

# OFDM 中基于粒子群优化的限幅算法

陈西宏, 刘 强, 胡茂凯

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘 要:**针对 OFDM 系统中峰值平均功率比(峰均比)偏高的问题,提出了一种基于粒子群优化的限幅算法。该算法利用粒子群算法优秀的搜索寻优能力来迭代计算最佳限幅门限,结合具有对峰均比控制能力强、实现简单等优点的限幅算法对采样序列进行限幅,通过搜索迭代、限幅、滤波等措施来寻找最优粒子,即在峰均比满足高于门限值限定概率的前提下实现系统最小峰均比的最佳限幅门限,以达到降低系统峰均比的目的。对比仿真了线性递减的惯性权重因子和固定惯性权重因子对系统误码率以及峰均比分布曲线的影响,仿真结果表明:相对于简单的限幅算法,该算法没有带来误码率的额外增加,而能在较低的信噪比时实现降低系统峰均比的目的,对于改善较低信噪比情况下的系统性能有着重要的现实意义。

**关键词:**正交频分复用;峰值平均功率比;粒子群优化;限幅

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.02.012

**中图分类号:** TN919 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)02-0052-05

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,因其极高的频谱利用率和优秀的抗干扰能力等特点已经广泛应用于数字音频广播(DAB)、数字视频广播(DVB)、非对称高比特率数字用户线(ADSL)等领域<sup>[1]</sup>。近年来,OFDM 技术在无线通信中的应用也越来越广泛,并将成为 B3G 和 4G 移动通信的关键技术之一。但 OFDM 系统存在的主要缺陷之一是峰值平均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)偏高,对发射机内放大器的线性度要求很高,这就可能造成信号的失真、畸变和系统性能恶化,此缺陷成为其更广泛实用化的一大障碍。针对此问题,国内外学者提出了许多降低 OFDM 峰均比的方法和技术,主要分为:① 信号畸变类技术,如限幅法<sup>[2-3]</sup>、峰值加窗法、压缩扩展法等;② 概率类技术,包括选择性映射(SLM)方法<sup>[4]</sup>、部分传输序列(PTS)方法等<sup>[5-6]</sup>;③ 信号编码类技术,包括分组码、格雷码和雷德密勒码(Reed-Muller)<sup>[7-8]</sup>等。每种方法都有各自的优缺点,其中限幅法(Clippling)以较低的实现复杂度得到广泛关注,其基本思想是通过预先设定了峰值门限的限幅器消除高于门限值的信号幅度来降低峰均比,但限幅是一个非线性的处理过程,在降低 OFDM 信号峰均比的同时,引入了限幅噪声,限幅噪声会对 OFDM 信号造成干扰,影响传输性能。

文中提出了一种基于粒子群优化的限幅算法,通过粒子群算法优秀的搜索能力,寻找最佳的门限值  $T_{th}$  来降低系统峰均比,通过搜索迭代、限幅、滤波等措施来寻找最优粒子即最佳限幅门限,达到降低系统峰均比的目的。同时对限幅后的序列进行滤波以降低由于限幅带来的限幅噪声的影响,仿真表明,相对于单纯的限幅算法,此方法能明显地降低 OFDM 系统峰均比。

## 1 峰均比及限幅

### 1.1 峰均比和互补累积分布函数

\* 收稿日期:2009-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971118)

作者简介:陈西宏(1961-),男,陕西蓝田人,教授,博士生导师,主要从事导弹工程和通信技术研究。

E-mail:dreamlq@163.com

设 OFDM 系统包含  $N$  路子载波, 发送的数据符号向量表示为  $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{N-1}]^T$ , 其中  $\mathbf{X}_i, i = 0, 1, \dots, N-1$ , 为彼此独立的数据符号, 则经过 OFDM 调制 (IFFT) 后的时域基带信号为:

$$x(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi\Delta f_n t}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中:  $x(t)$  为调制后的时域连续信号;  $T$  为输入符号的周期;  $\Delta f_n$  为第  $n$  个子载波间隔, 各子载波间隔相等; 为保证各子载波间相互正交, 故  $\Delta f = 1/NT$ ,  $NT$  为有效数据块的长度。峰均比定义为信号峰值功率和平均功率之比:

$$\text{PAPR} = 10 \lg \frac{\max_{0 \leq t \leq NT-1} \{|x(t)|^2\}}{E\{|x(t)|^2\}} \quad (2)$$

式中  $E(\cdot)$  为数学期望。

用 PAPR 公式来表征 OFDM 信号不具有实际意义, 因为测量出 OFDM 信号峰值功率概率很小, 而测量其信号峰值统计分布情况具有理论和实际价值。通常, 采用峰均比的互补累积分布函数<sup>[9]</sup> (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF) 来衡量峰均比的下降程度, CCDF 表示数据块的峰均比超过某一门限值  $T_{th}$  的概率, 则:

$$F(T_{th}) = 1 - \exp(-T_{th}) \quad (3)$$

若 OFDM 符号周期内  $N$  个采样值之间互不相关, 则在 OFDM 符号周期内每个采样值的峰均比都大于门限值  $T_{th}$  的概率, 则该符号周期内的 CCDF 用式(4)表示:

$$P(\text{PAPR} > T_{th}) = 1 - P(\text{PAPR} \leq T_{th}) = 1 - (1 - \exp(-T_{th}))^N \quad (4)$$

## 1.2 限幅算法

限幅的基本原理是将输入数据通过一个限幅器使其幅度限定在设定值之内, 设输入的数据流经过串/并变换、调制 (IFFT) 后的输出信号为:

$$x_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi nk/N}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (5)$$

此信号经过限幅器后输出为:

$$\tilde{x}_k = \begin{cases} x_k, & |x_k| \leq T_{th} \\ T_{th} e^{j\varphi(x_k)}, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\varphi(x_k)$  为信号  $x_k$  的相位;  $T_{th}$  为限幅幅度。

## 2 基于粒子群优化的限幅算法

### 2.1 粒子群算法

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出的一种群智能进化计算方法<sup>[10]</sup>。SHI 和 Eberhart 随后对该算法进行修正, 引入惯性权重因子  $\omega$ , 并提出在进化过程中动态调整惯性权重以平衡收敛的全局性和收敛速度, 形成了标准 PSO 算法<sup>[11]</sup>。

标准 PSO 算法采用速度-位置搜索模型, 每个粒子代表空间中的一个候选解, 粒子在空间以一定的速度飞行。粒子  $i$  在  $N$  维空间的位置表示为矢量  $\Xi_i = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ , 飞行速度表示为矢量  $\mathbf{V}_i = (v_1, v_2, \dots, v_N)$ 。每个粒子都有一个由目标函数决定的适应值 (Fitness Value), 并且知道自己到目前为止发现的个人最优位置 (pbest) 和现在的位置, 每个粒子还知道到目前为止整个群体中所有粒子发现的最优位置 (gbest 为 pbest 中的最优值), 即全局最优位置, 此即粒子同伴的经验, 粒子就是通过自己的经验和同伴中最好的经验来决定下一步的运动。

PSO 初始化为一群随机粒子, 然后通过迭代找到最优解。在每一次的迭代中, 粒子通过跟踪 2 个“极值” (pbest, gbest) 来更新自己。在找到这 2 个最优值后, 粒子通过下面的公式来更新自己的速度和位置。

$$\mathbf{V}_i = \omega \times \mathbf{V}_i + c_1 \times \text{rand}_1() \times (\text{pbest}_i - x_i) + c_2 \times \text{rand}_2() \times (\text{gbest}_i - x_i) \quad (7)$$

$$\Xi_i = \Xi_i + \mathbf{V}_i \quad (8)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, m$ , 其中  $m$  是该群体中粒子的总数;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子, 代表将每个粒子推向 pbest 和 gbest 位置的统计加速项的权值, 一般取常数。

初始时,SHI 将  $\omega$  取为常数,后来实验发现,动态  $\omega$  能够获得比固定值更好的寻优结果。动态  $\omega$  可以在 PSO 搜索过程中线性变化,也可根据 PSO 性能的某个测度函数动态改变。

$$\omega = (\omega_{\text{ini}} - \omega_{\text{end}})(G_k - g)/G_k + \omega_{\text{end}} \quad (9)$$

式中: $G_k$  为最大进化代数; $g$  为当前迭代次数; $\omega_{\text{ini}}$  为初始惯性权值; $\omega_{\text{end}}$  为迭代到最大代数时的惯性权值。

目前,SHI 建议的线性递减权值(Linearly Decreasing Weight, LDW)策略采用较多。

## 2.2 粒子群优化的限幅算法

文中采用粒子群优化算法和基本限幅算法相结合的方法来实现降低系统峰均比的目的,其实现流程框图见图 1。

OFDM 序列经过串/并变换、IFFT 调制、循环前缀(Cyclic Prefix, CP)的加入等步骤后,进入限幅模块,通过本文算法寻找最优限幅门限,得到满足 CCDF 指标要求的该最佳限幅门限下系统最小的峰均比,从而达到降低系统 PAPR 的目的。

本文算法中,先初始化一群粒子,将各子载波的峰均比分别作为限幅门限  $T_{\text{th}}$ ,根据限幅算法计算每个粒子适应度,即各门限  $T_{\text{th}}$  下适应值——限幅后峰均比值大于门限值的概率,即 CCDF 值,从中选择一个最优粒子,即在 CCDF 较小的情况下,使系统具有最小 PAPR 值的粒子——限幅门限值,作为当前的全局最优值,然后根据式(7)和式(8)的进化规则生成下一代粒子,根据限幅原理对序列重新进行限幅处理,计算此时的适应度即 CCDF 值,并更新全局最优值,如此迭代计算,粒子不断向最优个体——最佳限幅门限进化,直到满足预先设置的 CCDF 指标要求为止。算法具体实施步骤如下:

**步骤 1** 初始化一群粒子(设种群粒子数和子载波数相等),将 OFDM 符号周期内的各子载波的峰均比设置为粒子的初始位置,分别作为限幅过程的第一次迭代限幅门限值  $T_{\text{th}}$ ;

**步骤 2** 计算每个粒子的适应度,即每个限幅门限  $T_{\text{th}}$  下的 CCDF 值;

**步骤 3** 对该群粒子,即每个限幅门限,将其适应值,即该门限下的 CCDF 值,与其经过的最好位置  $p_{\text{best}}$ ,即所经路径 CCDF 值中最小者作比较,如果较好,则将其作为当前的局部最优位置  $p_{\text{best}}$ ;

**步骤 4** 对该群粒子,将其适应值与其经过的最好位置  $g_{\text{best}}$ ,即所有粒子所经路径的 CCDF 值中最小 CCDF 值作比较,如果较好,则将其作为当前的全局最优位置  $g_{\text{best}}$ ;

**步骤 5** 根据式(7)、式(8)调整粒子速度和位置,即调整限幅门限值,生成下一代粒子;

**步骤 6** 若满足预先设定的 CCDF 指标要求则结束迭代过程,输出最优粒子,即最优限幅门限  $T_{\text{th}}$ ,否则转步骤 2 继续上述步骤,再次进行限幅处理。

限幅是一个非线性过程,将导致严重的带外干扰和带内噪声,因此须对限幅后的序列进行滤波以降低由于限幅带来影响<sup>[1]</sup>。

## 3 仿真及分析

文中对误码率和 CCDF 曲线进行了仿真分析,其基本设置为:初始学习因子  $c_1 = c_2 = 2$ ;OFDM 子载波数为  $N = 48$ ,CP 长度为  $16 \mu\text{s}$ ,最大迭代次数为 50 次。仿真中,直接限幅的限幅门限设置为各子载波峰均比的均值。根据线性递减权值(LDW)策略,结合式(9),根据经验和实验验证,设初始惯性权值  $\omega_{\text{ini}} = 0.9$ ,迭代到最大代数时的惯性权值  $\omega_{\text{end}} = 0.1$ 。

仿真中分别采用了固定惯性权值( $\omega = 0.9$ ,适当增强粒子的全局寻优能力)、动态惯性权重因子 LDW 方案,对系统的 BER 和 CCDF 曲线与直接限幅算法进行了对比仿真,见图 2 和图 3。由图 2 可知,相对于直接限幅算法,文中算法没有带来系统误码率的额外增加,其中  $\omega = 0.9$  时系统误码率和直接限幅算法相当,LDW 方案在 SNR = 10 dB 时,误码率性能稍优于上述二者;由图 3 可知,本文算法较直接限幅算法,明显降低

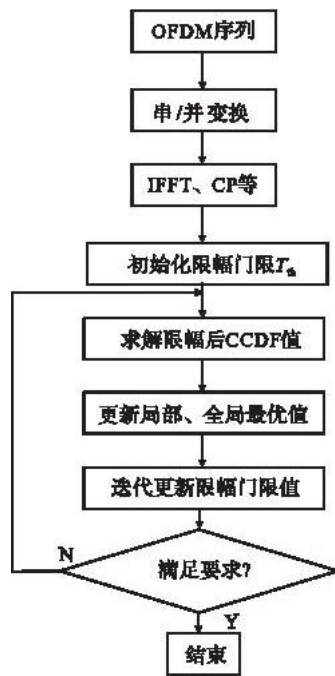


图 1 基于粒子群优化的限幅算法

Fig. 1 Clipping algorithm based on PSO

了系统峰均比:对于同一 CCDF 值,如  $CCDF = 10^{-3}$  时,  $PAPR_{\text{限幅}} \approx 10.5 \text{ dB}$ ,  $PAPR_{\omega=0.9} \approx 7 \text{ dB}$ ,  $PAPR_{\text{LDW}} \approx 6.5 \text{ dB}$ ,较直接限幅方案,采用  $\omega = 0.9$  固定惯性权值方案时系统 PAPR 下降了约 3.5 dB,采用动态惯性权重因子 LDW 方案时系统 PAPR 下降了约 4 dB;对于同一 PAPR 值,如  $PAPR = 6.5 \text{ dB}$  时,  $CCDF_{\text{限幅}} \approx 10^0$ ,  $CCDF_{\omega=0.9} \approx 10^{-1}$ ,  $CCDF_{\text{LDW}} \approx 10^{-3}$ ,可知 LDW 方案很好地减少了出现高于门限值峰均比的概率,有利于改善系统性能。

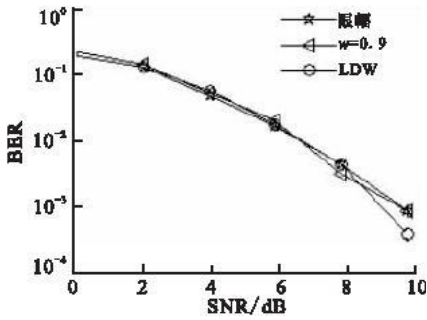


图 2 不同算法下误码性能对比

Fig. 2 BER comparisons in different algorithms

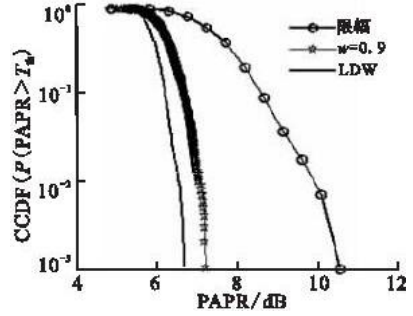


图 3 不同算法下 CCDF 曲线

Fig. 3 CCDF in different algorithms

限幅门限的设置将直接影响峰均比的大小以及 CCDF 值的高低,门限设置较高,大部分的高幅值分量仍能通过门限,此时 CCDF 值相对较低,峰均比仍然较高,不能达到降低峰均比的目的;而门限设置较低时,大部分的高幅值分量将被限幅,此时峰均比将大大降低,却带来 CCDF 值的增加。因而,限幅算法中,峰均比和 CCDF 分布间存在着矛盾,选择指标时需折衷考虑。采用本文算法的 LDW 方案时,在保证 CCDF 不大于  $10^{-3}$  的前提下,寻求最佳限幅门限下系统峰均比最小,通过 MATLAB 仿真,其数据见表 1。由表 1 可知,在满足 CCDF 指标要求下,最佳限幅门限为 6.338 3 dB。

表 1 限幅门限仿真结果

Tab.1 Clipping threshold simulation results

迭代次数	1	5	10	20	30	50
CCDF	1	0.99	0.899	0.801	0.499	0.001
PAPR/dB	4.485 8	4.732 9	5.182 7	5.336 6	5.583 2	6.338 3

## 4 结束语

本文针对 OFDM 峰均比较高的问题,综合粒子群优化算法和限幅算法的优点,提出了一种基于粒子群优化的限幅算法,对比仿真了惯性权重因子为固定值和线性递减权值 LDW 时对于误码率和 CCDF 分布曲线的影响,与单纯限幅算法相比,从仿真分析可以得出,在满足 CCDF 指标要求的前提下,文中算法将系统峰均比降低了 3dB - 4dB,LDW 方案较固定惯性权重因子方案进一步降低了系统的峰均比,有利于系统性能的进一步提升。

### 参考文献:

[ 1 ] 王文博,郑侃. 宽带无线电通信 OFDM 技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.  
WANG Wenbo, ZHENG Kan. OFDM in the Broad Band Wireless Communication[M]. Beijing: The People's Post and Telecom Press, 2007. (in Chinese)

[ 2 ] WANG L, TELLAMBURA C. A Simplified Clipping and Filtering Technique for PAR Reduction in OFDM Systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(6): 453 - 456.

[ 3 ] OJIMA M, HATTORIT. PAPR Reduction Method Using Clipping and Peak - windowing in CI/OFDM System[C]// Vehicular Technology Conference. Baltimore: [s. n.], 2007: 1356 - 1360.

[ 4 ] CHEN H S, LIANG H Y. Combined Selective Mapping and Binary Cyclic Codes for PAPR Reduction in OFDM Systems[J]. IEEE Trans Wireless Communication, 2007, 6(10): 3524 - 3528.

[ 5 ] Yang L, Chen R S. PAPR Reduction of An OFDM Signal by Use of PTS with Low Computational Complexity[J]. IEEE Trans-

actions on Broadcasting,2005,52(1):83-86.

- [ 6 ] 刘斌,陈西宏,邓蕴昊. OFDM 中基于粒子群优化的 PTS 相位因子优选算法[J]. 电测与仪表,2008,45(7):33-36.  
LIU Bin, CHEN Xihong, DENG Yunhao. An Optimal Phase-factor Selection Algorithm for PTS Based on PSO in OFDM [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(7):33-36. (in Chinese)
- [ 7 ] Paterson Kenneth G. Generalized Reed-Muller Codes and Power Control in OFDM Modulation [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2000, 46(1):104-120.
- [ 8 ] CHEN H S, LIANG H Y. PAPR Reduction of OFDM Signals Using partial Transmit Sequences and Reed-Muller Codes[J]. IEEE Commun Lett, 2007, 11(6):528-530.
- [ 9 ] Muller S H, Huber J B. A Comparison of Peak Power Reduction Schemes for OFDM [J]. IEEE GLOBECOM'97, 1997, 1:3-8.
- [ 10 ] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [C]//Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks. Perth:IEEE Press,1995:1942-1948.
- [ 11 ] SHI Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]//IEEE World Congress on Computational Intelligence. Indianapolis:IEEE Press,1998:69-73.

(编辑:徐楠楠)

## A Clipping Algorithm Based on PSO in OFDM

CHEN Xi-hong, LIU Qiang, HU Mao-kai

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

**Abstract:** As to the high Peak to Average Power Ratio (PAPR) issue in OFDM system, the paper has proposed a clipping algorithm based on the Particle Swarm Optimization (PSO). The algorithm takes advantage of the splendid searching ability of the PSO to calculate the best threshold and takes advantages of strong controlling ability and easy implementation of the clipping to clip the signal sequences. It takes the steps of iterative searching, clipping, filtering etc. to search the best particle, i. e. the excellent threshold to obtain the lowest PAPR with the precondition of the set CCDF, achieving the target of reducing the system PAPR. It presents comparisons of BER and CCDF between the linearly decreasing weight (LDW) and fixed inertia weight. The simulations show that, compared with the simple clipping algorithm, by using the proposed algorithm no extra BER is brought but the target of reducing PAPR in the low SNR area is achieved, so the proposed algorithm is of vital significance to improving the performance of the whole system.

**Key words:** OFDM; PAPR; PSO; clipping