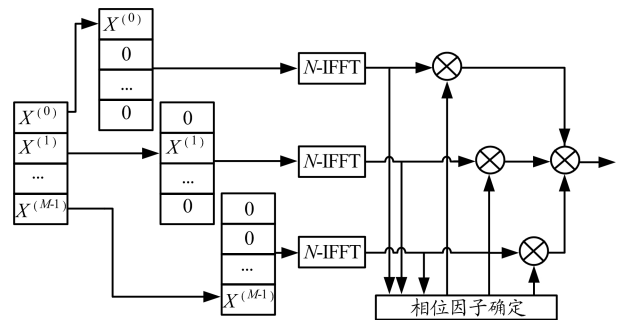


图5 PTS 法抑制 PAPR 的结构框图

将 VLC 系统发送端的 OFDM 原始信号记为: $X = [X^{(0)}, X^{(1)}, \dots, X^{(M-1)}]$, 将原始信号分割成为 M 组序列, 各组序列分别记为: $X^{(m)}$, 其中 $m=0, 1, \dots, M-1$ 。然后, 将每组序列的其它部分置零, 补成长度为 N 的序列。接着, 对 M 组序列都进行 N 点 IFFT, 将 IFFT 后的数据乘上不同的相位因子, 最后, 叠加之后输出的 OFDM 信号可以表示为^[20]:

$$x = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\varphi_m} F_N X^{(m)} = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\varphi_m} x^{(m)} \quad (7)$$

其中, F_N 是 N 点 IFFT 矩阵, φ_m 是对 $X^{(m)}$ 的相位加权因子, $x^{(m)}$ 是序列 $X^{(m)}$ 的 N 点 IFFT。

在进行 PTS 法对信号进行 PAPR 的抑制过程中,

最重要是对相位因子 $\{\varphi_m\}$ 的优化选择,选择合适的相位因子,使最终输出信号的 PAPR 达到最小值,即:

$$\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{M-1}\} = \underset{\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{M-1}\}}{\operatorname{argmin}} \left(\max_{0 \leq n \leq N-1} \left| \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\varphi_m} x^{(m)} \right|^2 \right) \quad (8)$$

虽然 PTS 法没有引入信号失真,接收端可以完整地恢复原始信号,从而降低 VLC 系统的误码率。但是,该过程需要进行 M 次 IFFT,而且需要对相位因子进行优化选择,所以,计算复杂度增加明显,额外增加了系统的开销。

除了 PTS 法以外,还有其它的基于概率选择的 PAPR 抑制方法策略。例如,文献[21]提出将选择映射(SLM)法应用到 VLC 系统之中,该方法在 PAPR 抑制效果和系统误码率上具有相似的性能,但是计算复杂度却降低了。文献[22]提出了一种将 SLM 法和离散傅立叶变换扩频法(DFT-S)相结合的新方法,并通过仿真实验证明了新方法能获得更好的 PAPR 抑制效果。文献[23]在 PTS 法的基础上提出了一种改进方法,并进行了仿真实验,结果表明该方法具有更好的 PAPR 抑制效果和误码率性能。

2.3 基于信号预编码的 PAPR 抑制策略

基于信号预编码的 PAPR 抑制策略是在系统完成共轭对称变换之前进行,该策略的主要思想是在 VLC 系统的发射端对未进行变换的原始信号进行预编码处理,通过处理后的信号再进行 OFDM 调制时,能够生成 PAPR 值较小的 OFDM 信号。该策略在理论上只要引入适当的冗余,就能够降低信号的 PAPR。

本文以离散傅里叶变换(DFT)预编码法^[24]为例,对基于信号预编码的 PAPR 抑制策略原理进行分析。图 6 为 DFT 预编码法抑制 PAPR 的结构框图。

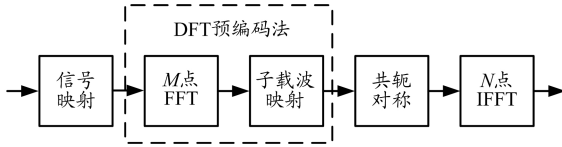


图 6 DFT 预编码法抑制 PAPR 的结构框图

在 VLC 系统的发送端,高速串行的数据流在经过串/并转换后进行正交振幅调制(QAM)映射,映射后生成的信号可以表示为: $\{x^{(m)}, m=0, 1, \dots, M-1\}$,将这组信号先进行 M 点快速傅里叶变换(FFT),然后对变换后的信号进行 M/N 点的子载波映射处理,最后再将子载波映射生成的信号进行长度为 N 的 IFFT 和加 CP 等操作,最终加载到 LED 上。

DFT 预编码法相比于 PTS 法减少了 IFFT 变换的次数,因此降低了系统的计算复杂度,但是该方法的 PAPR 抑制效果有限,对系统的误码率性能提升不够明显。

除了 DFT 预编码法以外,还有其它的基于信号预编码的 PAPR 抑制方法策略。例如,文献[25]研究了多种基于信号预编码的 PAPR 抑制策略,其中编码方式包括:DFT 预编码方式、离散余弦变换(DCT)预编码方式和 Hadamard 预编码方式等,这些基于预编码的 PAPR 抑制策略都具有很好的 PAPR 抑制效果。

3 PAPR 抑制策略对可见光通信系统性能影响的对比分析

为了能够进一步分析不同 PAPR 抑制策略对可见光通信系统通信性能的影响以及适用的场合,本文从计算复杂度、PAPR 抑制效果以及误码率 3 个方面中的直接限幅法、PTS 法和 DFT 预编码法进行仿真对比分析。

3.1 计算复杂度分析

在可见光通信系统中,系统的计算复杂度是根据算法所需的实数加法与乘法的次数来衡量^[26]。由于直接限幅法仅仅是在发射端对信号进行了限幅削峰处理,并没有增加 N 点 IFFT 的次数,所以直接限幅法的乘法次数和加法次数分别为:

$$n_{\text{乘(直接限幅)}} = \frac{N}{2} \log_2 N \quad (9)$$

$$n_{\text{加(直接限幅)}} = N \log_2 N \quad (10)$$

在 PTS 法中,当 OFDM 信号的子载波个数为 N ,分组个数为 V ,相位因子的个数为 P 时,需要进行 IFFT 变换的次数为:

$$n = VP^{V-1} \quad (11)$$

因此,PTS 法的乘法次数和加法次数分别为:

$$n_{\text{乘(PTS)}} = V \times P^{V-1} \left(\frac{N}{2} \log_2 N \right) \quad (12)$$

$$n_{\text{加(PTS)}} = V \times P^{V-1} (N \log_2 N) \quad (13)$$

在 DFT 预编码法中,并没有增加系统的进行 N 点 IFFT 的次数,但是增加了 M 点 FFT 和子载波映射部分。所以,当 OFDM 信号的子载波个数为 N ,对频域分割块数为 k 时,系统需要进行 k 次点数为 N/k 的 FFT 运算,因此,DFT 预编码法的乘法次数和加法次数分别为:

$$n_{\text{乘(DFT 预编码)}} = \frac{N}{2} \log_2 \frac{N}{k} + \frac{N}{2} \log_2 N \quad (14)$$

$$n_{\text{加(DFT 预编码)}} = N \log_2 \frac{N}{k} + N \log_2 N \quad (15)$$

从上述分析可以看出,在相同的外界环境下,直接限幅法的计算复杂度最小,便于实现;PTS 法的计算复杂度最大,系统所需的加法次数和乘法次数最多;DFT 预编码法的计算复杂度处于两者之间。

3.2 PAPR 抑制效果分析

为了进一步对比不同 PAPR 抑制策略对 OFDM 信号的 PAPR 抑制效果,本文利用 Matlab 分别对 3 种 PAPR 抑制方法下的 OFDM 信号的 PAPR 分布进行仿真,设置的具体仿真参数如表 1 所示。仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,当采用直接限幅法且 CCDF 值为 10^{-3} 时,所需的最低 PAPR 值为 5.2 dB,比原始信号减小了约 6.1 dB;当采用 PTS 法、CCDF 值为 10^{-3} 时,所需的最低 PAPR 值为 6.9 dB,比原始信号减小了约 3.4 dB;而采用 DFT 预编码时,在 CCDF 值为 10^{-3} 时,所需的最低 PAPR 值为 7.8 dB,比原始信号减小了约 3.5 dB。所以,在相同的外界环境下,直接限幅法具有最好的 PAPR 抑制效果;PTS 法的 PAPR 抑制效果处于两者之间;DFT 预编码的 PAPR 抑制效果最差。

表 1 可见光 OFDM 系统 PAPR 抑制仿真参数

参数	值
OFDM 符号长度	1000
QAM 调制阶数	16
IFFT 点数	128
CP 长度	8
限幅比	2
PTS 分组块数	4
PTS 相位因子数	2
DFT 分组块数	4

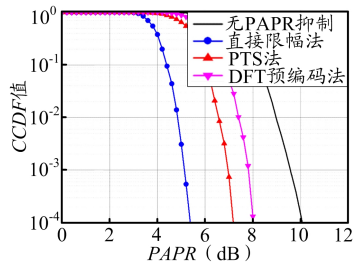


图 7 3 种 PAPR 抑制方法的抑制效果仿真结果

3.3 误码率分析

本文在之前仿真的基础上加入 LED 非线性模型和可见光信道模型进一步仿真,采用 OSRAM 公司的 LUW W5AM 型号 LED 以及注入高斯白噪声(WGN),得到了不同的 PAPR 抑制策略下 VLC 系统误码率与信噪比之间的关系曲线,如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,原始信号在可见光信道中,误码率为 10^{-3} 时所需的最低信噪比约为 22.5 dB,采用了直接限幅法后使得系统所需的最低信噪比上升了约 7.5 dB,达到了 30.0 dB;而采用 PTS 法所需的最低

信噪比为 15.2 dB,下降了约 7.3 dB;采用 DFT 预编码法则使得所需最低信噪比为 17.4 dB,下降了约 5.1 dB。所以,采用 PTS 法后,系统的误码率降为最低,DFT 预编码也可以降低系统的误码率,但采用了直接限幅法以后,系统的误码率反而会增加。

3.4 总结分析

结合前文数据的对比分析,本文总结出不同的 PAPR 抑制策略对可见光通信 OFDM 系统的性能影响如表 2 所示。

表 2 不同 PAPR 抑制策略性能对比表

PAPR 抑制策略	典型代表方法	计算复杂度		抑制效果	误码率
		乘法次数	加法次数		
信号限幅	直接限幅法	$\frac{N}{2} \log_2 N$	$N \log_2 N$	好	高
概率选择	PTS 法	$V \times PV^{-1}(\frac{N}{2} \log_2 N)$	$V \times PV^{-1}(N \log_2 N)$	一般	低
信号预编码	DFT 预编码法	$\frac{N}{2} \log_2 \frac{N}{k} + \frac{N}{2} \log_2 N$	$N \log_2 \frac{N}{k} + N \log_2 N$	较好	较低

从表 2 可以看出,基于信号限幅的 PAPR 抑制策略计算复杂度最简单,且 PAPR 抑制效果明显,是目前应用最广泛的技术之一。但是,该策略会使得系统的误码率性能明显下降,适用于对误码率要求不高的简易通信系统。基于概率选择的 PAPR 抑制策略具有相对较好的 PAPR 抑制效果和误码率性能,在选择映射分块时所分的块数越少其计算复杂度越低,反之越高;但是随着所分的块数越多,其 PAPR 抑制效果和误码率性能也会随之提升。基于信号预编码的 PAPR 抑制策略综合性能最好,适用于对系统精度较高的高速可见光通信系统中,但是需要在 IFFT 之前对其进行编码,增加了整个系统设计的复杂度。

综上所述,在实际应用中可以根据不同的应用需求来选择相应的 PAPR 抑制策略,优化系统的通信性能。

4 结束语

随着 LED 照明技术和 OFDM 技术的飞速发展,在 VLC 系统中 PAPR 抑制技术势必成为一个重要研究方向。本文对近年来 VLC OFDM 系统的 PAPR 抑制技术进行了梳理分类,从抑制原理和系统中的位置将这些技术分为 3 类:基于信号限幅的 PAPR 抑制策略、基于概率选择的 PAPR 抑制策略和基于信号预编码的 PAPR 抑制策略。分别以直接限幅法、PTS 法和 DFT 预编码法为例,从计算复杂度、PAPR 抑制效果和误码率的角度进行仿真对比分析,发现基于信号限幅的 PAPR 抑制策略适用于对通信误码率要求不高的简易系统之中;基于概率选择的 PAPR 抑制策略适用于通信速率高、误码率低的复杂系统之中;基于信号预编码的 PAPR 抑制策略适用于对系统复杂度要求较低且具有一定误码率要求的系统之中。

此外,将 2 种或者多种不同类型的 PAPR 抑制策略进行联合,研究出一种计算复杂度较低、PAPR 抑制效果明显并且能够降低系统误码率的 PAPR 抑制策略,将是我们下一步研究的重点内容。

参考文献:

- [1] SHIEH W, DJORDJEVIC B. OFDM for Optical Communications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [2] CHENHUI X, ZEXIN C, SONGNIAN F, et al. Achievable information rate enhancement of visible light communication using probabilistically shaped OFDM modulation[J]. Optics Express, 2018, 26(1): 367–369.
- [3] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. A study of LED nonlinearity effects on optical wireless transmission using OFDM [C]// Wireless and Optical Communications Networks, October 19–21, 2009, Cairo, Egypt. Finland: IEEE, 2009: 1–5.
- [4] MATHIAS L C, MELO L F D, ABRÃO T. 3-D Localization with Multiple LEDs Lamps in OFDM-VLC system [J]. IEEE Access, 2018(99): 1–1.
- [5] WANG Y, LUO Z. Optimized iterative clipping and filtering for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(1): 33–37.
- [6] YU Z, BAXLEY R J, ZHOU G T. Iterative clipping for PAPR reduction in visible light OFDM communications [C]//Military Communications Conference (MILCOM), October 26–28, 2014, Tampa Florida, USA. Washington: IEEE, 2014: 1681–1686.
- [7] WANG X, TJHUNG T T, NG C S. Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1999, 45(3): 303–307.
- [8] WANG X, TJHUNG T T, NG C S. Reply to the comments on: reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1999, 45(4): 420–422.
- [9] YAO Z, CHONG W, HONG Y, et al. Improved SLM peak-to-average ratio suppression method in visible light communication [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(4): 916–920.
- [10] YANG L, SOO K K, LI S Q, et al. PAPR reduction using low complexity PTS to construct of OFDM signals without side information[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2018, 57(2): 284–290.
- [11] CHEN J C, WEN C K. PAPR reduction of OFDM signals using cross-entropy-based tone injection schemes [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(8): 727–730.
- [12] SINGH V K, DALAL U D. Integration of frequency modulated constant envelope technique with ADO-OFDM to impede PAPR in VLC[J]. Optics Communications, 2018, 418: 80–87.
- [13] AZIM A W, GUENNEC Y L, MAURY G. Decision-directed iterative methods for PAPR reduction in optical wireless OFDM systems [J]. Optics Communications, 2018, 389: 318–330.
- [14] WANG J, XU Y, LING X, et al. PAPR analysis for OFDM visible light communication[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27457–27474.
- [15] 付舒. OFDM 系统中降低峰均功率比技术的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [16] LING W, ZHANG H, YU B. Optimal bit-and-power allocation algorithm for VLC-OFDM system [J]. Electronics Letters, 2016, 52(12): 1036–1037.
- [17] 魏斌. 可见光通信 OFDM 调制峰均比降低技术的研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [18] XU W, WU M, ZHANG H, et al. ACO-OFDM-specified recoverable upper clipping with efficient detection for optical wireless communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 1–17.
- [19] BANDARA K, NIROOPAN P, CHUNG Y H. PAPR reduced OFDM visible light communication using exponential nonlinear companding[C]// IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), October 21–22, 2013, Tel Aviv, Israel. Tel Aviv: IEEE, 2013: 1–5.
- [20] LIM D W, HEO S J, NO J S, et al. A new PTS OFDM scheme with low complexity for PAPR reduction [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2005, 51(2): 93–96.
- [21] YAN C, WANG J, LU H, et al. Selective mapping and restorable clipping joint scheme for light-emitting diode nonlinearity alleviation in visible light communication system [J]. Optical Engineering, 2016, 55(5): 106–107.
- [22] KIM J, DONG G A, RYU H G, et al. Analysis and design of SLM based DFT spreading OFDM system for active anti-jamming system[C]// Radio & Wireless Symposium, January 15–18, 2011, Santa Clara, California. Washington: IEEE, 2011: 6–12.
- [23] DING S, YANG Z, LI S, et al. A novel PAPR reduction method based on ScaledPTS and clipping for VLC-OFDM systems [C]// 2016 16th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). November 26–28, 2016, Qingdao, China. Washington: IEEE, 2016: 64–65.
- [24] WANG Z, QIU W. Secure Image Transmission over DFT-precoded OFDM-VLC systems based on Chebyshev Chaos scrambling [J]. Optics Communications, 2017, 397: 84–90.
- [25] RANJHA B, KAVEHRAD M. Precoding techniques for PAPR reduction in asymmetrically clipped OFDM based optical wireless system [C]// International Society for Optics and Photonics, February 2–6, 2013: San Francisco, USA. California: Proceedings of SPIE, 2013: 8645–8650.