

人工蜂群算法结合 PTS 技术的 PAPR 降低方法

黄 娟, 谭 鸽 伟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为解决正交小波包复用(OWPM)系统存在的高峰均功率比(PAPR)问题,提出一种基于人工蜂群的相位搜索方法.通过蜜蜂群体的信息交换实现快速收敛最优值,最终使得计算复杂度大幅度降低,同时有效地抑制信号峰均功率比.仿真结果表明:该方法能很好地协调 OWPM 系统的 PAPR 抑制性能和计算复杂度.

**关键词:** 峰均功率比;人工蜂群;正交小波包复用;传输序列

**中图分类号:** TN 911.7      **文献标志码:** A

近年来,将小波(包)理论与正交频分复用(OFDM)原理相结合产生的一种新型多载波调制系统——正交小波包复用(OWPM)系统<sup>[1]</sup>,已成为通信领域的一个研究热点.由于 OWPM 系统同样存在某个时刻多个子信道信号以同相叠加产生的高峰均功率比问题,所以有必要寻找一种有效的方法加以抑制.国内外学者已提出了多种解决方案,这些方法大致分为 2 种:一种是从小波理论和小波包树分解的角度入手<sup>[2-4]</sup>;一种是将 OFDM 系统中抑制峰均功率比(peak to average power ratio, PAPR)的 3 种典型算法应用到 OWPM 系统中<sup>[5]</sup>,即预畸变技术<sup>[6-7]</sup>、编码类技术<sup>[8]</sup>和概率类技术<sup>[9]</sup>.本文基于 PTS 技术较高的计算复杂度问题,提出一种基于人工蜂群的 PTS 技术,即将一种人工蜂群的智能优化算法应用于 PTS 的相位因子搜索中.

1 OWPM 系统模型

基于 PTS 技术的 OWPM 系统的结构框图,如图 1 所示.首先,输入的高速比特流信号经串并变换分解为若干个独立的低速子比特流;然后,分别用若干个不同的子载波进行星座映射;接着,采取 PTS 算法处理以降低 PAPR 后将信号经无线信道发送至接收端;最后,接收端经过一系列的逆过程恢复出 OWPM 的原始信号,得到输出信号.

1.1 峰均功率比定义

在 OWPM 系统中,发送端数据通过串并变换、星座映射和 PTS 技术处理后,得到输出信号<sup>[10]</sup>为

$$x(t) = \sum_{(l,m) \in \Gamma} \sum_n S_{l,m}(n) \phi_{l,m}(t - nT_l).$$
 (1)

式(1)中: $l$ 为第 $l$ 层分解; $m$ 为每层的第 $m$ 条分支; $\phi_{l,m}$ 第 $l$ 层第 $m$ 分支的基函数,即尺度空间 $V_l$ 的尺度函数; $S_{l,m}(n)$ 是输入数字信号; $\Gamma$ 则表示小波包函数序列 $(l,m)$ 的集合.

由于信号出现峰值的概率比较小,所以一般采用峰均功率比,也就是信号的功率峰值与功率平均值之比来统计 OWPM 系统的信号分布情况.那么,可定义 OWPM 系统的 PAPR<sup>[11-12]</sup>为

$$\text{PAPR} = 10 \lg \frac{\max |x(t)|^2}{E[|x(t)|^2]}.$$
 (2)

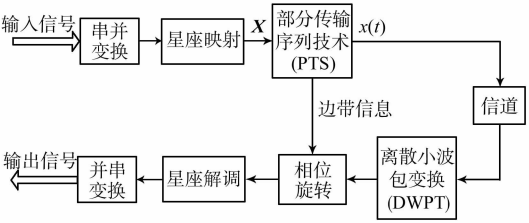


图 1 基于 PTS 技术的 OWPM 系统的结构框图  
Fig. 1 Structure diagram of OWPM system based on PTS technology

式(2)中: $E[|x(t)|^2]$ 为 OWPM 信号的平均功率. 通常用互补累积分布函数(CCDF)来衡量 OWPM 系统内的 PAPR 分布,其定义为

$$\text{CCDF}(\text{PAPR}_0) = P\{\text{PAPR} > \text{PAPR}_0\}. \tag{3}$$

式(3)中: $\text{PAPR}_0$  为峰均功率比的门限值; $P\{\}$ 代表信号的概率分布.

1.2 PTS 技术降低 PAPR

部分传输序列(PTS)技术的原理,如图 2 所示. 首先,长度为  $N$  的源数据向量  $\mathbf{X}$ ,通过串并变换和数据分割,得到  $V$  个互不重叠的子向量. 为保证每个子向量的长度均为  $N$ ,则需要在每个子向量的剩余子载波位置上填零,最终得到长度都为  $N$  的  $V$  个子向量  $\mathbf{X}_l = \{X_l^0, X_l^1, \dots, X_l^N\}$ . 因此,  $\mathbf{X} = \sum_{l=1}^V \mathbf{X}_l$ ,  $V$  为数据分组数. 然后,分别对各个子向量进行逆离散小波包变换(IDWPT),得到  $V$  个时域信号,即

$$\mathbf{x}_l = \text{IDWT}\{\mathbf{X}_l\}, l = 1, 2, \dots, V.$$

最后,将这  $V$  个时域信号与加权系数  $\mathbf{b}_l$  进行加权和优化处理,得到需要传送的信号,即

$$\mathbf{x} = \sum_{l=1}^V \mathbf{b}_l \cdot \mathbf{x}_l. \tag{4}$$

式(4)中: $\{\mathbf{b}_l = (b_l^0, b_l^1, \dots, b_l^{N-1}), l = 1, 2, \dots, V\}$  也称作子向量的相位因子. 它们统计独立,并且满足  $b_l^i = \exp(j\phi_l^i)$ ,  $\phi_l^i \in [0, 2\pi]$ . 由于  $\mathbf{b}_l$  可随机选择,所以可通过选择一组最优的加权系数使得 PAPR 值最小进行传送,即需满足<sup>[13]</sup>

$$\{b_1, b_2, \dots, b_V\} = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_V\}} \left( \max_{1 \leq n \leq N} \left| \sum_{l=1}^V \mathbf{b}_l \cdot \mathbf{x}_l \right|^2 \right). \tag{5}$$

式(5)中: $\arg \min()$  为函数取最小值时所用的判决条件.

2 基于人工蜂群的 PTS 算法

人工蜂群(ABC)算法最早是由 Karaboga<sup>[14]</sup>提出的,用于求解数值优化问题,是一种以自然界中蜂群的自组织模型和群体智能为基础的仿生算法<sup>[15-16]</sup>. 作为一种优化工具,ABC 算法提供了一种基于种群基的搜索方法,其特点是不需要了解问题的详细信息,只需对问题进行优劣的比较,通过各人工蜂个体的局部寻优行为,最终在群体中使全局最优值突显出来,具有快速收敛最优值的效果. 针对传统 PTS 算法存在因寻找最优相位因子序列所产生的高计算复杂度问题,考虑将人工蜂群算法应用于 PTS 的相位因子搜索中,以此大大地降低 PTS 技术的计算复杂度,同时有效地抑制信号高峰均功率比的产生.

对于 ABC 算法模型来说,其主要包含 4 种核心元素:食物源、雇佣蜂、旁观蜂和侦察蜂. 其中:雇佣蜂与食物源一一对应,记录与其对应的食物源的相关信息,并将信息与其他蜜蜂按概率分享;而作为非雇佣蜂的旁观蜂和侦察蜂,主要任务是寻找和开采食物源.

人工蜂群算法寻找最优相位因子序列的具体步骤如下所述.

**步骤 1** 随机产生  $V$  个食物源位置(也等于雇佣蜂数量),并计算每一个雇佣蜂所在食物源的花蜜数量. 由于在 PTS 技术降低峰均功率比的问题中,食物源位置等同于 PTS 技术中的相位向量  $\{\mathbf{b}_l = (b_l^0, b_l^1, \dots, b_l^{N-1}), l = 1, 2, \dots, V\}$ , 所以,食物源的花蜜数量代表了每个相位向量  $\mathbf{b}_l$  对应的 PAPR 值的适应度,该适应度的计算公式为

$$\text{fitness}(\mathbf{b}_l) = 1/\text{PAPR}_l. \tag{6}$$

式(6)中: $\text{PAPR}_l$  为相位向量  $\mathbf{b}_l$  对应的 PAPR 值,其值越小越好.

对于每个雇佣蜂来说,为寻找到最多花蜜量的食物源位置,还需在目前食物源位置的邻域内搜索以得到一个新的食物源位置  $b'_{l,k}$ ,即

$$b'_{l,k} = b_{l,k} + \Delta(b_{l,k} - b_{l,k}). \tag{7}$$

式(7)中: $k \in \{1, 2, \dots, V\}; n \in \{1, 2, \dots, V\}; \Delta$  是一个在  $[-1, 1]$  的随机数.

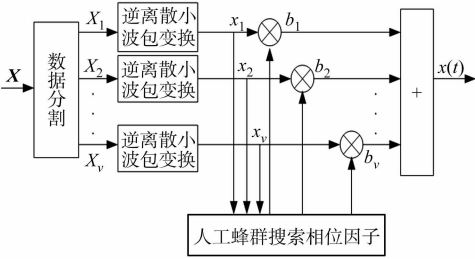


图 2 部分传输序列技术的发送端原理框图  
Fig. 2 Transmitter's functional block diagram of PTS technology

由于等式是针对连续信号所做的处理,而PTS算法中的相位向量只能取离散值,因此还需对式(7)作适当的修正,那么针对相位因子取值于 $W=\{-1,1\}$ 的情况,可得到修正后的相位因子为

$$b'_{l,k} = \begin{cases} 1, & \text{if } 1 \leq |b'_{l,k}| \leq 3, \\ -1, & \text{else.} \end{cases} \quad (8)$$

**步骤2** 利用式(6)计算每一个雇佣蜂进行邻域搜索后得到的新食物源的花蜜数量.如果新食物源的花蜜数量比原先的少,则保持原食物源位置;否则记住新食物源位置,忘记旧食物源位置.等到所有雇佣蜂均完成搜索后,雇佣蜂返回蜂巢,并通过舞蹈方式与旁观蜂进行信息交流,分享所带回的食物源信息和位置信息.旁观蜂则根据雇佣蜂所提供的食物源信息,以一定的概率来选择食物源位置.若该食物源的花蜜数量越多,那么旁观蜂选择该食物源的概率就越大.选择概率公式为

$$\text{pro } b_l = \exp(\text{fitness}(b_l)) / \sum_{l=1}^V \exp(\text{fitness}(b_l)). \quad (9)$$

**步骤3** 旁观蜂转变为雇佣蜂,也要完成在食物源附近区域的搜索并保存较优者.如果某一个食物源对应的花蜜量在“Limit”次迭代后都未曾改变,则意味着相应的食物源被这只蜜蜂抛弃,而这个食物源的雇佣蜂转变成一只侦察蜂,同时侦察蜂随机搜索新的食物源位置.这里,“Limit”代表着食物源停留的最大限制次数,它将控制着侦察蜂的选取和解的质量.重复以上步骤,直至达到初始设定的最大循环数MCN为止,输出最终的食物源位置.

文中算法的基本流程实现步骤:1) 置系统最大循环数为MCN,雇佣蜂停留在同一蜜源的最大次数为Limit,初始化停留次数 $\text{stay}(l)=0$ ,计数器 $\text{iter}=1$ ;2) 随机产生 $V$ 个食物源位置,利用式(6)计算其适应度;3) 利用式(7)对每个食物源进行邻域搜索,产生新食物源位置,用式(8)对其修正,并用式(6)计算相应的食物源花蜜数量;4) 比较当前食物源花蜜量与邻域食物源花蜜量,保存花蜜量较高的食物源位置,若邻域食物源花蜜量优于当前蜜源,则令 $\text{stay}(l)=0$ ,否则 $\text{stay}(l)=\text{stay}(l)+1$ ;5) 旁观蜂利用式(9)选择食物源,并转化为雇佣蜂采蜜,同时在食物源附近搜索,记录较优食物源位置,同时更新 $\text{stay}(l)$ 值;6) 若 $\text{stay}(l)>\text{Limit}$ ,则第 $l$ 个雇佣蜂放弃当前食物源而转变为侦察蜂,并随机搜索一个新的食物源,否则,直接跳转到下一步;7) 确定本次循环的最优食物源位置,同时更新 $\text{iter}=\text{iter}+1$ ;8) 若 $\text{iter}=\text{MCN}$ ,则终止循环,算法结束,否则跳转到步骤3)进行下一轮的循环.至此,通过人工蜂群算法中蜜蜂群体的相互协作与信息交流,可以快速且可靠的搜索到PTS技术中较优的相位因子序列,最终使得PTS技术的计算复杂度大大的降低,减轻OWPM系统的运算负担.

### 3 实验仿真与分析

为了评估文中算法对于降低OWPM系统的计算复杂度和峰均功率比性能,将基于遍历搜索法的PTS技术(Traverse-PTS)、基于Cimini<sup>[17]</sup>搜索法的PTS技术(Cimini-PTS)与文中算法(ABC-PTS)进行了仿真结果的比较.仿真环境设定为:10 000个OWPM符号被随机产生,选取db4小波作为小波包基,使用带有8个子载波数的4QAM调制,相位因子 $W=2$ ,随机分割且分割数 $V=10$ .其中,针对ABC-PTS算法,还需设定3个控制参数:食物源数目 $S$ ,系统最大循环数MCN以及雇佣蜂停留在同一蜜源的最大次数Limit值.

#### 3.1 峰均功率比抑制性能

针对ABC-PTS算法,令 $S=30$ , $\text{MCN}=30$ , $\text{Limit}=5$ ,其峰均功率比抑制性能比较结果,如图3(a)所示.由图3(a)可知:文中提出的ABC-PTS算法的PAPR抑制性能与Traverse-PTS的几乎相当;而Cimini-PTS算法降低PAPR的效果最差.

图3(b)比较了带有不同Limit值、相同的食物源数 $S=30$ 和相同的系统最大循环数 $\text{MCN}=30$ 的ABC-PTS算法的PAPR抑制性能.由图3(b)可知:当 $\text{CCDF}=10^{-3}$ 时,Limit=5的ABC-PTS的PAPR值为7.1 dB;带有Limit=10的ABC-PTS的PAPR约为7.1 dB.由此可以得出:对于不同的Limit值PAPR抑制性能差几乎可以忽略不计,增加或减小Limit值并不会影响ABC-PTS的PAPR抑制性能.

#### 3.2 计算复杂度

以程序总迭代数作为计算复杂度的衡量标准,比较了Traverse-PTS,Cimini-PTS以及ABC-PTS

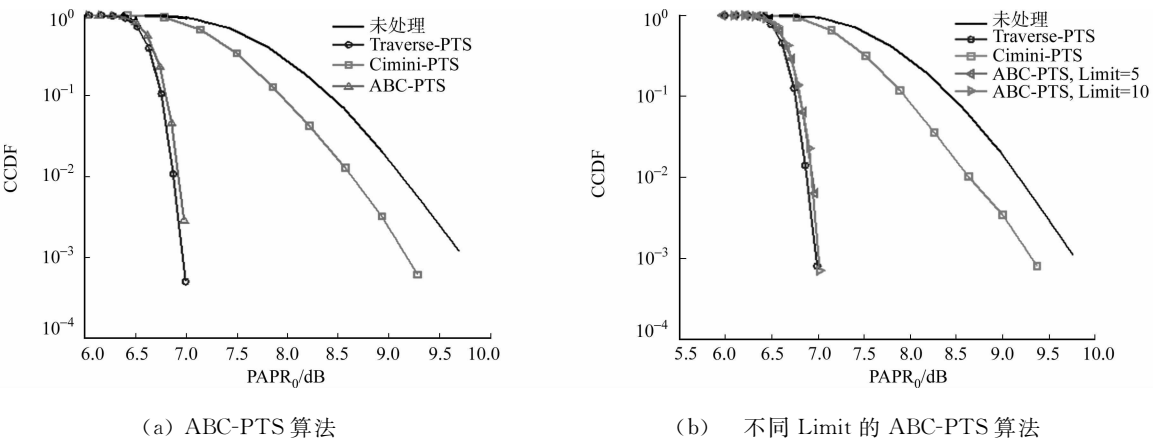


图 3 ABC-PTS 算法与其他算法的峰均功率比抑制性能比较

Fig. 3 PAPR reduction performance comparison of ABC-PTS algorithm and other algorithms

的计算复杂度。其中,对 ABC-PTS 算法,令  $S=30$ ,  $MCN=30$ ,  $Limit=5$ 。当  $CCDF=10^{-3}$  时,3 种方法的计算复杂度和 PAPR 抑制性能比较结果,如表 1 所示。从表 1 中可以得出:Traverse-PTS 算法的 PAPR 抑制性能最优,但其计算复杂度随着相位因子  $W$  和分割数  $V$  的增大而呈指数性升高;Cimini-PTS 算法的计算复杂度最小,但 PAPR 抑制性能却最差;而文中所提算法 ABC-PTS 能在前两种算法之间寻求一种平衡点。

3.3 误码率比较

为证明文中算法(ABC-PTS)的有效性与正确性,实验信道中加入了高斯白噪声,并对信道进行 1 000 次仿真统计。文中算法与其他算法的误码率( $\eta$ )性能比较,如图 4 所示。图 4 中: $R_{SN}$  为信噪比。由图 4 可知:无论采取何种相位搜索法处理系统,都几乎与未处理的系统 BER 性能曲线相重合,由此证明了其有效性与正确性。由于所研究的 Traverse-PTS,Cimini-PTS 以及 ABC-PTS 算法本质上均属于 PTS 算法,而 PTS 算法是一种无失真技术,在保障边带信息正确传输的条件下,可以获得非常准确的解调信号,从而不影响系统的 BER 性能。

表 1 3 种方法的计算复杂度和 PAPR 抑制性能比较

Tab. 1 Comparison on three methods of computing complexity and PAPR suppression performance

PAPR 抑制算法	计算复杂度	$R_{PAP}/\text{dB}$
Traverse-PTS	$W^V=210$	7.00
Cimini-PTS	$V=10$	9.48
ABC-PTS	$S \times MCN=30 \times 30$	7.10

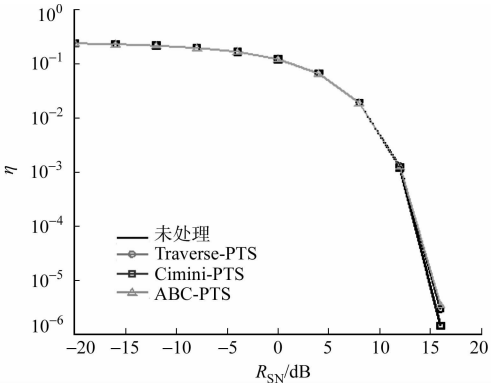


图 4 文中算法与其他算法的误码率性能比较

Fig. 4 BER performance comparison of new algorithm and other algorithms

4 结束语

将蜜蜂觅食原理应用于 PTS 的相位搜索中,提出一种基于人工蜂群算法的 PTS 技术,简称 ABC-PTS 技术。仿真结果表明:ABC-PTS 技术相比 Traverse-PTS 和 Cimini-PTS,能够使得系统在 PAPR 抑制性能和计算复杂度两者之间得到折中选择。同时,由于蜂群的觅食行为是一种典型的群体智能行为,所以系统越庞大,其效果将会越明显。

参考文献:

[1] 杨闽. 正交小波包复用系统信道估计方法的研究[D]. 天津:天津大学,2010:1-104.

[2] LI Jiao-jun,LI Heng,SU Li-yun. Fast adaptive optimal basis search algorithm for PAPR reduction[C]//IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE). Shanghai:IEEE Press,2011:666-671.

[3] LE N T,MURUGANATHAN S D,SESAY A B. An efficient PAPR reduction method for wavelet packet modulation schemes[C]//IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Barcelona:IEEE Press,2009:1-5.

- [4] ZAKARIA J, SALLEH M F M. Wavelet-based OFDM analysis: BER performance and PAPR profile for various wavelets[C]//IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA). Bandung:IEEE Press, 2012: 29-33.
- [5] 杨悦. WOFDM 系统中的 PAPR 抑制算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2012:1-53.
- [6] ABDULLAH H N, SAHIB F, VALENZUELA A. Hybrid PAPR reduction technique for complex wavelet packet modulation system[C]//IFIP Wireless Days (WD). Dublin:IEEE Press, 2012:1-3.
- [7] WANG Yong, GE Jian-hua, WANG Li-hua, et al. Nonlinear companding transform for reduction of peak-to-average power ratio in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2013, 59(2):369-375.
- [8] PREMA G, AMRUTHA E. A new MIMO-OFDM transmit preprocessing using pilot symbol assisted rateless codes to mitigate fading and wavelet based OFDM for PAPR reduction[C]//International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN). Thuckafay:IEEE Press, 2011:679-684.
- [9] TORUN B, LAKSHMANAN M K, NIKOOKAR H. Peak-to-average power ratio reduction of wavelet packet modulation by adaptive phase selection[C]//21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Istanbul:IEEE Press, 2010:105-110.
- [10] LIXIA M, MURRONI M. Peak-to-average power ratio reduction in multi-carrier system using genetic algorithms [J]. IET Signal Processing, 2011, 5(3):356-363.
- [11] JIANG Tao, LI Cai, NI Chun-xing. Effect of PAPR reduction on spectrum and energy efficiencies in OFDM systems with class-A HPA over AWGN channel[J]. IEEE Transactions on broadcasting, 2013, 59(3):513-519.
- [12] WANG Yong, WANG Li-hua, GE Jian-hua, et al. Nonlinear companding transform technique for reducing PAPR of OFDM signals[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 58(3):752-757.
- [13] YE Chen, LI Zi-jun, JIANG Tao, et al. PAPR Reduction of OQAM-OFDM signals using segmental PTS scheme with low complexity[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2014, 60(1):141-147.
- [14] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Kayseri, Turkey:Erciyes University, 2005:1-12.
- [15] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3):459-171.
- [16] KARABOGA D, AKAY B. A comparative study of artificial bee colony algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 214(1):108-132.
- [17] CIMINI L J, SOLLENBERGER N R. Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences[J]. IEEE Communication Letters, 2000, 4(3):86-88.

## PAPR Reduction Method Based on Artificial Bee Colony Algorithm and PTS Technology

HUANG Xian, TAN Ge-wei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to resolve the problem of high peak to average power ratio (PAPR) in orthogonal wavelet packet multiplexing (OWPM) system, a phase search method based on artificial bee colony is proposed in this paper, which is through the information exchange of honey bee colony to achieve fast convergence of the optimal value. The new method can ultimately make a significant reduction in computational complexity, while effectively suppressing signal PAPR. Simulation results show that this method can well coordinate PAPR suppression performance and computational complexity of the OWPM system.

**Keywords:** peak to average power ratio; artificial bee colony; orthogonal wavelet packet multiplexing; transmit sequence

(责任编辑:黄晓楠      英文审校:吴逢铁)