

激光与光电子学进展

基于 GA-PTS 的无厄米特对称光 OFDM 系统峰均比抑制算法的研究

秦岭, 于利强, 王凤英, 胡晓莉, 杜永兴*

内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古 包头 014010

摘要 光正交频分复用(O-OFDM)技术被广泛应用于可见光通信系统(VLC)中以提高数据传输速率,但是 O-OFDM 系统存在峰值平均功率比(PAPR)高的问题,限制了其系统性能。本文首先针对传统的非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)系统频谱效率低下以及计算复杂度高的问题,使用无厄米特对称的单极性光正交频分复用(UO-OFDM)系统。其次在 UO-OFDM 系统上使用传统的部分传输序列(PTS)技术来降低其 PAPR,同时针对传统的 PTS 技术计算复杂度高以及搜索最佳相位旋转因子效率低的问题,提出使用遗传算法(GA)来优化 PTS 技术。仿真结果表明:GA-PTS 相比于传统的 PTS 技术,在 PAPR 抑制性能差别不大的情况下极大地减少了搜索最佳相位旋转因子所需的时间;同时与基于 GA-PTS 算法的 ACO-OFDM 系统所用的时间相比,基于 GA-PTS 算法的 UO-OFDM 系统所用的时间有所减少,且随着最大遗传代数的增加,减少的时间更加明显。

关键词 光通信; 可见光通信; 正交频分复用; 峰值平均功率比; 部分传输序列; 遗传算法

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220629

Peak-to-Average Ratio Suppression Algorithm for Non-Hermitian Symmetric Optical OFDM System Based on GA-PTS

Qin Ling, Yu Liqiang, Wang Fengying, Hu Xiaoli, Du Yongxing*

*School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology,**Baotou 014010, Inner Mongolia, China*

Abstract Optical orthogonal frequency division multiplexing (O-OFDM) technology is widely used in visible light communication (VLC) to improve the data transmission rate. However, O-OFDM systems have high peak-to-average power ratios (PAPRs), which limit their system performance. First, this study uses unipolar optical orthogonal frequency division multiplexing (UO-OFDM) without Hermitian symmetry to solve the problems of low spectral efficiency and high computational complexity of the conventional asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM) system. Second, the conventional partial transmission sequence (PTS) technique is applied to the UO-OFDM system to decrease its PAPR, and a genetic algorithm (GA) is used to optimize the PTS technique for solving high computational complexity and low efficiency in searching for the optimal phase rotation factor of the conventional PTS technique. The simulation results show that GA-PTS significantly reduces the time required to search for the optimal phase rotation factor compared to the conventional PTS technique, with a slight difference in the PAPR suppression performance. Compared to the time used by the ACO-OFDM system based on the GA-PTS algorithm, the time used by the UO-OFDM system based on the GA-PTS algorithm is reduced. With an increase in the maximum generation, the reduced time becomes more significant.

Key words optical communications; visible light communications; orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; partial transmission sequence; genetic algorithm

1 引言

近年来,智能手机等移动设备以及各种物联网设

备的大规模使用,造成了无线数据的疯狂增长,传统的射频通信频谱资源逐渐趋于饱和,急需开发新的频谱资源来缓解这种情况^[1]。可见光通信(VLC)使用了可

收稿日期: 2022-01-03; 修回日期: 2022-02-03; 录用日期: 2022-02-21; 网络首发日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(62161041)、内蒙古关键技术攻关项目(2021GG0104)、内蒙古自然科学基金(2019LH06005)

通信作者: *dyxql@imust.edu.cn

见光频率范围内的巨大带宽,它利用照明LED来传输数据,具有设备成本低廉、低功耗、不受无线电频谱管制、无电磁干扰和保密性强等优点^[2-6]。为了提高可见光通信系统的数据传输速率,同时抑制因多径效应引起的码间干扰问题和提高系统的频谱利用率,正交频分复用(OFDM)技术被广泛应用在VLC系统中^[7]。大多数VLC系统是基于强度调制和直接检测(IM/DD)的系统,必须确保加载到LED上的信号是非负的实数信号。传统的方法是在快速傅里叶逆变换(IFFT)之前对信号进行厄米特对称变换操作以输出实数信号^[8]。目前被广泛使用的光OFDM方案为直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)和非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)。其中DCO-OFDM方案是在限幅操作之前对信号添加直接偏置,而ACO-OFDM方案是只使用奇数子载波传输有效数据以保证输出的信号为非负的实数信号^[9]。

OFDM作为一种多载波调制信号,在进行IFFT操作之后,会出现较高的峰值平均功率比(PAPR),严重降低了系统性能^[10-13]。因此必须采取措施来降低可见光OFDM系统的PAPR。关于降低可见光OFDM系统的PAPR一直是学者们研究的重点,通过总结现有的文献,可以把降低PAPR的技术分为信号预畸变技术、编码类技术以及概率类技术三类^[14-16]。其中概率类技术是一种无失真的PAPR抑制技术,它不会降低系统的误码性能,该类技术中的部分传输序列(PTS)技术可以有效地降低PAPR,该方法将输入的数据信号分割为多个互不相交的子块,每个子块乘以相对应的相位旋转因子,之后进行IFFT操作以及系数最优化,最终将所有的子块拼接在一起,得到PAPR最低的时域信号。PTS方法的主要目标是搜索最佳的相位旋转因子使得PAPR最低,在搜索过程中,传统的PTS技术需要遍历所有的相位旋转因子,这种搜索方法是低效率的,同时也需要很高的计算复杂度。针对该问题,研究人员提出了许多优化方法来搜索最佳的相位旋转因子。文献^[17]针对OFDM无源光网络算法中数据安全性低和PAPR高的问题,提出了一种基于三维Arnold变换和混沌Frank序列的加密算法,结果表明,该方案可使系统的PAPR降低2.1 dB。文献^[18]提出了SFLAHC-PTS技术,它利用混合蛙跳算法和爬山算法对传统PTS技术进行了优化,降低了传统PTS技术的计算复杂度,结果表明,SFLAHC-PTS技术降低了传统PTS技术的计算复杂度,同时显著提高了SFLA-PTS技术降低峰均比的能力。文献^[19]提出了一种基于遗传算法(GA)和峰值优化算法的(GAPOA)的部分传输序列技术,结果表明,该技术在具有更低计算复杂度和误码率(BER)的同时保持了良好的PAPR性能。此外,为了解决传统的PTS技术寻找最优相位旋转因子需要遍历所有备选旋转因子的问题,文献^[20]提出了一种新的基于多种群文化

算法和知识迁移的PTS方法来搜索最优的相位旋转因子,仿真结果表明,该技术比传统的PTS技术有更好的PAPR降低和误码率性能。这些技术虽然降低了光OFDM系统的PAPR,但是只在其结论中指出该方法降低了PTS技术的计算复杂度,尚未从算法运行所需时间的角度来更加直观地显示计算复杂度降低的程度,并且没有针对遗传算法的不同遗传代数的PAPR抑制性能和计算复杂度作分析与对比,这些都需要进一步的研究与仿真来提供数据支撑。

针对以上问题,本文使用遗传算法来解决PTS技术搜索最佳相位旋转因子的低效率和高复杂度问题,在同一计算机仿真环境下,仿真对比了传统的PTS技术和不同遗传代数下GA-PTS的PAPR抑制性能和算法运行所需要的时间。并且,为了进一步降低系统计算复杂度,本文研究了文献^[21]中提出的无需厄米特对称的光OFDM系统,为了与传统的ACO-OFDM系统进行区分,我们把该系统称之为单极性光OFDM(UO-OFDM)系统。同时本文将基于GA-PTS的UO-OFDM系统所用的时间与基于GA-PTS的ACO-OFDM系统所用的时间进行了分析和对比。

2 基本原理

2.1 无厄米特对称的光OFDM系统及其PAPR

传统的ACO-OFDM系统在实施过程中,为了获得正的实数信号,在QAM调制之后需要进行厄米特对称以及偶数子载波置零操作,这使得该系统只有1/4的子载波传输有效信息,造成频谱效率低下。针对该问题,本文研究了文献^[21]中提出的一种新的单极性光OFDM(UO-OFDM)系统,该系统的核心操作包括复数到实数变换以及双极到单极变换两部分。传输包含相同数目有效信息的信号,该系统所需的IFFT操作是ACO-OFDM系统的1/4,并且全部的子载波都用来传输有效信息,频谱利用率是ACO-OFDM系统的4倍。该系统的原理框图如图1所示。

该系统与ACO-OFDM系统的主要区别在于发送端的复数到实数变换和双极到单极变换以及在接收端的单极到双极和实数到复数变换^[21]。该部分的原理如图2所示。

假设发送端经过IFFT变换之后的复数双极性信号为 x_n ,首先将信号 x_n 的实部和虚部分别取出,表示为

$$y_n^+ = \text{Re}(x_n), \quad (1)$$

$$y_n^- = \text{Im}(x_n). \quad (2)$$

将 y_n^+ 和 y_n^- 进行复用,得到的实数双极性信号为

$$y_n = y_n^+ + y_n^-. \quad (3)$$

需要特殊说明的是,式(3)中的加号是指将两部分矩阵拼接在一起。因此,单极性的实数信号 z_n 可以通过如下表达式获得,

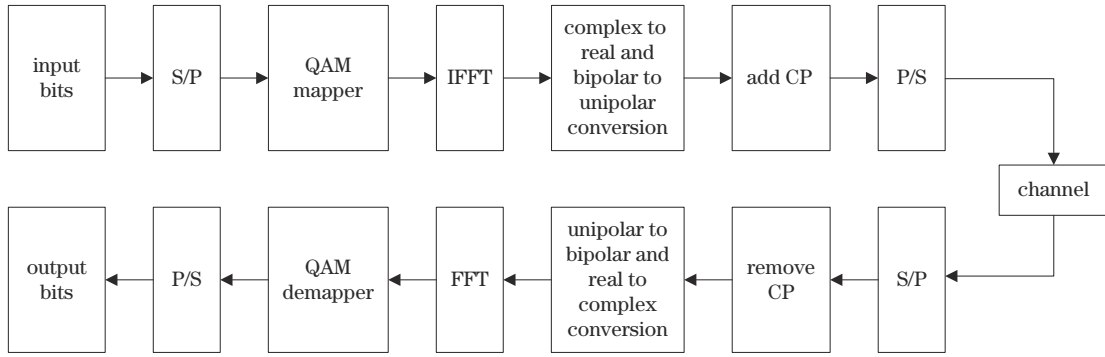


图 1 UO-OFDM 系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of UO-OFDM system

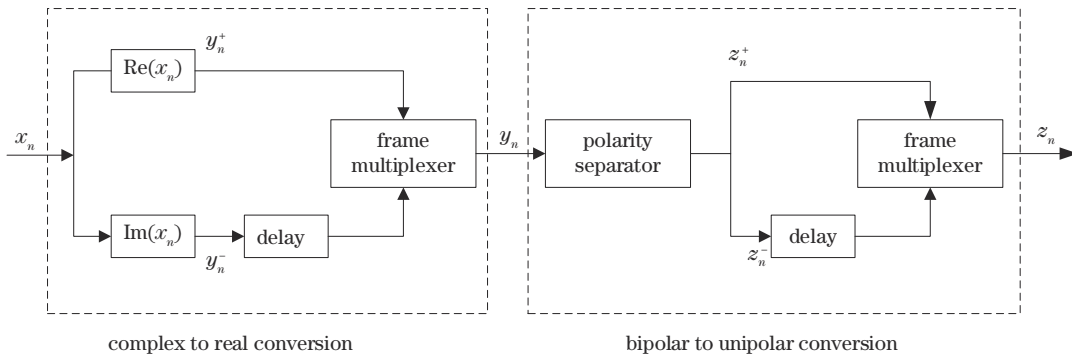


图 2 复数到实数以及双极到单极变换原理框图

Fig. 2 Block diagram of complex to real and bipolar to unipolar conversion

$$z_n^+ = \begin{cases} y_n, & y_n \geq 0 \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (4)$$

$$z_n^- = \begin{cases} |y_n|, & y_n \leq 0 \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (5)$$

$$z_n = \begin{cases} z_n^+, & 0 \leq n \leq 2N \\ z_n^-, & 2N \leq n \leq 4N \end{cases}, \quad (6)$$

式中： n 为子载波的索引号； N 为 QAM 映射之后数据占用的子载波数。通过以上步骤之后，就可以获得单极性的实数信号 z_n ，通过 LED 传输到达接收端，接收

端将接收到的信号进行发送端的反操作，就可以得到原始发送信号。

为了更加清晰地说明 ACO-OFDM 系统和 UO-OFDM 系统在传输相同有效信息的情况下使用子载波数目的不同，假设原始的二进制数据经过 QAM 映射之后占用的子载波数为 4，现将两种系统的频域中子载波映射情况表示如图 3 所示。从图 3 可以看出，ACO-OFDM 和 UO-OFDM 系统传输该有效信息分别需要的子载波数为 16 和 4。

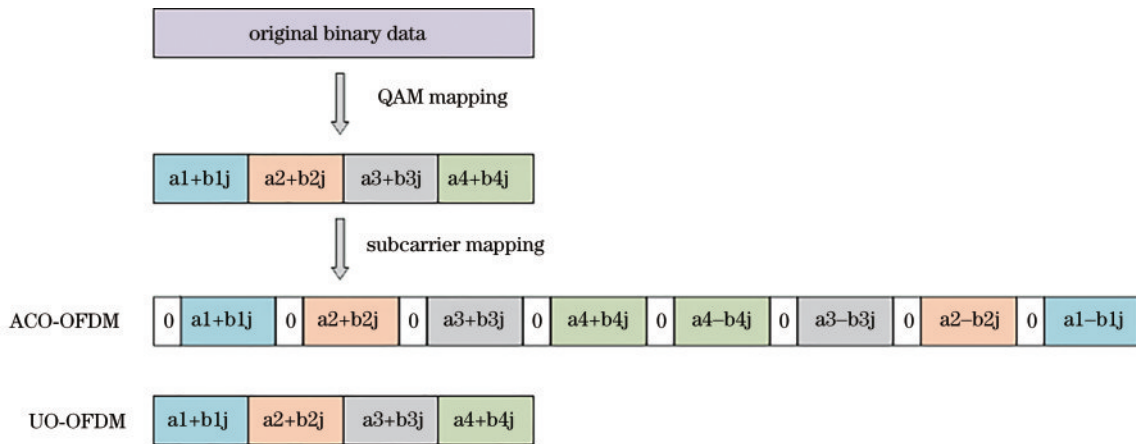


图 3 频域中的子载波映射

Fig. 3 Subcarrier mapping in the frequency domain

在进行 IFFT 操作的过程中,当不同符号间出现相位叠加的情况时,信号就会出现高 PAPR 的情况。PAPR 是最大功率信号与平均功率信号之比,通常表示为

$$R_{\text{PAPR}} = \frac{P_{\text{peak}}}{P_{\text{average}}} = 10 \log_{10} \frac{\max \{ |z_n|^2 \}}{E \{ |z_n|^2 \}}, \quad (7)$$

式中: $E\{\}$ 表示求期望值。PAPR 降低技术的性能指标,一般通过互补累积分布函数(CCDF)来确定。在

给定阈值 $R_{\text{PAPR}0}$ 的情况下,CCDF 表示 OFDM 信号的 PAPR 大于 $R_{\text{PAPR}0}$ 的概率,其定义为

$$P_{\text{CCDF}} = P(R_{\text{PAPR}} \geq R_{\text{PAPR}0}) = 1 - [1 - \exp(-R_{\text{PAPR}0})]^N, \quad (8)$$

式中: N 表示子载波数。

2.2 PTS 技术

PTS 技术通过降低信号峰值出现的概率来达到降低 PAPR 的目的,图 4 为 PTS 技术的原理框图。

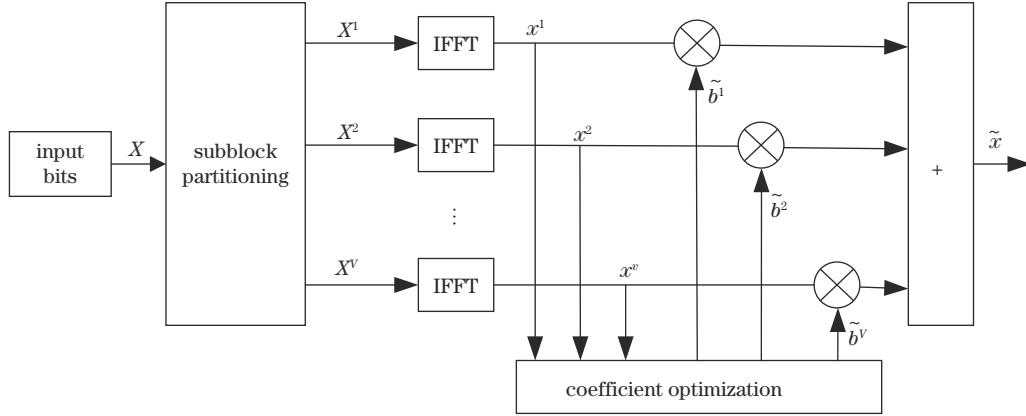


图 4 PTS 技术原理框图

Fig. 4 Block diagram of PTS technology

PTS 技术是将经过 QAM 映射之后的数据 X 分割成 V 个互不相交的子块:

$$X = [X^1, X^2, \dots, X^V]^T. \quad (9)$$

式(9)中,每个子块是连续分布且大小相同的。每个子块乘以一个相对应的相位旋转因子 $b^v = \exp(j\phi_v)$, $v = 1, 2, \dots, V$, 随后经过 IFFT 变换,得到时域信号,表示为

$$x = \text{IFFT} \left\{ \sum_{v=1}^V b^v \cdot X^v \right\} = \sum_{v=1}^V b^v \cdot \text{IFFT} \{ X^v \} = \sum_{v=1}^V b^v x^v, \quad (10)$$

式中: $\{x^v\}$ 为一个 PTS。遍历最佳的相位旋转因子,使得 PAPR 最小:

$$[\tilde{b}^1, \tilde{b}^2, \dots, \tilde{b}^V] = \arg \min_{[b^1, \dots, b^V]} \left\{ \max_{n=0,1,\dots,N-1} \left| \sum_{v=1}^V b^v x^v[n] \right| \right\}. \quad (11)$$

因此,具有最小 PAPR 的时域信号可以表示为

$$\tilde{x} = \sum_{v=1}^V \tilde{b}^v x^v. \quad (12)$$

2.3 GA-PTS 技术

传统的 PTS 技术虽然可以有效地降低峰均比,但是计算复杂度非常高并且搜索最佳相位旋转因子的效率非常低。如果允许的相位旋转因子有 W 个,那么当子块数为 V 时,需要在 W^{V-1} 个备选的相位因子集合中搜索使 PAPR 最低的相位旋转因子,搜索的复杂度

随着子块数 V 的增加呈现指数级的上升。无论是从计算复杂度还是搜索时间来说,PTS 都是非常复杂的,因此需要其他算法来优化 PTS 技术。

考虑到 PTS 技术是遍历所有的相位旋转因子而搜索出使 PAPR 最低的一个,这种搜索算法是无向的、低效率的。考虑到遗传算法的遗传操作是高效且有向的搜索算法,因此本文采用遗传算法来优化 PTS 技术,使得 PTS 技术在保持优越的 PAPR 降低性能的同时可以高效地搜索最佳的相位旋转因子,并且将该算法称为 GA-PTS 技术。

遗传算法是模拟自然界生物演化机制的一种算法,它要求在针对具体问题寻找最优解的过程中有用的染色体保留下来并遗传给下一代,而无用的染色体去除。在遗传算法中,通过编码并随机生成初始种群后,遗传操作的任务就是对群体中的每个个体按照它们对具体问题适应度的程度施加一定的操作,从而实现优胜劣汰的进化过程,并逼近最优解。在 GA-PTS 技术中,PTS 技术的相位旋转因子代表 GA-PTS 的染色体序列,因此对染色体序列的交叉和变异操作使种群多样化,PAPR 的性能代表 GA-PTS 的适应度,取 PAPR 的倒数作为适应度函数。GA-PTS 技术的原理框图如图 5 所示。

该算法的具体实现步骤如下。

1) 初始化。设置进化代数计数器 g , 最大遗传代数 G , 随机生成包含 p 个个体的初始种群 $P(0)$ 。

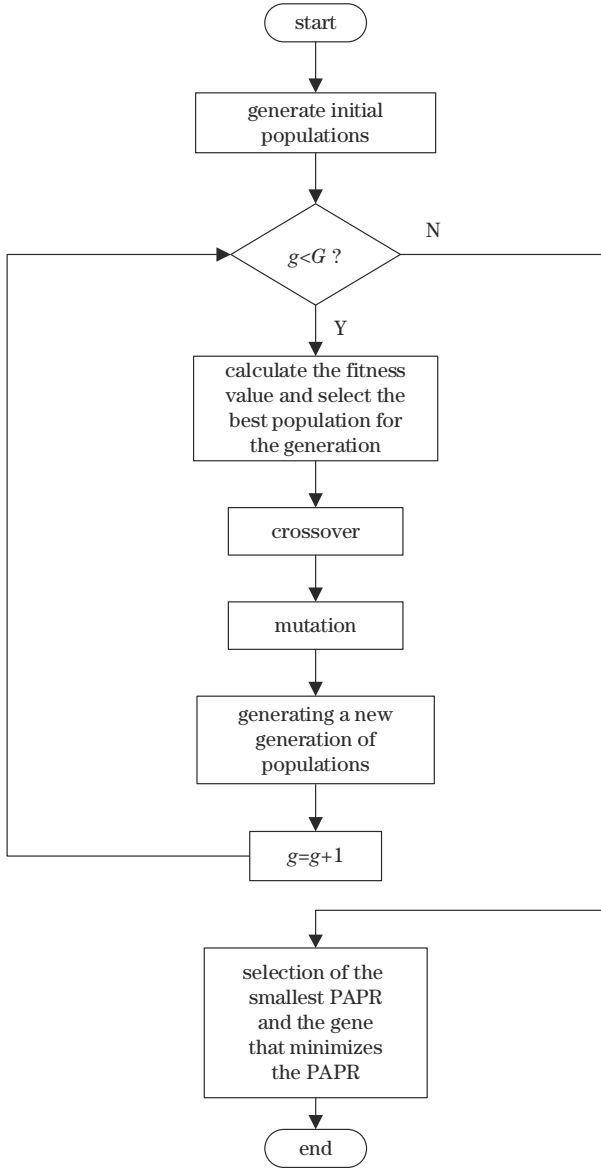


图 5 GA-PTS 技术原理框图

Fig. 5 Block diagram of GA-PTS technology

2) 个体评价。计算每一代群体 $P(g)$ 中每个个体的适应度。

3) 选择操作。从群体中选择优胜的个体,淘汰劣质的个体,选择的过程中利用轮盘赌选择法。

4) 交叉操作。当满足交叉概率时,在父代种群中随机选择两组基因进行交叉操作。这里我们选择单点交叉,通过交叉操作,遗传算法的全局搜索能力得到了极大地提高。

5) 变异操作。当满足变异概率时,在父代种群中随机选择一组基因进行变异操作。

6) 终止条件判断。若 $g < G$, 则 $g = g + 1$, 转到步骤 2 继续进行遗传操作; 若 $g > G$, 则将此时的具有最大适应度的个体作为最优解输出, 并结束遗传操作。

假设基因编码长度为 16, GA-PTS 技术中的交叉和变异操作示意图如图 6 所示。

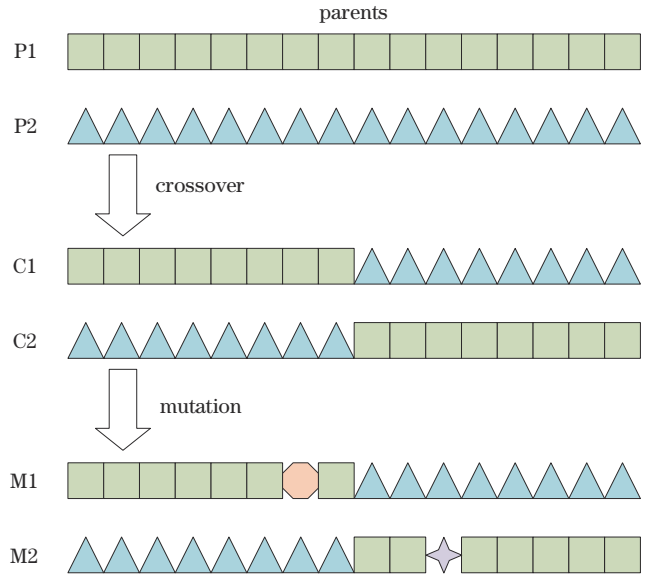


图 6 交叉和变异操作示意图

Fig. 6 Schematic of crossover and mutation operations

3 仿真结果与性能分析

3.1 PAPR 抑制性能分析

为了验证基于 UO-OFDM 系统的 PTS 技术的 PAPR 抑制性能, 使用 MATLAB 仿真软件进行仿真验证。仿真过程中采用 QAM 调制, 设置调制阶数为 16, UO-OFDM 系统的子载波个数为 64, 相位旋转因子选定为 $\{1, -1\}$, OFDM 信号的个数为 10000, 仿真结果如图 7 所示。

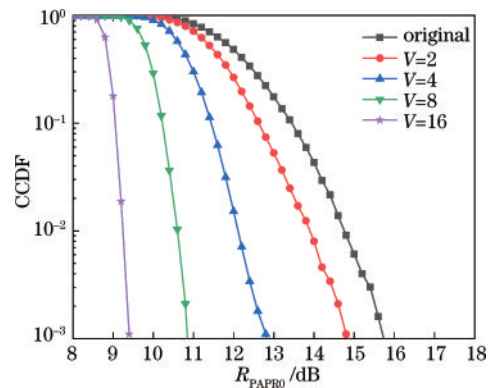


图 7 不同 V 取值下 PTS 技术的 PAPR 仿真曲线图

Fig. 7 PAPR simulation curves of PTS technology with different V values

由图 7 可知, PTS 技术可以有效地降低 PAPR, 并且随着子块数 V 的增加, PAPR 的抑制性能呈现增加的趋势。为了验证 PTS 技术相比于其他概率类技术的有效性, 本文在相同的参数设置下, 将概率类技术中 SLM 技术在不同的 M 组备选信号下的 PAPR 抑制性能与 PTS 技术在不同子块数 V 的 PAPR 抑制性能作对比, 仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知, PTS 技术与 SLM 技术相比, 可以更

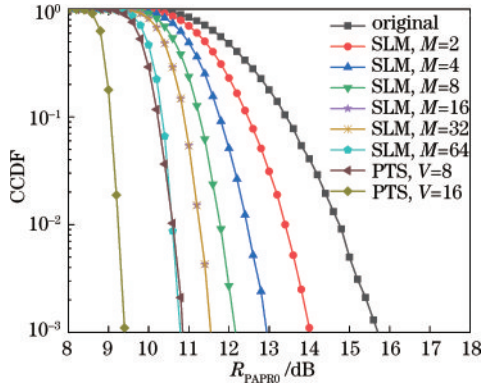


图 8 SLM 与 PTS 技术的 PAPR 仿真曲线图

Fig. 8 PAPR simulation curves of SLM and PTS technology

加有效地降低 PAPR,但是 PTS 技术的计算复杂度比 SLM 技术更高,且子块数 V 的增加,会带来巨大的计算量,因此有必要采取措施来降低其计算量。

为了验证基于 UO-OFDM 系统的 GA-PTS 技术的 PAPR 抑制性能,设置的仿真参数如表 1 所示。

将 GA-PTS 技术的 PAPR 抑制性能与传统的 PTS 技术在子块数 $V=16$ 时的 PAPR 抑制性能作对比,同时对比了 SLM 技术在 $M=16$ 的 PAPR 抑制性能,仿真对比结果如图 9 所示。

由图 9 可知,随着最大遗传代数 G 的增加,GA-PTS

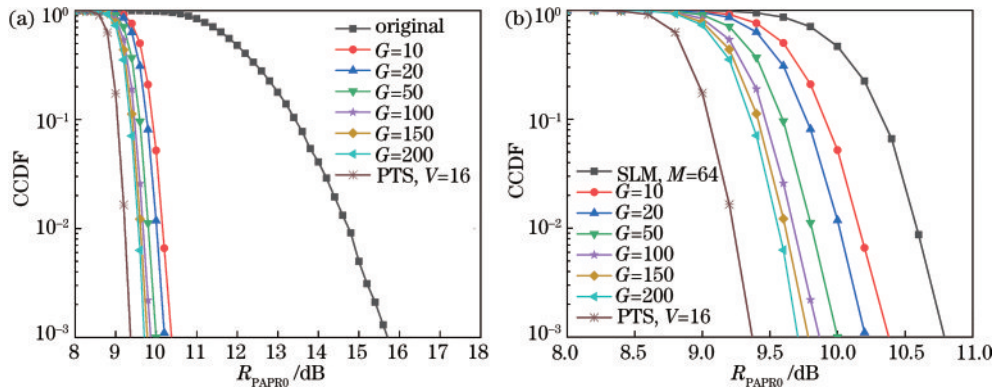


图 9 PAPR 仿真曲线图。(a)不同 G 取值下 GA-PTS 技术的 PAPR;(b)不同技术的 PAPR

Fig. 9 PAPR simulation curves. (a) PAPR of GA-PTS technique with different G values; (b) PAPR of different techniques

3.2 计算复杂度分析

首先,本文对比了所使用的 UO-OFDM 系统和原始的 ACO-OFDM 系统传输相同数目的有效信息所需的计算量。我们知道,OFDM 系统中的计算复杂度主要由计算过程中所进行的 IFFT 变换的点数所决定,IFFT 变换的点数决定了运算过程中所需的复数乘法以及复数加法运算的个数。当子载波个数为 N 时,进行一次 IFFT 运算,需要 $N/2 \log_2 N$ 次复数乘法运算以及 $N \log_2 N$ 次复数加法运算。假设有效数据占用的子载波数为 64,那么 ACO-OFDM 系统传输该信息需要 256 个子载波,而 UO-OFDM 系统传输该信息只需要 64 个子载波。对 ACO-OFDM 和 UO-OFDM 两种调制方式生成 1000 个光 OFDM 信号所需的运算量作对

表 1 GA-PTS 的 PAPR 性能仿真参数

Table 1 PAPR performance simulation parameters for GA-PTS

Parameter	Value
Modulation method	QAM
Modulation order	16
Number of subcarriers of valid data	$N = 64$
Number of sub-blocks	$V = 16$
Number of symbols	10000
Phase rotation factor	$b_v = 1, -1$
Crossover probability	$P_c = 0.9$
Mutation probability	$P_m = 0.05$
Genetic generation	$G = 10, 20, 50, 100, 150, 200$

技术的 PAPR 抑制性能呈现增加的趋势,逐渐逼近传统的 PTS 技术,并且仍然优于概率类技术中的 SLM 技术。在 CCDF 取值为 10^{-3} 时,原始的 OFDM 信号的 PAPR 值约为 15.8 dB,传统的 PTS 技术的 PAPR 值约为 9.45 dB,而 GA-PTS 技术在 $G=200$ 时的 PAPR 值约为 9.7 dB,相比于传统的 PTS 技术大约只有 0.25 dB 的差距,只损失了约 3.9% 的性能。继续增加最大遗传代数,GA-PTS 技术的 PAPR 抑制性能可以更加逼近传统的 PTS 技术,但是这样需要付出更多的时间成本与计算成本,因此,我们可以改变 G 的取值来使系统在 PAPR 抑制性能与计算复杂度之间做折中处理。

比,比较的结果如表 2 所示。

表 2 ACO-OFDM 和 UO-OFDM 系统计算复杂度比较

Table 2 Comparison of computational complexity of ACO-OFDM and UO-OFDM systems

Optical OFDM system	Calculation of multiplication	Calculation of addition
ACO-OFDM	1024000	2048000
UO-OFDM	192000	384000

同时对比了两种系统的误码率和 PAPR 性能,仿真过程中选定 QAM 调制阶数为 16,有效数据占用的子载波数为 64,OFDM 信号的个数为 10000,信道设置为高斯白噪声(AWGN)信道。仿真结果如图 10 所示。

通过对比表 2 以及图 10 可知,所使用的 UO-OFDM 系统与传统的 ACO-OFDM 系统在误码率和峰均比性能方面表现一致,但是传输同样数目的光 OFDM 信号,UO-OFDM 系统所需的复数乘法以及复数加法运算大约都是 ACO-OFDM 系统的 1/5,极大地减少了计算复杂度。

其次,为了评估基于 UO-OFDM 系统的 GA-PTS

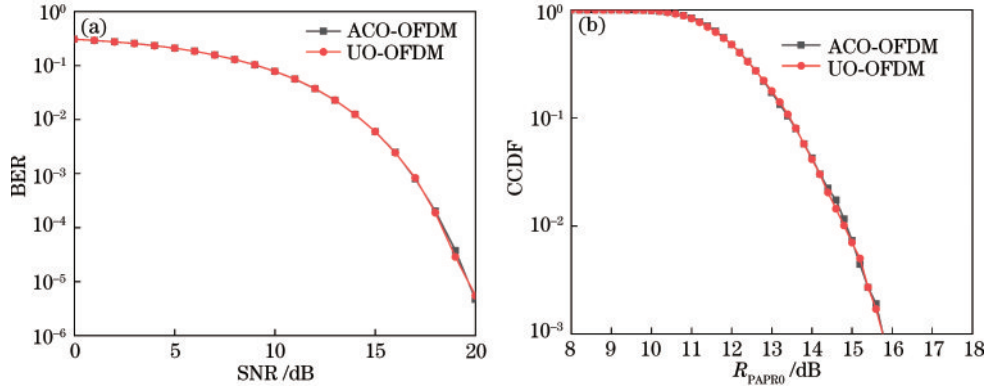


图 10 ACO-OFDM 与 UO-OFDM 系统的仿真曲线图。(a) 误码率; (b) PAPR

Fig. 10 Simulation curves for ACO-OFDM and UO-OFDM systems. (a) BER; (b) PAPR

表 3 传统的 PTS 和不同 G 取值下 GA-PTS 的算法仿真时间
Table 3 Algorithm simulation time for conventional PTS and GA-PTS with different G values

Methods to reduce PAPR	Time spent in simulation /s
GA-PTS, $G=10$	373
GA-PTS, $G=20$	721
GA-PTS, $G=50$	1737
GA-PTS, $G=100$	3410
GA-PTS, $G=150$	5141
GA-PTS, $G=200$	6899
Traditional PTS, $V=16$	37480

由表 3 可知,当最大遗传代数分别为 10、20、50、100、150、200 时,算法仿真所需的时间大约分别为传统 PTS 技术的 1/100、1/52、1/22、1/11、1/7、1/5。其中 $G=200$ 时的 GA-PTS 技术算法仿真所需的时间大约是传统 PTS 技术的 1/5,降低了约 80% 的计算复杂度。综合 PAPR 抑制性能和计算复杂度两个方面来考虑,本文认为 3.9% 的性能损失相比于降低约 80% 的计算复杂度来说是值得的。可见,GA-PTS 技术相比于传统的 PTS 技术,在 PAPR 抑制性能差距很小的情况下极大地减少了计算复杂度,证明了所提算法的有效性。

最后,为了证明本文所提的基于 GA-PTS 技术的 UO-OFDM 系统的优越性,在表 1 所示的仿真参数以及相同硬件配置的情况下,与基于 GA-PTS 技术的 ACO-OFDM 系统进行仿真对比,两种系统运行时间对比结果如图 11 所示。

由图 11 可知,所提的基于 GA-PTS 技术的 UO-OFDM 系统运行所用的时间相比于基于 GA-PTS 技

术相比于传统 PTS 技术降低的计算复杂度,在配置为 Intel (R) Core (TM) i7-9700K CPU@3.60 GHz, RAM 为 32 GB 的计算机上通过 64 位 MATLAB 软件执行 CCDF 仿真实验,仿真过程中设置 QAM 调制阶数为 16,子载波个数为 64,OFDM 符号的个数为 10000,运行时间对比结果如表 3 所示。

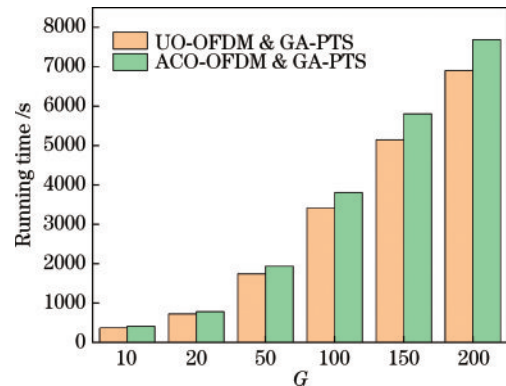


图 11 不同光 OFDM 系统下的 GA-PTS 算法运行时间

Fig. 11 Running time of GA-PTS algorithm under different optical OFDM systems

术的 ACO-OFDM 系统运行所用的时间有所减少,并且随着最大遗传代数的增加,减少的时间更加明显。

4 结 论

首先,为了降低原始的 ACO-OFDM 系统的计算复杂度,本文使用了 UO-OFDM 系统,通过仿真结果可知,该系统与 ACO-OFDM 系统具有相同的误码率和峰均比性能,但是,传输相同数目的有效信息,该系统所需的子载波数目是 ACO-OFDM 系统的 1/4,因此该系统在进行 IFFT 操作时所需的复数乘法以及复数加法运算大约为 ACO-OFDM 系统的 1/5,表明该系统相比于 ACO-OFDM 系统没有任何性能损失的情况下极大地减少了计算复杂度。其次,为了减少基于 UO-OFDM 系统的 PTS 技术的计算复杂度和搜索最佳相位旋转因子所需的时间,使用遗传算法来优化传

统的 PTS 技术,并且本文从算法运行所需时间的角度直观地说明了计算复杂度降低的程度,以及针对不同遗传代数下 GA-PTS 技术的 PAPR 抑制性能和计算复杂度进行了分析和对比,仿真结果表明,随着最大遗传代数 G 的增加,GA-PTS 技术的 PAPR 抑制性能呈现增加的趋势,并且逐渐逼近传统的 PTS 技术,最大遗传代数为 200 时的 PAPR 值相比于传统的 PTS 技术大约只有 0.25 dB 的差距,在只损失约 3.9% 的性能情况下,降低约 80% 的计算复杂度。最后,通过仿真验证了本文所提的基于 UO-OFDM 系统的 GA-PTS 技术在保持较低运算量的情况下,可以有效地减少可见光 OFDM 系统的峰均比。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 倪玮隆, 郑玉甫, 冯楚滢. 导频辅助降低 PAPR 技术在光正交频分复用通信系统中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(14): 140601.
Ni W L, Zheng Y F, Feng C Y. Application of pilot-assisted peak-to-average power ratio reduction technology in optical orthogonal frequency division multiplexing communication system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(14): 140601.
- [3] Abdalla H F, Hassan E S, Dessouky M I, et al. Three-layer PAPR reduction technique for FBMC based VLC systems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 102908-102916.
- [4] 贾科军, 魏少博, 蒯莹, 等. 可见光通信预编码光正交频分复用系统的研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1706004.
Jia K J, Wei S B, Lin Y, et al. Research on precoding optical orthogonal frequency division multiplexing system in visible light communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1706004.
- [5] Hao L L, Wang D Y, Cheng W Y, et al. Performance enhancement of ACO-OFDM-based VLC systems using a hybrid autoencoder scheme[J]. *Optics Communications*, 2019, 442: 110-116.
- [6] 郝少伟, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于非正交多址接入的星间可见光通信最优功率分配研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0706002.
Hao S W, Li Y J, Zhao S H, et al. Optimal power allocation for intersatellite visible light communication based on nonorthogonal multiple access[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0706002.
- [7] Vappangi S, Mani V V. Concurrent illumination and communication: a survey on visible light communication [J]. *Physical Communication*, 2019, 33: 90-114.
- [8] Kumar S, Singh P. A comprehensive survey of visible light communication: potential and challenges[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 109(2): 1357-1375.
- [9] Yu B Y, Zhang H M, Wei L, et al. Subcarrier grouping OFDM for visible-light communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(5): 7903812.
- [10] Zhang T, Ghassemlooy Z, Ma C Y, et al. PAPR reduction scheme for ACO-OFDM based visible light communication systems[J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 75-80.
- [11] Valluri S P, Kishore V, Vakamulla V M. A new selective mapping scheme for visible light systems[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 18087-18096.
- [12] Bai J R, Li Y, Yi Y, et al. PAPR reduction based on tone reservation scheme for DCO-OFDM indoor visible light communications[J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24630-24638.
- [13] Wang T Q, Li H, Huang X J. Analysis and mitigation of clipping noise in layered ACO-OFDM based visible light communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(1): 564-577.
- [14] Singh V K, Dalal U D. A Fast Hartley Transform based novel optical OFDM system for VLC indoor application with constant envelope PAPR reduction technique using frequency modulation[J]. *Optics Communications*, 2017, 400: 128-135.
- [15] Vappangi S, Mani V V. Performance analysis of DST-based intensity modulated/direct detection (IM/DD) systems for VLC[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(4): 1320-1337.
- [16] Wang T, Ren Y, Li C K, et al. A PAPR reduction scheme combining superimposed O-OFDM and μ -law mapping for VLC-OFDM systems[J]. *Optics Communications*, 2020, 460: 125190.
- [17] 周玉鑫, 毕美华, 滕旭阳, 等. 基于混沌映射的 OFDM-PON 物理层加密及系统性能增强算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1606002.
Zhou Y X, Bi M H, Teng X Y, et al. Physical layer encryption and system performance enhancement algorithm based on chaos mapping in OFDM-PON[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1606002.
- [18] Xiao W, Deng H G, Li Y, et al. PAPR reduction in VLC-OFDM system using a combination of shuffled frog leaping algorithm and hill-climbing algorithm[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(3): 3757-3771.
- [19] Liu Y, Deng H, Ren S, et al. Peak-to-average power ratio reduction in orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication systems using a modified partial transmit sequence technique[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(1): 016108.
- [20] Ali T H, Hamza A. PTS scheme based on MCAKM for peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems [J]. *IET Communications*, 2020, 14(1): 89-94.
- [21] Ahmad R, Srivastava A. PAPR reduction of OFDM signal through DFT precoding and GMSK pulse shaping in indoor VLC[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 122092-122103.