

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902757

部分传输序列的遗传模拟退火搜索方法^{*}

何选森^{1,2} 樊跃平¹

(1. 广州商学院 信息技术与工程学院 广州 511363; 2. 湖南大学 信息科学与工程学院 长沙 410082)

摘 要:在正交频分复用 (OFDM) 系统中,基于遗传算法的部分传输序列 (GA-PTS) 技术有效地降低了 PTS 的计算复杂度,但在改进峰值-平均功率比 (PAPR) 性能方面却并不理想。为此,提出在遗传算法中嵌入模拟退火 (SA) 算子从而构造一种混合的遗传模拟退火 (GSA) 算法,并把它应用于对 PTS 的最优相位因子进行搜索。首先,通过对 PTS 相位因子编码形成染色体,采用随机元素组成的染色体作为遗传算法的初始群体,并评估每个染色体的适应度值。然后,根据适应度值选择染色体,建立染色体的变异规则和交叉规则,对群体进行迭代进化。最后,群体中的染色体利用退火温度进行更新,从而产生出新的下一代种群。仿真结果说明,与 GA-PTS 方案相比,该方法不仅能降低计算负担,而且能够有效地降低 OFDM 系统 PAPR 值。

关键词:正交频分复用; 部分传输序列; 遗传算法; 遗传模拟退火算法; 峰值平均功率比

中图分类号: TN925.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

Genetic-simulated annealing search method for partial transmit sequence

He Xuansen^{1,2} Fan Yueping¹

(1. School of Information Technology and Engineering, Guangzhou College of Commerce, Guangzhou 511363, China;
(2. College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract:In orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems, the genetic algorithm-based partial transmit sequence (GA-PTS) technology can effectively reduce the computational complexity of PTS, but it is not ideal in improving the peak-to-average power ratio (PAPR) performance. Therefore, proposing to embed a simulated annealing (SA) operator in the GA to construct a hybrid genetic simulated annealing (GSA) algorithm, and it is also applied to search for the optimal phase factor of the PTS. First, chromosome formed by encoding PTS phase factor, the chromosomes composed of random elements are used as an initial population of the GA, and the fitness value of each chromosome is evaluated. Then, the chromosomes are also selected according to their fitness values, and the mutation rules and the mating (or cross) rules of the chromosomes are established to perform the iterative evolution on the population. Finally, the chromosomes in population are updated with annealing temperatures to produce new next-generation populations. The simulation results show that compared with the GA-PTS, the proposed method not only decreases the computational burden, but also effectively reduces the PAPR value of the OFDM system.

Keywords:orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); partial transmit sequence (PTS); genetic algorithm (GA); genetic simulated annealing algorithm (GSAA); peak-to-average power ratio (PAPR)

0 引 言

在无线和移动通信系统中,为了提高频率的利用率和信道的鲁棒性,正交频分复用 (orthogonal frequency

division multiplexing, OFDM) 的多载波传输调制技术被广泛地应用。在 OFDM 系统中,当多个正交子载波信号的相位相同时,OFDM 信号产生的瞬时功率就远远大于信号的平均功率,这就造成了比较大的峰值-平均功率比 (peak-to-average power ratio, PAPR),而大的 PAPR 值要

求 OFDM 系统的功率放大器、A/D、D/A 转换器等设备必须具有较高的线性度,从而增加了系统的成本。为了降低 PAPR,可采用 3 种有效的技术,即信号预畸变^[1]、信号编码^[2-3]和非畸变技术。对于线性变换的非畸变技术,主要包括选择性映射(selective mapping, SLM)^[4]和部分传输序列(partial transmit sequence, PTS)^[5],而 SLM 和 PTS 都属于多信号表示(multiple signal representation, MSR)方法。SLM 主要用于对输入的频域信号进行相位加扰并生成多个候选信号,其中选择具有最小 PAPR 的信号作为传输信号。尽管 SLM 有效地降低了 PAPR,但它仍会随机生成相位序列,从而导致缺乏系统的结构并增加了系统的复杂性。PTS 则是将数据块分成若干组并对其加扰以选择传输信号。PTS 的基本原理是将输入的数据符号划分成不相交的子集,并以不同的旋转(相位)因子对这些子集进行旋转;再将经修改后的分区子集组合,生成命名为 PTS 的候选信号集;选择具有最小 PAPR 值的候选序列之一进行传输。显然 SLM 和 PTS 都涉及到频域信号的相位。而 PTS 正是一种相位优化技术,它在降低 OFDM 系统的 PAPR 方面获得了广泛的应用。

设基带信号为 $\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$, 其中 N 为子载波的数量。 $X_n (n = 0, 1, \dots, N-1)$ 经过逆快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)之后为:

$$x_k = \text{IFFT}[X_n] \quad n, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中 x_k 为一个 OFDM 符号的波形,则 PAPR 定义为^[1-2]:

$$\text{PAPR} = \frac{\max\{|x_k|^2\}}{E[|x_k|^2]} \quad (2)$$

式中: $E[\cdot]$ 表示取均值。式(2)分母表示 x_k 的平均功率,而分子表示 x_k 的最大瞬时功率。

在实际的应用中, X_n 取值为随机变量。在 X_n 幅度归一化的条件下,当 N 很大时,复信号 x_k 的实部和虚部都服从均值为 0,方差为 1/2 的正态分布,即 x_k 的幅度服从瑞利分布,而 x_k 的功率(power)服从零均值的 $\chi^2(2)$ 分布,其累计概率分布函数为:

$$P\{\text{Power} \leq z\} = F(z) = 1 - e^{-z} \quad (3)$$

考虑到 x_k 的样本之间是相互独立的,因此 PAPR 值小于某一门限的概率分布为:

$$P\{\text{PAPR} \leq z\} = [F(z)]^N = (1 - e^{-z})^N \quad (4)$$

因此,其互补累计分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF)^[1]为:

$$P\{\text{PAPR} > z\} = 1 - (1 - e^{-z})^N \quad (5)$$

为了评价 OFDM 系统 PAPR 的性能指标,一般采用度量 $\text{CCDF} = P\{\text{PAPR} > \text{PAPR}_0\}$, 其中 PAPR_0 为某一门限。

把 N 个子载波数据 \mathbf{X} 分成 V 组 $\{\mathbf{X}_v | v = 1, 2, \dots, V\}$, 每组所含子载波数量相同。对 V 组数据进行加权组合:

$$\mathbf{X}' = \sum_{v=1}^V b_v \mathbf{X}_v \quad (6)$$

其中加权系数 b_v 为辅助信息(side information, SI), 它代表信号的相位因子:

$$b_v = \exp(j\varphi_v) \quad \varphi_v \in [0, 2\pi] \quad (7)$$

一般地, $\varphi_v = 2\pi\omega/W$ ($\omega = 0, 1, \dots, W-1$), W 是相位的数量。

对 \mathbf{X}' 进行 IFFT, 得到:

$$\mathbf{x}' = \sum_{v=1}^V b_v \cdot \text{IFFT}\{\mathbf{X}_v\} = \sum_{v=1}^V b_v \cdot \mathbf{x}_v \quad (8)$$

式中: \mathbf{x}_v 就是 V 个部分传输序列^[5]。通过搜索最优的相位因子 $\{b_v, v = 1, 2, \dots, V\}$ 使得 PAPR 值最小:

$$\{b_1, b_2, \dots, b_v\} = \underset{[b_1, b_2, \dots, b_v]}{\text{argmin}} \max \left(\left| \sum_{v=1}^V b_v \cdot \mathbf{x}_v \right|^2 \right) \quad (9)$$

为了得到最优的 PTS, 需要对所有 W^V 个相位因子进行穷举搜索, 并进行大量的 IFFT 运算。当 W 与 V 值都很大时, PTS 的计算复杂度就增加^[5]。为此, 出现了许多降低 PTS 计算负担的方法。把双层搜索 PTS 相位因子^[6]与一种新的 PAPR 值估计算法^[6]相结合, 在获得较好 PAPR 性能的基础上, 降低了 PTS 计算复杂度。基于主导时域样本(dominant time-domain samples)的 PTS 方案^[7]、选择主导时域样本的度量方法^[8]、基于 IFFT 旋转样本的选择方法^[9]、对称二叉树的相位搜索方法^[10]、基于峰值优化的 PTS^[11]、基于动态功率阈值的 PTS^[12]、以及基于主导时域样本的多载波快于奈奎斯特信号^[13]的 PTS 方案都取得了降低 PTS 计算复杂性的效果。同样地, 在降低 PTS 计算复杂性的同时, 又能有效降低 PAPR 值的研究上, 也出现了一些新的算法。如基于时域主导样本低复杂性的 PTS(low-complexity-PTS)^[14]、将格雷码和基于特定映射规则的反反馈移位寄存器操作相结合的低复杂度算法(Gray-PF-PTS)^[15]、以及分析随机存取存储器中数据策略构造一种新的 PTS(new-PTS)^[16]模式也都取得了非常好的效果。

1 遗传算法的部分传输序列(GA-PTS)方案概述

通过搜索最优的相位因子能有效地降低 PAPR 值和 PTS 的计算复杂度。除了上述的方法之外, 基于群体优化算法在 OFDM 系统中也获得了广泛的应用。如 GA 算法^[17]、基于分段策略 GA 算法^[18]、量子启发式进化算法^[19]、人工蜂群优化算法^[20]、粒子群优化算法^[21-22]、粒子群和灰狼优化算法相结合的方法^[23]都成功地解决了 PTS 的计算复杂性和降低 PAPR 的问题。在各种基于群体智能算法中, 由于 GA 对离散优化问题具有算法简单、全局收敛性好、计算时间短、鲁棒性强等优势, 因此本文

在 GA 基础上,构造新的 PTS 方案。

1.1 GA 的特点

在众多启发式优化算法中,进化算法(evolutionary algorithm, EA)最具有影响力。EA 算法主要包括种群生成器、选择器、适应度估计器以及 3 种基本的遗传算子,为交叉或重组、突变或变异、选择(selection)。而遗传算法 GA 则是最流行的 EA 形式。

GA 是基于需要解决的优化问题的一组候选解,在这组解中寻求出最佳的候选解。GA 的表示决定了对遗传算子的选择。所谓 GA 的表示就是数值的列表,更一般地,则是基于符号的集合。如果表示是连续的,则被称为向量;如果表示是由位组成,则称其为位串(bit strings)。在组合优化问题中,最佳的解通常是由列表中出现的符号组成。遗传算子在候选解的空间中进行搜索,并以所选择的表示用于产生新的解。而作为表示的解的编码则服从于进化过程,称该编码为基因型或染色体。

对编码技术的选择决定了 GA 的性能。在实际的应用中,GA 通常选择固定长度的二进制编码;而在 PTS 中对信号相位的编码也是采用二进制的数,这就使得 GA 能够用于解决 PTS 的计算复杂度问题。

1.2 GA-PTS 方案

在 OFDM 系统中,将 GA 引入到 PTS 的相位搜索中形成了 GA-PTS 方案^[18],以降低 PTS 的计算负担。在该方案中染色体的每 $\log_2 W$ 位对应于相位因子 ω 的二进制数表示。GA-PTS 方案的过程如下:1) 初始种群的染色体以随机方式生成,将 PTS 与相位因子集相乘,计算出染色体的 PAPR 值;2) 计算染色体的适应度值(即 PAPR 的倒数),并通过 GA 从染色体中选择合适的候选者以创建种群的下一代;3) 经过染色体的交叉和变异后,候选染色体继续进行迭代计算。上述过程被不断地重复,直到满足精度的要求为止。

2 遗传模拟退火的部分传输序列(GSA-PTS)方案

在全球优化技术中,探索 and 开发是最重要的两个能力。如果探索能力越高,其计算的复杂性也就越高,算法的收敛速度也就越慢。因为全局优化技术能探索整个搜索空间,因而具有较高的准确性。PTS 就是这样一种优化技术,它在整个解的空间中搜索最小的 PAPR 值,并且也具有较高的开发能力。

GA 通过模拟自然生物学中的评估有效地搜索局部最优解,因此可以在探索能力与开发能力之间进行权衡,以寻找最优化的策略(或解),并在全局搜索中表现 GA

的鲁棒性。在解决 PTS 计算复杂性的问题上,GA-PTS 方案虽然能够有效地提高 PTS 的收敛速度,然而它通常只能对 PAPR 性能提供一个次优的解。

2.1 GA 与模拟退火(SA)算法

所谓退火是指通过加热高于其熔点的金属、玻璃或晶体,并保持其温度,然后非常缓慢地冷却直至其凝固成完美的晶体结构^[24]。对这一物理过程的模拟则称为 SA^[25]。SA 算法模拟的是非平稳的有限状态的马尔可夫链,其状态空间是由最小的成本函数的域组成。对于任何的优化问题,SA 是一种流行的蒙特卡洛(Monte Carlo)算法,它也是通过搜索连续函数的全局最小值的通用串行算法。

在 SA 算法中,每次进行搜索时,由随机函数控制其选择的可能性;而在 GA 算法中,选择是通过交叉和变异操作来实现的。GA 之所以能具有提前收敛到局部最小值或全局最优的能力,通常是通过选择适当的交叉和变异概率来控制的,这与 SA 算法中温度受到控制而降低是类似的。因此 SA 算法可以看作是只有 1 个个体和 1 个变化着的变异率的 GA 的子集。显然,这种关系为 GA 和 SA 算法相互组合提供了天然的前提条件。

2.2 GSA 算法

由于 SA 是一种通用的串行算法,它的收敛速度很慢。而 GA 具有简单性和并行性,对搜寻全局最小值更有效,它固有的并行属性抵消了高的计算成本。在近几十年,对 GA 和 SA 两种算法协同作用的研究获得了很大进步。如引导进化 SA 算法^[26]将 SA 的思想纳入到进化计算的选择过程中,这种算法实际上是由许多并行的 SA 过程组成;GSA 算法^[27]则提供了完全并行,易于扩展的混合 GA/SA 方案,GSA 算法结合了 GA 和 SA 算法各自的特点,尤其是把 GA 的重组能力和 SA 的退火时间表有机地结合在一起,从而克服了 GA 和 SA 算法各自固有的缺点。

本文采用混合 GSA 算法的目的,是在保留 GA 和 SA 算法各自最佳特性的基础上,使混合算法的性能得到进一步提高;同时,把 SA 和 GA 进行混合不仅能继承 GA 的并行化优点,而且还能通过合并 SA 的元素来避免 GA 的计算瓶颈问题。本文提出的混合 GSA 算法与传统的 GSA 并不相同,特点如下。

2.3 GSA-PTS 方案

为了降低 OFDM 系统的 PAPR 值,将 GSA 算法应用于 PTS 的最优相位因子搜索中形成 GSA-PTS 方案。同时,为了降低 PTS 的计算负担,将备选的相位因子数量限制为 $W=4$,即 $b_e \in \{1, j, -1, -j\}$ 。相应地,载波数据 X 也同样被分成 $V=4$ 组。对这 4 个相位因子 b_e 采用 2 位二进制数进行编码,从而形成混合 GSA 算法的染色体。

相位编码的规则为 $00 \rightarrow b_1 = 1$, $01 \rightarrow b_2 = -1$, $10 \rightarrow b_3 = j$, $11 \rightarrow b_4 = -j$ 。

本文提出的混合 GSA 算法是将 SA 算子嵌入到 GA 中形成新的混合算法。其基本原理如下:在父代群体 P 的基础上,利用 GA 的评估、选择、交叉、变异等算子获得子代群体 P_s ;为了增加子代染色体(优化解)的多样性,部分子代染色体用随机产生的染色体替代,而替代的概率则由退火温度 T 进行控制, T 则采用退火因子 u 进行更新。本文 GSA 算法的主要输入参数为:群体中染色体的数量 R 以及进化迭代的次数 G 。在混合 GSA 算法的迭代过程中所涉及的主要参数为染色体 $h_i (i=1, 2, \dots, R)$ 的适应度(fitness)值 f_i ,染色体的选择概率 P_i ,交叉概率 p_c ,变异概率 p_m ,以及退火因子 u 等。

本文提出的 GSA-PTS 方案,对最优相位因子集的搜索过程,步骤如下。

1) 设定混合 GSA 算法的输入参数,即算法的迭代次数 G ,以及染色体的数量 R 。

2) 初始化群体,采用随机生成的染色体作为群体的初始化值 $\mathbf{P}=[h_1, h_2, \dots, h_R]$ 。

主迭代循环体(Repeat)

3) 评估染色体,每个染色体的适应度值 $f(h_i)$,采用式(10)进行计算。

$$f(h_k) = 1/[10\lg \text{PAPR}(h_k)] \quad k=1, 2, \dots, R \quad (10)$$

4) 选择染色体,在父代群体中,采用 Roulette wheel 算法随机地选择出 $(1-p_c)R$ 个染色体直接加入到子代群体 P_s 中,而某个父代染色体被选中的概率为:

$$P(h_k) = \frac{f(h_k)}{\sum_{k=1}^R f(h_k)} \quad k=1, 2, \dots, R \quad (11)$$

具有较大适应度值的染色体获得更多后代的概率大。

5) 交叉操作,采用一点交叉(one-point crossover)算子。一点交叉需要父染色体上的 1 个交叉点,超过该点的所有数据在两个父染色体之间进行交换。对于在第(4)步中没有被选中的 $p_c R/2$ 对染色体,以概率 p_c 进行一点交叉,并将它们的后代加入到群体 P_s 中。

6) 变异操作,对 P_s 中每个染色体,采用二进制字符串表示法中最常用的变异,即均匀位翻转变异(uniform bit-flip mutation)。该变异以概率 p_m 独立地改变染色体的每个位,即随机地翻转染色体的 1 位。

7) 更新种群,由子代群体 P_s 代替父代群体 P 以完成种群的更新。

8) 退火处理,首先,计算新一代群体 P_s 中每个染色体 h_i 的适应度值 $f(h_i)$;然后,随机地生成一个新的染色体 h_{new} ,并计算它的适应度值 $f(h_{\text{new}})$;最后,比较这两个适应度值的大小;如果 $f(h_{\text{new}}) > f(h_i)$,则用 h_{new} 代替 h_i ,

否则,采用式(12)的概率将 h_i 用 h_{new} 代替。

$$P_i = \exp\left[\frac{f(h_{\text{new}}) - f(h_i)}{T}\right] \quad (12)$$

式中: T 是作为退火过程的降低温度。

9) 更新退火温度,采用退火因子 u 产生新的退火温度,即用 uT 代替 T , $uT \rightarrow T$ 。

Until 迭代次数 = G , 否则返回到步骤 3)。

10) 输出结果,从最终的群体(总共 $G \times R$ 个染色体)中选出具有最大适应度值 $f(h_i)$ 的染色体 h_i ,并根据编码规则对所选择的染色体进行解码,以获得最优的 PTS 相位因子矢量。

3 仿真结果与分析

为了验证本文 GSA-PTS 方案搜索最优相位因子以及降低 OFDM 系统 PAPR 值的性能,利用 MATLAB 进行仿真实验。同时将 GSA-PTS 方案与传统 OFDM 方式,PTS 方式以及 GA-PTS 等方法的性能进行比较。在仿真中,为获得公平的结果,各种方法的实验环境都是相同的。

3.1 仿真环境

仿真的 PC 为 Intel(R) Celeron(R) 1007U-1.5 GHz 的 CPU,4 GB 内存,操作系统为 Windows 10,所有仿真都是在 MATLAB 9 (R2016a)上运行。

对 OFDM 信号,采用正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)调制方式,子载波数分别取 $N=128$ 和 $N=256$ 。在 PTS 中采用随机交织的子块分区方法;在 GSA-PTS 方案中,当进化迭代次数 $G=5$ 时,群体中染色体数量分别取 $R=10$ 和 $R=20$;当 $G=10$ 时,取 $R=10$ 。GA 的交叉概率 $p_c=0.95$,变异概率 $p_m=0.2$ 。SA 的初始退火温度 $T=0.005$,退火因子 $u=0.9$ 。在仿真中随机地选取 10^5 个 OFDM 块(block)用于计算指标 CCDF。

3.2 仿真结果

在子载波数 $N=128$ 的情况下,CCDF 指标随 PAPR_0 值变化的曲线如图 1 所示。

从图 1 看出,与原始的 OFDM 信号(original)相比较,PTS、GA-PTS、GSA-PTS 方案都明显降低了 PAPR 值。为更详细地观察各种方法在 PAPR 性能上的表现,将图 1 部分内容(在 $\text{CCDF}=10^{-2}$ 附近)放大,如图 2 所示。

从图 2 看出,对于相同的迭代次数 G 和相同的染色体数量 R ,本文的 GSA-PTS 方案所获得的 PAPR 性能明显优于对应的 GA-PTS 方案。当 $\text{CCDF}=10^{-2}$ 时,GSA-PTS 和 GA-PTS 方案所对应的 PAPR 指标如表 1 所示。

从表 1 的数据可知,在相同遗传参数 G 和 R 的条件下,本文的 GSA-PTS 方案比 GA-PTS 方案平均降低了大

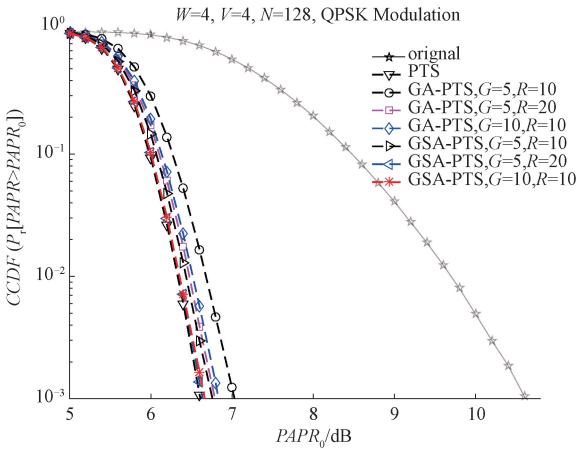


图1 子载波数 $N=128$ 情况下各种方法的 PAPR 性能
Fig. 1 PAPR performance of various methods when $N=128$

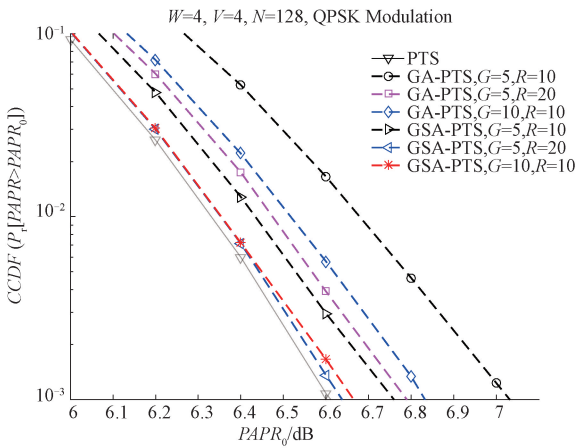


图2 对图1在 $CCDF=10^{-2}$ 附近的放大效果
Fig. 2 Zoomed version of Fig. 1 around $CCDF=10^{-2}$

约 0.2~0.3 dB 的 PAPR 值。结合图 2 可知,在参数 $G=5, R=20$ 和 $G=10, R=10$ 两种情况下,GSA-PTS 方案能够获得与 PTS 技术非常接近的 PAPR 值。这说明,本文提出的 GSA-PTS 方案在降低 PAPR 方面是很有效的。

表1 GSA-PTS 和 GA-PTS 方案的 PAPR 值比较		
Table 1 PAPR between GSA-PTS and GA-PTS		
遗传参数	方法	PAPR 值/dB
$G=5, R=10$	GA-PTS	6.67
	GSA-PTS	6.44
$G=5, R=20$	GA-PTS	6.48
	GSA-PTS	6.35
$G=10, R=10$	GA-PTS	6.53
	GSA-PTS	6.36

当子载波数为 $N=256$ 时,其仿真结果如图 3 所示。显然,图 3 的结果与图 1 类似。与原始的 OFDM 信

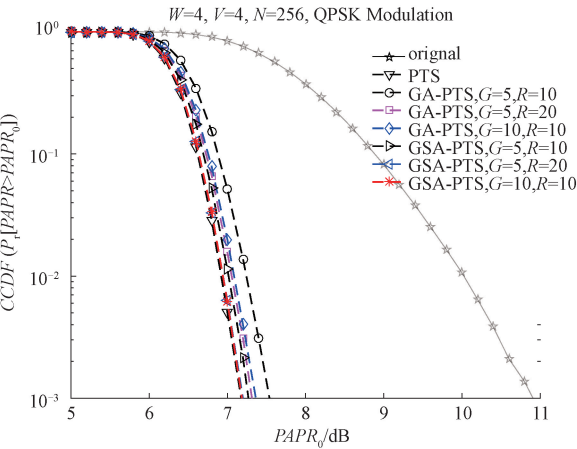


图3 子载波数 $N=256$ 情况下各种方法的 PAPR 性能
Fig. 3 PAPR performance of various methods when $N=256$

号相比,PTS、GA-PTS、GSA-PTS 方案都能有效地降低 PAPR 值。为了更清晰地观察 $N=256$ 的仿真结果,将图 3 的部分内容(在 $CCDF=10^{-2}$ 附近)放大如图 4 所示。

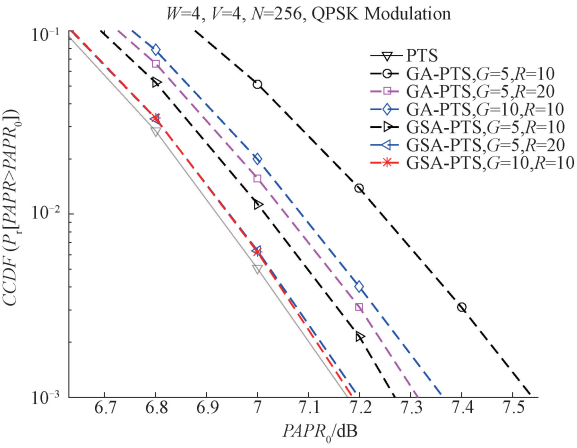


图4 对图3在 $CCDF=10^{-2}$ 附近的放大效果
Fig. 4 Zoomed version of Fig. 3 around $CCDF=10^{-2}$

从图 4 看出,在 G 和 R 相同的情况下,GSA-PTS 方案在降低 PAPR 方面明显优于 GA-PTS。而且在 $G=5, R=20$ 和 $G=10, R=10$ 两种情况下,本文提出的 GSA-PTS 方案与 PTS 技术在降低 PAPR 方面,性能十分接近。

综合以上 2 种($N=128, 256$)仿真结果,可得出以下的结论:1) 在所有方法中,PTS 获得的 PAPR 指标是最优的,但它的计算负担却是最大的;2) 比较图 1 和 3,图 2 和 4 可知,随着子载波数量 N 的增加,各种方案得到的 PAPR 性能也随之下降低;3) 在相同染色体数量 R 条件下,随着迭代次数的增加,GA-PTS 和 GSA-PTS 方案的 PAPR 性能也随之提高;4) 在相同迭代次数 G 的情况下,随着染色体数量增加,GA-PTS 和 GSA-PTS 方案的 PAPR 性能也随之提高;5) 无论实验环境如何变化,在改进

PAPR 性能方面,本文的 GSA-PTS 方案明显优于 GA-PTS 方案。

4 结 论

在 OFDM 系统中,PTS 技术在对信号相位因子的优化中获得了广泛的应用,但其计算负担过重。GA-PTS 方案能够降低 PTS 的计算复杂度,然而在提高 OFDM 系统的 PAPR 性能方面却是次优的。为了克服 GA-PTS 的缺陷,本文提出将 SA 算子嵌入到 GA 中形成 GSA 混合算法,并将其应用于 PTS 中,从而构建 GSA-PTS 方案用以搜索最优的相位因子。本文所提出的 GSA 混合算法不仅保留了 GA 和 SA 算法各自的优点,而且还克服了 GA 和 SA 算法固有的缺点。仿真结果说明,在改善 OFDM 系统 PAPR 性能方面,GSA-PTS 方案明显优于 GA-PTS。

参考文献

- [1] PENG S M, LIU A J, SONG L, et al. Spectral efficiency maximization for deliberate clipping-based multicarrier faster-than-Nyquist signaling [J]. IEEE Access, 2018, 6: 13617-13623.
- [2] TONG J, PING L, ZHANG Z H, et al. Iterative soft compensation for OFDM systems with clipping and superposition coded modulation [J]. IEEE Transaction on Communications, 2010, 58(10): 2861-2870.
- [3] YOSHIZAWA R, OCHIAI H. Trellis-assisted constellation subset selection for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2183-2198.
- [4] 何选森,曾庆芳,柴文标. 基于 SLM 的边带信息嵌入与检测方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(2): 150-154.
HE X S, ZENG Q F, CHAI W B. Embedding and detection method of IS based on SLM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(2): 150-154.
- [5] CHENG X, LIU D J, FENG S, et al. PTS based on DisABC algorithm for PAPR reduction in OFDM systems [J]. Electronics Letters, 2018, 54(6): 397-398.
- [6] HE Z M, ZHOU L Y, CHEN Y O, et al. Low-complexity PTS scheme for PAPR reduction in FBMC-OQAM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(11): 2322-2325.
- [7] LEE K S, KANG H, NO J S. New PTS schemes with adaptive selection methods of dominant time-domain samples in OFDM systems [J]. IEEE Transaction on Broadcasting, 2018, 64(3): 747-761.
- [8] CHO Y J, KIM K H, WOO J Y, et al. Low-complexity PTS schemes using dominant time-domain samples in OFDM systems [J]. IEEE Transaction on Broadcasting, 2017, 63(2): 440-445.
- [9] LEE K S, CHO Y J, WOO J Y, et al. Low-complexity PTS schemes using OFDM signal rotation and pre-exclusion of phase rotating vectors [J]. IET Communications, 2016, 10(5): 540-547.
- [10] 何选森,曾庆芳,吴良敏. 对称双二叉树 PTS 相位搜索 [J]. 应用科学学报, 2013, 31(3): 271-277.
HE X S, ZENG Q F, WU L M. PTS phase search with symmetrical dual binary tree [J]. Journal of Applied Science, 2013, 31(3): 271-277.
- [11] 季策,张超. 基于峰值优化的改进 PTS 算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(7): 1633-1638.
JI C, ZHANG CH. Improved PTS scheme based on peak optimization [J]. System Engineering and Electronics, 2018, 40(7): 1633-1638.
- [12] 季策,郭伟,张超. 基于动态功率阈值降低 PAPR 的部分传输序列算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1620-1624.
JI C, GUO W, ZHANG CH. Partial transmit sequences algorithm to reduce peak-to-average power ratio based on dynamic power threshold [J]. System Engineering and Electronics, 2017, 39(7): 1620-1624.
- [13] CAI B, LIU A J, LIANG X H. Low-complexity partial transmit sequence methods using dominant time-domain samples for multicarrier faster-than-Nyquist signaling [J]. IEEE Access, 2019(7): 121522-121564.
- [14] ZHOU Z, WANG L Y, HU C. Low-complexity PTS scheme for improving PAPR performance of OFDM systems [J]. IEEE Access, 2019(7): 131986-131994.
- [15] AL-JAWHAR Y M, RAMLI K N, MUSTAPHA A, et al. Reducing PAPR with low complexity for 4G and 5G waveform designs [J]. IEEE Access, 2019 (7): 97673-97688.
- [16] MERAH H, MESRI M, TALBI L. Complexity reduction of PTS technique to reduce PAPR of OFDM signal used in a wireless communication system [J]. IET Communications, 2019, 13(7): 939-946.
- [17] 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.
- [18] 冯兴乐,梁中华,路萍 等. 基于分段替换的低复杂度降低 OFDM 峰均比算法 [J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(1): 60-65.
FENG X L, LIANG ZH H, LU P, et al. Low complexity algorithm reducing peak-average-power ratio in OFDM system based on segment replacement [J]. Journal of

- University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(1): 60-65.
- [19] CHEN J C. Application of quantum-inspired evolutionary algorithm to reduce PAPR of an OFDM signal using partial transmit sequences technique [J]. IEEE Transaction on Broadcasting, 2010, 56(1): 110-113.
- [20] TASPINAR N, YILDIRIM M. A novel parallel artificial bee colony algorithm and its PAPR reduction performance using SLM scheme in OFDM and MIMO-OFDM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19 (10): 1830-1833.
- [21] WEN J H, LEE S H, HUANG Y F, et al. A suboptimal PTS algorithm based on particle swarm optimization technique for PAPR reduction in OFDM systems [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2008(1): 1-8.
- [22] PRASAD S, JAYABALAN R. PAPR reduction in OFDM using scaled particle swarm optimization based partial transmit sequence technique [J]. Journal of Engineering, 2019(5): 3460-3468.
- [23] KUMAR P R, NAGANJANEYULU P V, PRASAD K S. Hybrid PS - GW optimized PTS scheme for PAPR reduction in OFDM system [J]. IET Communications, 2019, 13(8): 2996-3002.
- [24] FRANZIN A, STUTZLE T. Revisiting simulated annealing: a component-based analysis [J]. Computers and Operations Research, 2019, 104: 191-206.
- [25] CERNY V. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm [J]. Journal of Optimization Theory and Application, 1985,

45(1): 41-51.

- [26] YIP P C, PAO Y H. Combinatorial optimization with use of guided evolutionary simulated annealing [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1995, 6(2): 290-295.
- [27] CHEN H, FLANN N S, WATSON D W. Parallel genetic simulated annealing: A massively parallel SIMD algorithm [J]. IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems, 1998, 9(2): 126-136.

作者简介



何选森, 分别在 1983 年和 1995 年于国防科技大学获得学士学位和硕士学位, 现为广州商学院教师, 主要研究方向为统计信号处理、数字信号处理、盲信源分离、无线通信系统等。

E-mail: xshe2010@163.com.

He Xuansen received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from National University of Defense Technology in 1983 and 1995, respectively. He is currently a teacher at Guangzhou College of Commerce. His main research interests include stochastic signal processing, digital signal processing, blind source separation, and wireless communication systems.



樊跃平, 1982 年于华中科技大学获得学士学位, 现为广州商学院教师, 主要研究方向为软件工程。

E-mail: 272765491@qq.com

Fan Yueping received his B. Sc. degrees from Huazhong University of Science and Technology in 1982. He is currently a teacher at Guangzhou College of Commerce. His main research interest is software engineering.