

改进的GA-PTS降低OFDM峰均比

杨霖, 张帅, 王小波, 贾莹莹, 田浩, 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

【摘要】提出了一种使用相位因子优选对方法改进GA-PTS以降低OFDM的PAPR的算法。改进算法根据具有低PAPR值的不同PTS子块求和有更大的概率获得具有低PAPR值的传输信号,将GA-PTS中基因交叉步骤变为选择相位因子优选对,达到进一步提高GA-PTS降低系统PAPR的目的。仿真结果验证了该算法可以获得低于传统GA-PTS算法0.2 dB左右的PAPR性能。

关键词 遗传算法; 正交频分复用; 部分传输序列; 峰值平均功率比; 相位因子优选对

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.004

Improved GA-PTS Method for Reducing PAPR of OFDM

YANG Lin, ZHANG Shuai, WANG Xiao-bo, JIA Ying-ying, TIAN Hao, and LI Shao-qian

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract A novel method called phase factor optimal pair (PFOP) is proposed to improve in genetic algorithm with partial transmitter sequence (GA-PTS). The key of PTS algorithm is to choose the phase factors. GA-PTS uses phase factors as genes to take selection, crossover and mutation. The improved method is based on the principle that the sum of several low PAPR PTS sequences has a bigger probability to obtain the OFDM signals with low PAPR. In the improved GA-PTS, the cross step is changed into the step of selecting phase factor optimal pair. The simulation results show that this improved method has 0.2dB of the PAPR lower than ordinary GA-PTS algorithm.

Key words genetic algorithm (GA); orthogonal frequency division multiplexin (OFDM); partial transmitter sequence (PTS); peak-to-average power ratio (PAPR); phase factor optimal pair

正交频分复用(OFDM)是多载波调制技术,其主要思想是将整个信道分成若干个相互正交的子信道,在每个子信道进行调制和传输。它具有频谱利用率高,抗多径衰落能力强和对延迟效应敏感度低的优点。目前OFDM技术已经被广泛应用于很多领域。在LTE(long term evolution)项目中,OFDM被选定作为基本传输技术的下行技术标准,成为LTE项目中的核心技术之一。

OFDM系统最主要缺点是具有高平均值功率比(PAPR)。当输入端输入数据同相时,其输出的信号就会具有很大的峰值,这种高PAPR信号要求系统的高功率放大器和A/D变换器的线性度很高,如果在高功率时出现非线性,就会产生子载波间的相互干扰和带外辐射,大大降低了OFDM的系统性能^[1]。这限制了OFDM的广泛应用,因此须采取合适的方法降低OFDM系统的PAPR,目前主要方法包括:限幅法、编码法和概率法。限幅法^[2-3]采用非

线性过程,直接在OFDM信号幅度峰值或附近采用非线性操作降低PAPR,但会带来信号畸变。编码法^[4-5]先将信号编码,再把幅度峰值低于最大期望幅度的码字集传输,该方法缺点是需要信息冗余用解编码复杂度高。概率法重点在于降低峰值出现的概率,这类方法主要包括:选择性映射法(selected mapping, SLM)^[6]和部分序列传输(PTS)^[7-9]。这类方法不受子载波数和星座调制方法的限制,降低了高PAPR传输信号出现的概率。而且该方法不会产生误码和波形失真,是一种比较有效地降低OFDM系统PAPR的方法。但是对于传统的遍历搜索PTS方法,计算复杂度将随着分组数M的增加而呈指数上升,当M比较大时,在实际的系统中已经不适合使用遍历搜索;传统PTS方法还需要传送额外的边带信息,以便在接收端恢复出原始信号,插入边带信息会降低整个系统的频谱利用率。

本文主要针对遗传算法(GA)^[10]与PTS相结合的

收稿日期: 2011-08-22; 修回日期: 2013-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(61001088); 高等学校博士学科点专项科研基金(2010018520007); 中央高校基本科研基金(ZYGX2012J141)

作者简介: 杨霖(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线与移动通信、现代通信中的信号处理等方面的研究。

降低PAPR的算法进行进一步研究, 提出了一种基于优选对的GA-PTS^[11-12]算法, 将其中的GA方法步骤进行改进, 获得低于传统GA-PTS方法的PAPR。

1 OFDM系统的PAPR定义

定义连续OFDM信号为:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \exp(j2\pi nt/T) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中, $x(t)$ 为快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transmitter, IFFT)后的输出信号; $X(n)$ 为第 n 个子载波上的调制符号, $n=0,1,\dots,N-1$; N 为系统正交子载波的个数; T 为一个OFDM符号的持续时间。

当所有子信道信号以峰值相加时, OFDM信号将产生最大峰值功率。峰均功率比(PAPR)定义为每帧OFDM信号的最大瞬时功率和同一信号平均功率之比:

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

式中, $|x(t)|^2$ 为信号功率; $E[|x(t)|^2]$ 为连续信号 $x(t)$ 的平均功率。

当对信号 $x(t)$ 以Nyquist采样率进行采样时, 可得到离散OFDM信号表示:

$$x(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp \left(j \frac{2\pi kn}{N} \right) \quad 0 \leq k < N \quad (3)$$

其采样频率为 N/T 。则相应的离散OFDM信号峰均功率比表示为:

$$\text{PAPR} = 10 \lg \left(\frac{\max \{ |x(k)|^2 \}}{E \{ |x_k|^2 \}} \right) \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (4)$$

式中, $|x(k)|^2$ 为信号功率; $E[|x(k)|^2]$ 为离散信号样 $x(k)$ 的平均功率。

如果信号按 $L(L$ 为整数)倍过采样进行采样时, 对应的时域信号可以表示为:

$$x'(k) = \frac{1}{\sqrt{LN}} \sum_{n=0}^{LN-1} X'(n) \exp \left(j \frac{2\pi nk}{LN} \right) \quad 0 \leq k < LN \quad (5)$$

式中, $X' = [X(0), \dots, X(N/2-1), \underbrace{0, \dots, 0}_{(L-1)N}, X(N/2), \dots, X(N-1)]^T$ 。

定义 OFDM 信号 PAPR 大于某一门限 PAPR_0 的互补累计分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF):

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

通常都采用CCDF衡量OFDM系统内的PAPR分布。

2 传统PTS方法

传统PTS算法的系统框图如图1所示。PTS算法是指在长度为 N 的信号 X 进行IFFT前将其分割成 M 个互不重叠的子向量块, 其中每个子向量长为 N , 子向量中不为零的数据为 N/M 个。PTS的子载波分割方式包括相邻分割, 随机分割和交织分割。由文献[7]中指出, 随机分割方法产生的信号PAPR低于其他两种分割方法, 因此本文选用随机分割。 M 个数据块通过IFFT变换转化为时域信号, 同一子向量中的每个子载波都乘以相同的相位旋转因子, 不同子向量的旋转因子 b_m 是统计独立的:

$$x' = \sum_{m=1}^M b_m \cdot \text{IFFT} \{ X_m \} = \sum_{m=1}^M b_m \cdot x_m \quad (7)$$

式中, $x_m = \text{IFFT} \{ X_m \}$ 为频域子块 X_m 对应的时域子块数据; $b_m = e^{j2\pi\omega/W}$, $\omega=0,1,\dots,W-1$, W 为使用的旋转相位的个数。

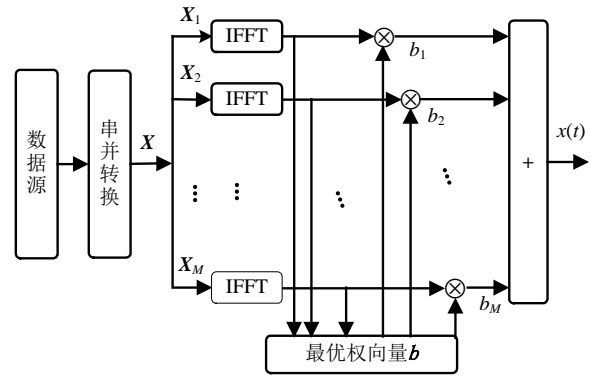


图1 传统PTS算法的系统框图

通过适当地选择相位因子 $\{b_m, m=1,2,\dots,M\}$, 使 x' 的信号峰值功率降低, 减小PTS子块合并后序列的峰均比。OFDM系统内的PAPR最优的权向量应满足:

$$\{b_1, b_2, \dots, b_M\} = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_M\}} \left(\max_{1 \leq n \leq LN} \left| \sum_{m=1}^M b_m \cdot x_m \right|^2 \right) \quad (8)$$

式中, $\arg \min(\cdot)$ 表示取得最小值所使用的判别条件。相位系数 b_m 的相位通常在离散集合中取值, 如果这个离散集合的元素个数为 W , 则利用穷尽计算法得到的相位系数的取值方式有 W^{M-1} 种, 优化一个符号的迭代次数随着分组数 M 呈指数增加, 计算复杂度高。

3 GA-PTS算法

GA-PTS是运用遗传算法作为选择方法来搜寻PTS中最优的相位因子, 以此降低OFDM系统的PAPR。与传统PTS方法相比, GA-PTS算法最大的

优点是在一定程度上改善了PTS方法中计算量非常大的缺点。

GA-PTS采用二进制向量代表染色体,每个染色体中的 $\log_2 W$ 个比特与相位因子 b_i 中旋转相位的二进制表示相对应。如 $W=4$ 时,对于一组相位因子 $\mathbf{b}=[+1,-1,+j,-j]$,染色体 $C=[00110110]$ 与 \mathbf{b} 是通过 $(+1 \mapsto 00), (-1 \mapsto 11), (+j \mapsto 01), (-j \mapsto 10)$ 对应关系一一映射的。

首先随机产生种群,将种群的每个染色体对应的相位因子与PTS序列相乘后计算系统的PAPR。种群中的每个染色体适应度可表示为:

$$F(x(t)) = \frac{1}{10 \lg \text{PAPR}(x(t))} \quad (9)$$

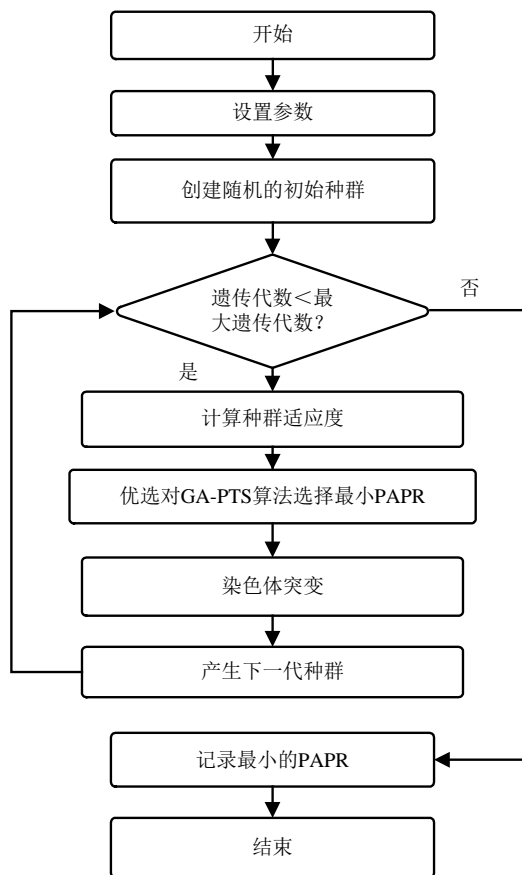


图2 优选对GA-PTS方法框图

求出每个染色体的适应度,根据适应度,采用轮盘赌法选择出生成下一代种群染色体的候选染色体。将候选染色体交叉、变异后即成为下一代种群的染色体。最大遗传代数迭代完毕后,选择出使PAPR最小的染色体组。关于传统GA-PTS算法详细步骤,可见文献[11-12]及其参考文献。

虽然传统GA-PTS算法可以有效降低PTS方法的计算复杂度,但也一定程度的降低了PTS方法的PAPR性能,针对如何进一步提高GA-PTS系统的

PAPR性能,本文提出了一种相位因子优选对的改进方法来改进GA-PTS方法中的PAPR。

4 相位因子优选对GA-PTS算法

基于相位因子优选对的GA-PTS算法的核心思想,是每一次遗传迭代过程中都用优选对方法代替GA算法中的赌轮盘选择法及染色体交叉,其余步骤与传统GA-PTS算法相似。本文提出的基于相位因子优选对GA-PTS算法基本框图如图2所示。优选对算法的原理如下:根据IFFT的线性变换性质可知,IFFT操作并不会改变传输信号功率的均值,即 $E\{|X(n)|^2\} = E\{|x(k)|^2\}$,其中 $X(n)$ 和 $x(k)$ 分别为频域信号和对应的时域采样信号, $E[\cdot]$ 为均值函数。而为了降低整个传输OFDM符号的PAPR值,只能通过减少式(2)中的分子,使 $\max\{|x(k)|^2\}$ 的值降低。另一方面,从式(7)中可以看出, M 个部分传输序列子块求和组成了整个时域信号 $x(k)$,实际上每个部分传输序列子块均存在一个PAPR值。本文提出的方法是依据具有低PAPR值的不同PTS子块序列求和有更大的概率获得具有低PAPR值的传输信号;优选对方法就是对相位因子向量作划分,选择能使子块有低PAPR值的相位因子分向量,再进行相位因子分向量组合、与PTS子块相乘求和。设GA算法中的种群数量为 P^2 ,假设第 g 代的第 i 个染色体对应的相位因子向量为 \mathbf{b}_i^g ,为 M 维向量,对应PTS方法中的分块数 M 。将 \mathbf{b}_i^g 划分为两个向量之和, $\mathbf{b}_i^g = \mathbf{b}_{i,1}^g + \mathbf{b}_{i,2}^g$,且 $\mathbf{b}_{i,1}^g \cap \mathbf{b}_{i,2}^g = 0$ 。 $\mathbf{b}_{i,1}^g$ 中一半元素是随机选取 \mathbf{b}_i^g 中的 $M/2$ 个元素,其余为0;而 $\mathbf{b}_{i,2}^g$ 中非0元素位置对应于 $\mathbf{b}_{i,1}^g$ 中0元素的位置,其对应于 \mathbf{b}_i^g 中除去 $\mathbf{b}_{i,1}^g$ 外剩余的 $M/2$ 个元素,并且 $\mathbf{b}_{i,2}^g$ 剩余元素对应位置为0。每一次迭代中划分 \mathbf{b}_i^g 为两个分向量时,非零元素的位置选取都是随机的。如 $W=4$ 时,假设 $\mathbf{b}_i^g = [+1,-1,+j,-j]$,随机选择 \mathbf{b}_i^g 中两个元素,第1、第3位元素,则 $\mathbf{b}_{i,1}^g$ 是 $[+1,0,+j,0]$, $\mathbf{b}_{i,2}^g$ 是 $[0,-1,0,-j]$ 。然后将式(7)改写为:

$$x(k) = \sum_{i=1}^M \mathbf{b}_{i,1}^g x_i(k) + \sum_{i=1}^M \mathbf{b}_{i,2}^g x_i(k) \quad (10)$$

分别计算并保存式(10)中 $\sum_{i=1}^M \mathbf{b}_{i,1}^g x_i(k)$ 和 $\sum_{i=1}^M \mathbf{b}_{i,2}^g x_i(k)$ 的PAPR。每一次迭代将种群中所有染色体所对应的相位因子向量都作如上所述的相位因子

对的划分, 并分别求出这两项的PAPR。第 g 代时, P^2 个相位因子向量组成 $P^2 \times M$ 相位因子矩阵 $\mathbf{B}^g = [\mathbf{b}_1^g, \dots, \mathbf{b}_i^g, \dots, \mathbf{b}_{P^2}^g]^T$, 由于相位因子向量的划分, \mathbf{B}^g 也形成相位因子划分矩阵 \mathbf{B}_1^g 和 \mathbf{B}_2^g 。从 \mathbf{B}_1^g 和 \mathbf{B}_2^g 中分别选出对应PAPR最小的 P 个相位因子向量 $\mathbf{b}_{i,1}^g$ 和 $\mathbf{b}_{k,2}^g$ ($1 \leq i, k \leq P^2$), P 对 $\mathbf{b}_{i,1}^g$ 和 $\mathbf{b}_{k,2}^g$ 即为优选对。将

每个 $\mathbf{b}_{i,1}^g$ 分别与另一组的 P 个 $\mathbf{b}_{k,2}^g$ 相加, 就可以获得新的 $P \times P = P^2$ 个相位因子向量, 组成新的 $P^2 \times M$ 相位因子矩阵 \mathbf{B}^{g+1} 。为方便说明, 举一个 $P=2$ 的优选对方法选择 \mathbf{B}^{g+1} 的图例, 如图3所示。然后用 \mathbf{B}^{g+1} 对应的染色体进行突变以及其余步骤的GA-PTS算法。

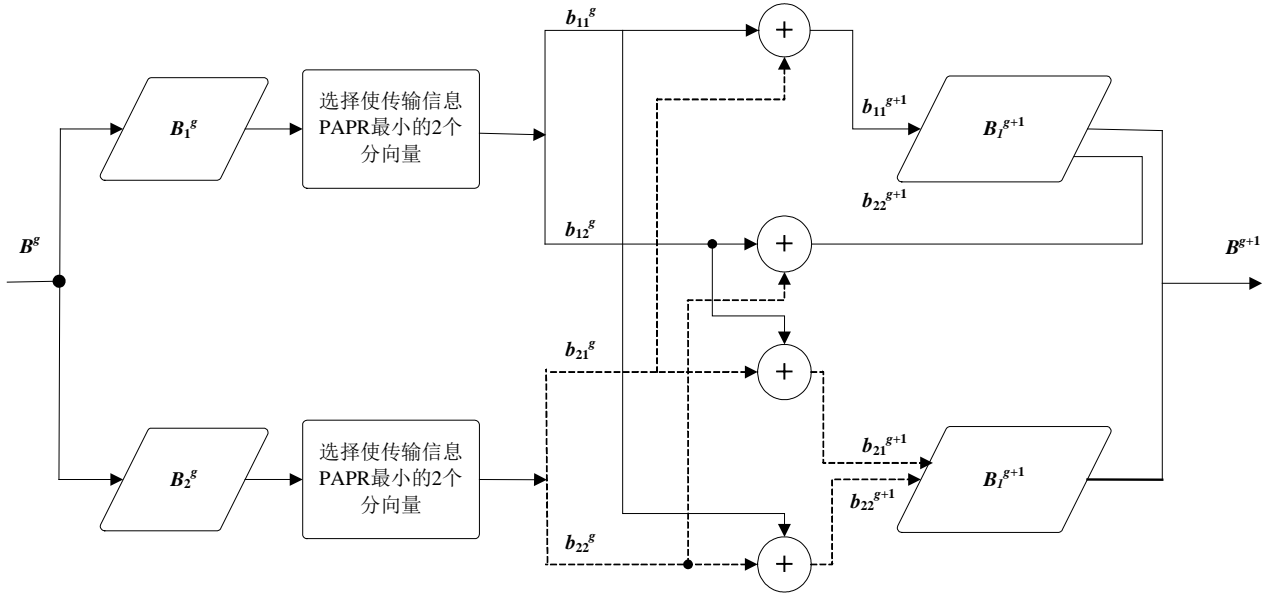


图3 最优相位因子矩阵的选择框图($P=2$)

优选对方法是本文在遗传算法的基础上得到的新算法。遗传算法有效性的理论依据为模式定理和积木块假设^[13]。模式定理保证了较优的模式(遗传算法的较优解)的样本呈指数级增长, 从而满足了寻找最优解的必要条件, 即遗传算法存在着寻找到全局最优解的可能性。积木块假设指出, 遗传算法具备寻找到全局最优解的能力。优选对算法基于自然选择的原则, 进一步利用适者生存、不适者淘汰的规律, 将相位因子作为父代进行下一代选择时, 先在父代间比较, 淘汰使OFDM信号PAPR较大的父代, 将适应度好的父代进行交叉变异。而遗传算法是将所有父代交叉后选择较好的下一代。优选对方法改变了传统GA中在一次迭代过程中每个父代基因只能使用一次的特点。

5 仿真与实验分析

首先分析并比较本文所提及的相位因子优选对GA和传统GA两种方法间的复杂度。

不失一般性, 以每代GA中的染色体个数 $P=16$ 为例。首先, 这两种GA方法都是优化PTS技术中的相位旋转因子, 因此, 它们都需要 $M=8$ 个IFFT操作。

其次, 在计算每个子代符号(即备选OFDM符号)的时候, 传统GA方法的主要复杂度是式(7)中的求和, 其复杂度是 $(M-1)LN$ 个复数加, 传统GA方法在每一代总的复杂度大概是 $(M-1)PLN$ 个复数加。对本文提出的相位因子优选对GA方法来说, 需要先分别计算式(10)右侧两项子块组合的和, 这两项的复杂度分别为 $(M/2-1)LN$, 其中 $M/2$ 表示系数 \mathbf{b}_i^g 中仅有 $M/2$ 个非0项; 然后分别找出这两项的最大值, 其复杂度为 LN ; 再找出 $\sqrt{P}=4$ 个优选对, 并用优选对方法对它们进行一一组合, 其复杂度为 PLN 。因此, 本文提出优选对方法在产生新子代符号的时, 总的复杂度为 $2P((M/2-1)LN+LN)+PLN=(M+1)PLN$ 。最后, 两种GA方法均需要求出当前最优序列的PAPR值。根据以上分析可知, 本文提出的优选对GA方法可以保持与原有GA方法大致相等的复杂度。

再验证本文所提出的相位因子优选对方法在降低系统PAPR上的性能。因为优选对GA-PTS方法与传统GA-PTS方法仅在父代选择和交叉这步有所区别, 这是优选对方法主要作用的环节, 所以本文剔除突变这一步骤, 选择较小的仿真参数, 仅就父代选择和交叉进行仿真。

OFDM系统的PAPR性能对比如图4所示。从图中可以看到，本文提出的优选对方法在第2代时的PAPR性能，已经比传统GA方法在第5代时的PAPR性能要好。由图4可见从迭代初期开始，优选对方法就体现出优于传统GA-PTS方法的性能，从而在一定程度上证明了提出新方法的可行性。

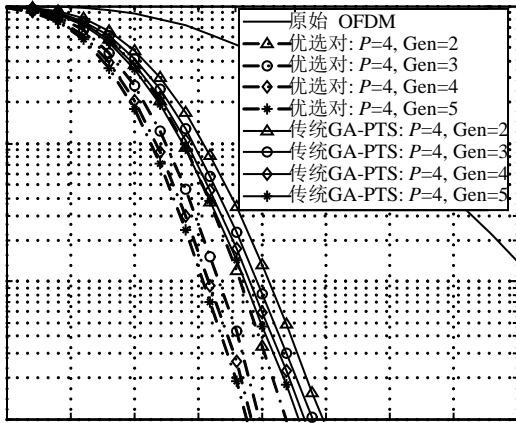


图4 优选对方法与GA方法对比验证图

然后验证本文提出的基于相位因子优选对的GA-PTS方法的PAPR性能，不同GA算法的部分仿真参数如表1所示。OFDM信号采用子载波 $N=128$ 的QPSK调制方式，相位因子 $b \in \{\pm 1, \pm j\}$ ($W=4$)，128个子载波被划分为8块，进行4倍过采样。每组仿真结果都采用 10^5 个随机生成的独立OFDM信号，不同方法的性能使用CCDF曲线进行描绘。

表1 优选对方法与GA-PTS方法参数

	优选对GA-PTS	传统GA-PTS
遗传代数	1, 5, 10, 20, 30	5, 10, 20
种群数	9, 16	16
交叉概率	-	1
交叉点	-	1
突变概率	0.05	0.05

仿真结果如图5所示，优选对GA-PTS方法随着遗传代数的增多，CCDF曲线逐渐降低，PAPR性能逐渐改善。但是随着遗传代数增加，曲线越来越接近，对比遗传代数20和遗传代数30的曲线可知，PAPR性能的改善接近相等，说明遗传代数为30时，优选对GA-PTS方法对OFDM的峰均比性能改善已经比较接近本方法在该条件下的极限，故在图6和图7的对比中，为减少计算量与计算时间，选择遗传代数为20，即可获得正确的比较结论。

为了比较本文提出的优选对GA-PTS算法在不同种群数 P 时的PAPR性能，仿真了 $P=9$ 和 $P=16$ 时

的CCDF曲线，结果如图6所示。详细对比数据如表2所示。

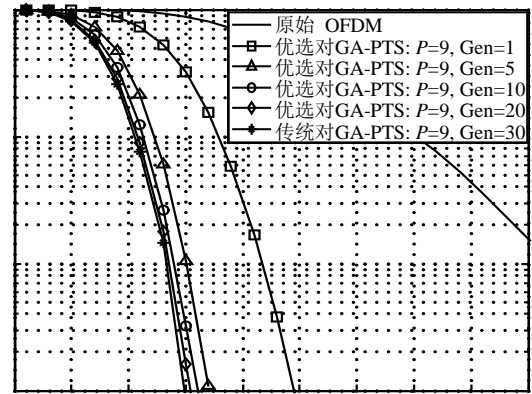


图5 优选对GA-PTS方法不同遗传代数曲线比较

由表2可以看到，在相同遗传代数时，种群数 $P=16$ 的PAPR性能均比 $P=9$ 时的PAPR性能优越。甚至当 $P=16$ ，遗传代数为5时的PAPR性能，也稍微优于 $P=9$ ，遗传代数为20时的PAPR性能，尽管使用到的搜索个数更多，搜索了 $9 \times 20 = 180$ 个体，而前者仅搜索了 $16 \times 5 = 80$ 个体，这主要是因为当种群数 P 较小时，遗传算法更容易陷入局部最优解。因此可以得出随着种群数的增多，优选对GA-PTS算法的峰均比抑制性能也有一定程度的增强。

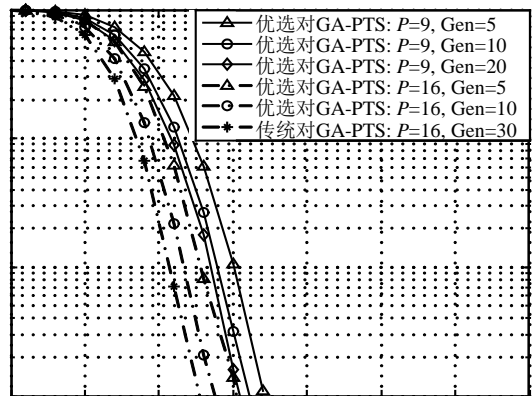


图6 优选对GA-PTS方法不同种群数曲线比较

表2 优选对GA-PTS方法不同种群数的PAPR性能 dB

Gen	$P=9$	$P=16$
5	7.23	7.00
10	7.10	6.88
20	7.05	6.80

图7为本文提出的基于相位因子优选对的GA-PTS算法在不同仿真参数下的PAPR性能，为了便于比较，图中也给出了原始OFDM和传统GA-PTS算法的PAPR性能曲线。本文提出的新GA-PTS算法

和传统GA-PTS算法对比原始OFDM信号性能, 都有很大改善。具体比较改进方法与传统GA-PTS方法的性能, 将优选对GA-PTS方法与传统GA-PTS方法在CCDF=10⁻³处的PAPR值列于表3中。由表3得出, 在CCDF=10⁻³处, 当总的遗传代数为5时, 优选对GA-PTS方法的PAPR比传统GA-PTS算法的PAPR优化了0.2dB; 当总的遗传代数为10时, 优选对GA-PTS方法的PAPR比传统GA-PTS算法的PAPR优化了0.22 dB; 当总的遗传代数为20时, 优选对GA-PTS方法的PAPR比传统GA-PTS算法的PAPR优化了0.22 dB。总体来说, 本文提出的GA-PTS算法比传统GA-PTS算法在PAPR性能上优化了大概0.2 dB。

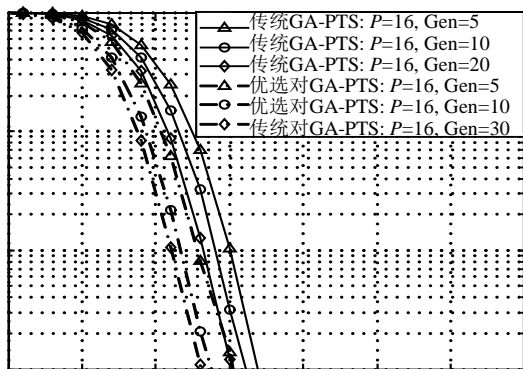


图7 优选对GA-PTS方法与传统GA-PTS方法比较

表3 优选对GA-PTS方法与传统GA-PTS方法PAPR对比 dB

Gen	传统GA-PTS方法	优选对GA-PTS方法
5	7.20	7.00
10	7.10	6.88
20	7.02	6.80

6 结束语

传统GA-PTS算法使用GA搜索算法寻找能降低信号PAPR的相位因子组合, 但GA方法容易陷入局部最优解, 从而影响整个算法抑制PAPR的能力。为了克服GA方法的不足, 本文在传统GA-PTS算法的基础上, 提出了一种基于相位因子优选对的GA-PTS优化算法, 通过对相位因子进一步寻优, 达到能够进一步降低OFDM信号的PAPR的目的。其原理是根据PTS方法中具有低PAPR值的子块求和有更大概率获得具有较低PAPR值的传输信号。通过仿真验证, 该算法对比原始OFDM信号的PAPR有3~4 dB的改善, 有, 对比传统GA-PTS算法有0.2 dB左右的PAPR性能改善。

参 考 文 献

- [1] 郑棣, 郭振民. 关于降低OFDM系统中峰均功率比技术的研究[J]. 现代电子技术, 2005, 23(28): 10-13.
ZHENG Di, GUO Zhen-min. Research on the techniques of reduction PAPR in OFDM system[J]. Modern Electronics Technique, 2005, 23(28): 10-13.
- [2] ARMSTRONG J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering[J]. Electronics Letters, 2002, 38(5): 246-247.
- [3] KIM H J, CHO S C, OH H S, et al. Adaptive clipping technique for reducing PAPR on OFDM systems[C]//2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. [S.l.]: IEEE, 2003.
- [4] WILKINSON T A, JONES A E. Minimisation of the peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes by block coding[C]//1995 IEEE 45th Vehicular Technology Conference. Chicago, IL, USA: IEEE, 1995.
- [5] Wulich D. Reduction of peak to mean ratio of multicarrier modulation using cyclic coding[J]. Electronics Letters, 1996, 5(32): 432-433.
- [6] MULLER S H, HUBER J B. OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequence[J]. Electronics Letters, 1997, 33(5): 368-369.
- [7] MULLER S H, HUBER J B. A comparison of peak power reduction scheme for OFDM[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. Phoenix, AZ: IEEE, 1997.
- [8] LEONARD J, CIMINI Jr, SOLLENBERGER N R. Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(3): 86-88.
- [9] YANG L, CHEN R S, SIU Y M, et al. PAPR reduction of an OFDM signal by use of PTS with low computational complexity[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2006, 52(1): 83-86.
- [10] TANG K S, MAN K F, KWONG S, et al. Genetic algorithms and their applications[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(6): 22-37.
- [11] KIM S S, KIM M J, GULLIVER T A. PAPR reduction of OFDM signals using genetic algorithm PTS technique[J]. IEICE TRANSACTIONS on Communications, 2008, E91-B(4): 1194-1197.
- [12] KIM S S, KIM M J, GULLIVER T A. A new PTS for PAPR reduction by local search in GA[C]//International Joint Conference on Neural Networks. Vancouver, BC: IEEE, 2006.
- [13] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial system: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. England: A Bradford Book Press, 1992: 1-200.

编辑 税红