

# 基于子载波加权的峰均比与带外辐射联合降低方法

李庆, 胡捍英

(信息工程大学 通信工程系, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 针对 OFDM 系统中 PAPR 与 OBP 的降低互相矛盾的问题, 提出了一种新的基于子载波加权的联合优化方法。该方法将符号数据与最优加权向量相乘达到同时降低系统 PAPR 与 OBP 的目的; 为降低计算复杂度, 利用改进的遗传算法求解最优加权向量。新方法频谱效率高, 且无需发送额外信息, 并可根据当前通信环境, 通过改变折衷系数实现对 PAPR 与 OBP 降低程度的灵活控制。仿真结果表明, 与采用两步优化降低 PAPR 与 OBP 的方法相比, 该方法能更有效地降低 OFDM 系统的 PAPR 与 OBP, 且计算复杂度低, 实现十分简单, 具有很强的实用性。

**关键词:** OFDM; 联合降低; 子载波加权; 遗传算法; 峰均功率比; 带外辐射功率

中图分类号: TN911.7

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)06-0150-07

## Joint reduction of peak-to-average power ratio and out-of-band power based on subcarrier weighting in OFDM systems

LI Qing, HU Han-ying

(Communication Engineering Department, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Considering the conflict of PAPR and OBP reductions in OFDM systems, a new method based on subcarrier weighting was proposed for the joint reduction. The symbols on subcarriers were multiplied by optimal weighting vector to reduce PAPR and OBP jointly, and an improved GA was used to calculate the optimal weighting vector for lower complexity. It was more effective in spectrum utility and did not need any transmission of side information. Furthermore, with trade-off parameter, it offered more flexibility to control the reduction by changing the relative weighting of the two optimization criteria. The simulation results indicate that, compared with a system that performs two separate optimization steps, the proposed method can significantly enhance the amount of PAPR and OBP reduction with lower computation complexity. It is simple to implement, which makes it very practical.

**Key words:** OFDM; joint reduction; subcarrier weighting; genetic algorithm; PAPR; out-of-band power

### 1 引言

正交频分复用(OFDM)是一种多载波调制技术, 由于其具有频带利用率高、抗多径衰落能力强等优点, 近年来, 越来越多地引起了人们的关注, 并得到了广泛的应用。传统的 OFDM 系统具有 2

个显著的问题。

首先, OFDM 系统具有较高的峰均功率比(PAPR, peak-to-average power ratio)<sup>[1]</sup>, 其主要有以下 2 方面的不利影响: 峰均比越高, 则信号动态范围越大, 对数/模转换器精度要求也越高, 从而导致设备成本的增加; 从功率转换的角度考虑, 峰

收稿日期: 2011-09-29; 修回日期: 2012-03-27

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX03003-007)

**Foundation Item:** The National Science and Technology Major Project (2009ZX03003-007)

均比高的射频信号在通过功率放大器等非线性设备时，会引入失真，例如严重的带内失真和带外辐射，这将恶化误码率性能并引入子载波间干扰。对于 PAPR 的降低，很多学者提出了一些有效的方法，主要有以下 3 类：第 1 类是预畸变技术<sup>[2-4]</sup>，该类技术会造成 BER 性能严重下降并导致带外辐射功率增加；第 2 类是编码技术<sup>[5-7]</sup>，该类技术为线性技术，克服了第 1 类方法的缺点，不会使信号产生畸变，但会增加系统带宽，降低了信息速率，且编解码及计算复杂度高，只适用于子载波较少的情况；第 3 类是统计概率类方法<sup>[8-13]</sup>，如选择性映射（SLM）和部分传输序列（PTS）等，这类方法效果好，但一般具有较高的运算复杂度，且需要向接收端发送额外的信息，降低了频谱效率。文献[14]提出了通过子载波加权(SW, subcarrier weighting)降低 PAPR 的方法，该方法能有效降低 OFDM 系统的 PAPR，频谱效率高，计算复杂度低且实现简单。

OFDM 系统的另一个缺点是由于子载波频域波形的旁瓣较大而引起较高的带外辐射功率(OBP, out-of-band power)<sup>[15,16]</sup>，这将导致系统频谱利用率的下降并对相邻系统或信道造成严重的干扰。例如，认知网络中采用 OFDMA 传输方案的认知用户会对相邻频段的注册用户造成干扰，使注册用户的子载波之间丧失正交性，从而带来多址干扰(MAI, multiple access interference)以及严重的时频域同步问题。而降低信号的 OBP 可以显著减小多址干扰，提升系统性能。目前降低 OBP 的最具代表性的方法主要有加窗<sup>[16]</sup>、插入抵消子载波(CC, cancellation carriers)<sup>[17,18]</sup>以及子载波加权法<sup>[19]</sup>等。加窗会引起时域信号扩展，CC 法占用数据子载波，且需告知接收端 CC 占用的子载波，导致系统容量下降和频谱利用率的降低。而子载波加权法能有效降低 OBP，且无需向接收端发送额外的信息，频谱利

用率高。

目前的算法均是单纯地对 PAPR 或 OBP 进行优化降低，且优化过程分为先对一个目标进行降低，然后再对另一个目标进行降低两步。研究过程中发现，PAPR 与 OBP 的降低是互相冲突的，任何一方的降低将会导致另一方的升高，从而导致整体优化性能的下降。对此，本文提出基于子载波加权对 OFDM 系统的 PAPR 和 OBP 进行联合优化降低的方法 (SW-JR, subcarrier weighting based joint reduction)。PAPR 与 OBP 的联合降低属于带约束的多目标优化问题，遗传算法 (GA) 的并行特性和启发式搜索非常适用于求解该类问题，且具有简单、快速、稳健的特点。本文应用改进的遗传算法求解最优加权向量，可以迅速收敛到全局近似最优解，大大降低了计算的复杂度。

文中对基于 SW 的 PAPR 与 OBP 联合降低算法的性能进行了仿真分析，并采取分两步分别对 PAPR 和 OBP 降低的系统性能进行了比较。仿真结果表明，联合优化方法能够更有效地降低 OFDM 系统的 PAPR 和 OBP，且可以通过调整折衷参数灵活地控制系统性能，使其更好地适应当前通信环境。比如在 OFDMA 系统中，距基站较近的终端发射功率较小，此时应该对折衷参数进行调整，使其更偏重于 OBP 的降低。此外，子载波加权法由于不需要占用子载波，频谱利用率高，且无需发送额外的信息，计算复杂度低，实现简单，成本低，具有很强的实用性。

## 2 系统模型

考虑一个具有  $N_c$  个子载波的 OFDM 系统，如图 1 所示。

输入比特流经过符号映射 (MPSK 或 MQAM) 与串并转换后转换为复值的数据符号向量

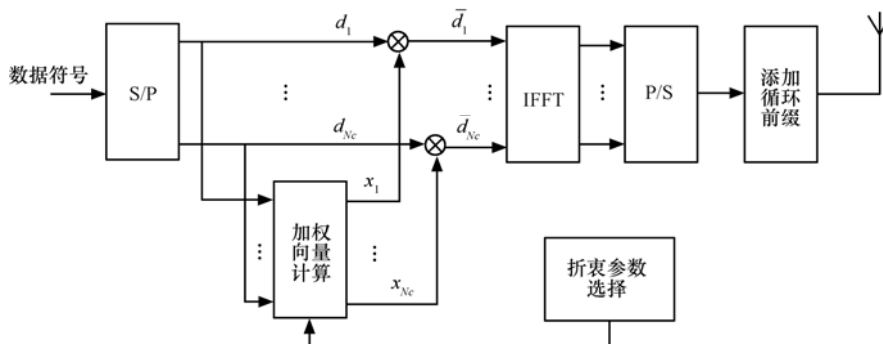


图 1 联合优化 OFDM 系统框

$\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_{N_c}]^T$ ，并进入加权向量计算单元。加权向量计算单元根据输入数据符号向量  $\mathbf{d}$  及折衷参数，应用遗传算法计算出应用于当前 OFDM 符号的最优加权向量  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N_c}]^T$ ，然后将加权向量与原符号向量相乘生成新的加权符号向量  $\bar{\mathbf{d}} = [\bar{d}_1, \bar{d}_2, \dots, \bar{d}_{N_c}]^T$ ，即

$$\bar{d}_n = x_n d_n, n = 1, 2, \dots, N_c \quad (1)$$

$\bar{\mathbf{d}}$  通过 IFFT 调制到  $N_c$  个子载波上，最后进行串转换和添加循环前缀。

### 3 PAPR 与 OBP 的降低方法

#### 3.1 PAPR 的降低方法

为了更准确地描述信号在连续时域中的峰值，需要对时域信号进行过采样，根据文献[20]，过采样因子  $L = 4$  时即可满足要求，此时 IFFT 矩阵  $\mathbf{Q} \in \mathbf{X}^{LN_c \times N_c}$  中的元素可以表示为

$$Q_{n,k} = \frac{1}{N_c} \exp\left(2\pi j \frac{nk}{LN_c}\right), 0 \leq n \leq LN_c - 1, k \in K$$

于是，经过子载波加权后，OFDM 的发送信号可以表示为

$$\mathbf{s} = \mathbf{Q}(\mathbf{x}_{PAPR} \mathbf{d}) \quad (2)$$

其中， $\mathbf{d}$  为子载波上的数据符号向量， $\mathbf{x}_{PAPR}$  为该 OFDM 符号的加权向量， $(\cdot)$  表示 2 个向量的对应元素相乘。根据 OFDM 信号峰均比的定义<sup>[1]</sup>：

$$PAPR = \frac{\|\mathbf{Q}(\mathbf{x}_{PAPR} \mathbf{d})\|_{\infty}^2}{\frac{1}{LN_c} \|\mathbf{Q}(\mathbf{x}_{PAPR} \mathbf{d})\|_2^2} \quad (3)$$

通过子载波加权降低峰均比的方法就是对于每一个 OFDM 符号的数据向量  $\mathbf{d}$ ，寻找最优的加权向量  $\tilde{\mathbf{x}}_{PAPR}$ ，使得式(3)定义的峰均比最小，即

$$\tilde{\mathbf{x}}_{PAPR} = \underset{\mathbf{x}_{PAPR}}{\text{minimize}} PAPR \quad (4)$$

#### 3.2 OBP 的降低方法

OFDM 子载波在时域表示为不归零矩形信号，因此子载波的频域表达式为

$$S_n(v) = \frac{\sin(\pi(v-v_n))}{\pi(v-v_n)}, n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中， $v$  为归一化信号频率，

$$v = (f - f_0)T \quad (6)$$

其中， $T$  为 OFDM 符号周期， $f$  和  $f_0$  分别代表频率和中心频率， $v_n$  为第  $n$  个子载波的归一化频率。因此，带外辐射可以表示为

$$OBP = \sum_{v_i \in \zeta} \left| \sum_{n \in N} d_n S_n(v_i) \right|^2 = \left\| \sum_{n \in N} d_n S_n(\zeta) \right\|^2 \quad (7)$$

其中， $S_n(\zeta) = [S_n(v_1), S_n(v_2), \dots, S_n(v_V)]^T$ ，令  $\mathbf{S} = [S_1(\zeta), S_2(\zeta), \dots, S_n(\zeta)]^T$ ，则子载波加权降低 OBP 的方法可以表示为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_{OBP} &= \underset{\mathbf{x}_{OBP}}{\text{minimize}} OBP \\ &= \underset{\mathbf{x}_{OBP}}{\text{minimize}} \|\mathbf{S}(\mathbf{x}_{OBP} \mathbf{d})\|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

#### 3.3 PAPR 与 OBP 的联合降低方法

通过式(4)和式(8)分别得到了降低峰均比和带外辐射的优化目标，将二者结合，可以得到联合降低峰均比与带外辐射的目标函数为

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_{JOINT}) = \left( \frac{\|\mathbf{Q}(\mathbf{x}_{JOINT} \cdot \mathbf{d})\|_{\infty}^2}{\frac{1}{LN_c} \|\mathbf{Q}(\mathbf{x}_{JOINT} \cdot \mathbf{d})\|_2^2}, \|\mathbf{S}(\mathbf{x}_{JOINT} \cdot \mathbf{d})\|^2 \right) \quad (9)$$

加权向量  $\mathbf{x}_{JOINT}$  应满足 2 个约束条件：

1) 加权后数据符号的功率应当与加权前原数据符号的功率相等，即

$$\|\bar{\mathbf{d}}\|^2 = \|\mathbf{d}\|^2 \quad (10)$$

对于 MPSK 调制方式来说，式(10)等价于  $\|\mathbf{x}\|^2 = N_c$ ；

2) 为保证接收端对数据符号的正确解调，各子载波上的发送功率应当保证在一定的范围之内，即要求

$$0 < x_{\min} \leq x_n \leq x_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, x_n \in R, n = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

使得加权后的符号  $\bar{d}_n$  与加权前原符号具有相同的判决域，这样，发送端不需要向接收端发送额外的用于解调的信令信息，提高了频谱利用率。对于 MPSK 方式来说，只要  $x_{\min} > 0$  即可满足，同时为保证  $\|\mathbf{x}\|^2 = N_c$ ，应令  $0 < x_{\min} < 1$ 。

综上所述，式(9)和式(11)构成了带约束的多目标优化问题。一般而言，上述问题不存在一个最优解，使得 PAPR 与 OBP 同时达到最小。本文通过权重系数法求解上述问题的帕里托最优解集 (pareto

optimal set), 并从中选取最符合要求的解作为当前 OFDM 符号的加权向量。因此, PAPR 与 OBP 的联合优化问题可以表示为

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{JOINT}} = \underset{\mathbf{x}_{\text{JOINT}}}{\text{minimize}} \begin{pmatrix} (1-\lambda)^T \frac{\|\mathbf{Q}(\mathbf{x}_{\text{JOINT}}\mathbf{d})\|_{\infty}^2}{\frac{1}{LN_c}\|\mathbf{Q}(\mathbf{x}_{\text{JOINT}}\mathbf{d})\|_2^2} \\ \lambda \frac{\|\mathbf{S}(\mathbf{x}_{\text{JOINT}}\mathbf{d})\|^2}{\frac{1}{LN_c}\|\mathbf{Q}(\mathbf{x}_{\text{JOINT}}\mathbf{d})\|_2^2} \end{pmatrix}$$

$$s.t.: \|\tilde{\mathbf{d}}\|^2 = \|\mathbf{d}\|^2$$

$$0 < x_{\min} \leq x_n \leq x_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, x_n \in R \quad (12)$$

其中, 系数  $\lambda$  为折衷参数, 可以根据实际情况改变  $\lambda$ , 从而得到适应当前环境的最优加权向量。

#### 4 基于改进遗传算法的最优加权向量求解

对于式(12)无法得到  $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{JOINT}}$  的闭式解。对此类问题的求解一般是采用优化方法(如梯度下降法、牛顿法等)或搜索法(如 PTS 的求解)。但优化方法存在迭代速度慢, 且计算过程中存在求导运算等问题, 复杂度高, 耗时较长。而搜索法一般搜索范围比较大, 搜索次数是子载波数的指数级, 且难以在求解精度和复杂度之间取得很好的平衡。遗传算法的并行特性和启发式搜索非常适用于求解该类问题, 可以迅速准确地找到问题的最优解。

研究过程中发现, 式(12)的目标函数值很小且互相之间非常接近, 而个体的优势就体现在目标函数值细微的变化中, 因此, 如果直接选用目标函数值作为适应度, 将非常不利于选择操作对优秀个体的选择。为了拉开个体之间的适应度, 将排序思想引入适应度计算。由于是求最小值, 首先按照个体的目标值从小到大的顺序进行排序, 目标值最小的个体赋予最大的适应度值  $F_{\text{MAX}}$ , 目标值最大的个体适应度值为 0, 其他个体适应度通过式(13)计算得到。

$$F(\text{idx}) = F_{\text{MAX}} - \text{step} + F_{\text{MAX}}(\text{step} - 1) \frac{\text{idx} - 1}{\text{pop} - 1} \quad (13)$$

其中,  $\text{step} = F_{\text{MAX}} / (\text{pop} - 1)$  为适应度变化步长。

对优化目标(12)中的第一个约束条件采用罚函数的方法处理。结合目标值的取值范围, 惩罚系数设为  $\sigma = 1 / \max\{\|\tilde{\mathbf{d}}\|^2 - \|\mathbf{d}\|^2\}$ , 对于 MPSK 调制, 惩罚函数可以表示为

$$\text{penalty} = \frac{1}{N_c} \left| \|\mathbf{x}\|^2 - N_c \right| \quad (14)$$

对第 2 个约束条件实际上是限制了变量(最优加权向量)的取值范围。

基于改进遗传算法的加权向量求解总过程如图 2 所示。可以看出, 应用 SW-JR 算法的 OFDM 系统可以随时根据环境的变化调整折衷参数以适应当前的环境。

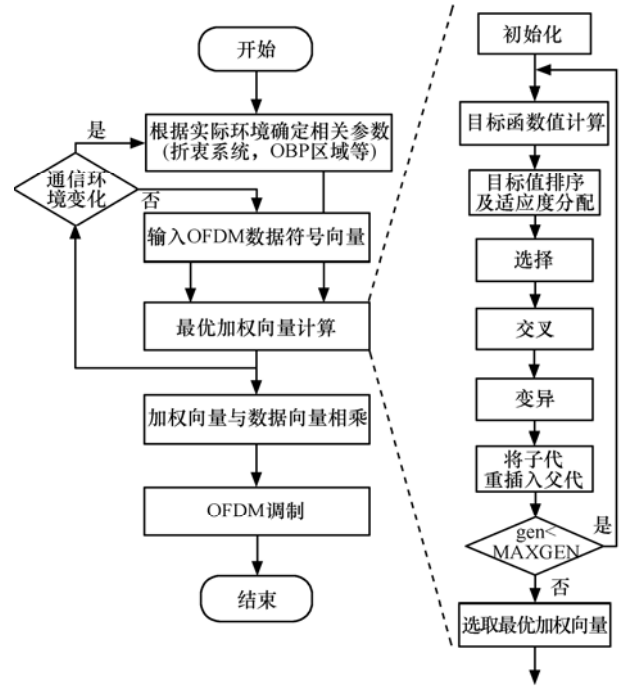


图 2 PAPR 与 OBP 联合降低流程

#### 5 仿真分析

本节通过计算机对所提出的基于子载波加权的联合优化算法的性能进行仿真分析。仿真中采用权值比  $\rho = g_{\text{max}} / g_{\text{min}} = \sqrt{4}$ 。仿真参数如表 1 所示。

表 1	仿真参数
参数	值
子载波数	$N_c = 64$
调制方式	QPSK
可用子载波频段	$N = \{\pm 1, \pm 2, \dots, \pm 32\}$
OBP 抑制频段	$\zeta = \{\pm 33, \pm 34, \dots, \pm 44\}$
种群规模	$\text{pop} = 100$
最大遗传代数	$\text{gen} = 100$
交叉概率	$P_c = 0.9$
变异概率	$P_m = 1/N_c$

**仿真 1** 首先对子载波加权法降低 PAPR 和 OBP 的性能进行仿真。图 3(a)给出在一个 OFDM 符号周期内,SW 法降低 PAPR 的效果,折衷参数  $\lambda = 0$  (只考虑 PAPR)。可以看出,OFDM 信号的峰值功率达到了 10dB 左右,而加权后信号的功率最大在 5dB 左右, PAPR 的减小值大于 4dB,证明 SW 法可以有效地降低信号的峰均比;图 3(b)给出了应用 SW 法 50 个连续的 OFDM 符号的平均功率谱密度 ( $\lambda = 1$ ),可以清楚地看到,OBP 大约降低 10dB。

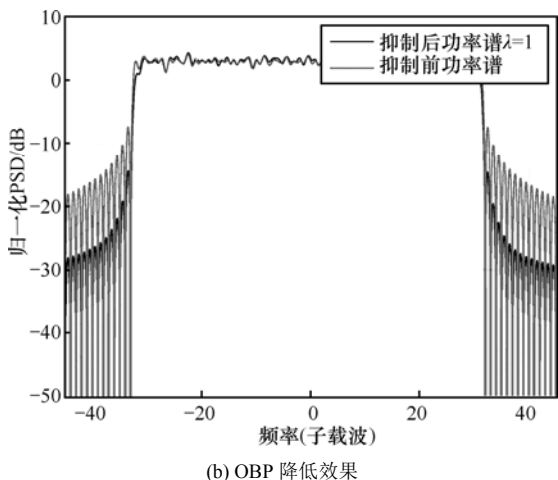
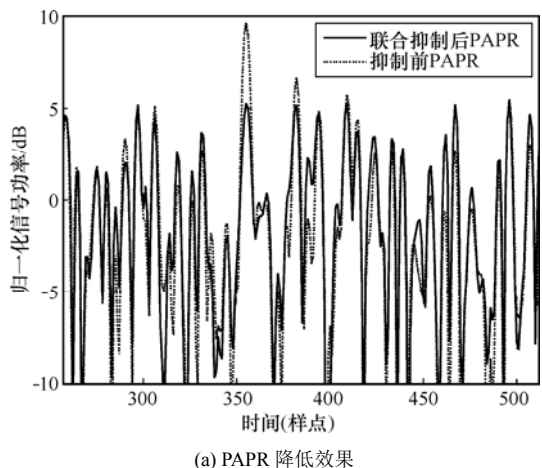


图 3 PAPR 与 OBP 降低效果

**仿真 2** PAPR 与 OBP 的联合降低性能仿真。对于子载波加权的 OFDM 系统进行蒙特卡洛仿真,得到 PAPR 与 OBP 在不同折衷系数  $\lambda$  下的平均降低性能如图 4 所示。对于 PAPR,  $\lambda = 0$  时 PAPR 可以平均降低 2.7dB,而当  $\lambda = 1$  时, PAPR 的降低量为 -0.09dB;对于 OBP,  $\lambda = 1$  时, OBP 可以平均降低 11.6dB,而当  $\lambda = 0$  时, OBP 的降低量减为 -0.37dB。

证明当单纯对一方 (PAPR 或 OBP) 进行降低

时,必将导致另一方 (OBP 或 PAPR) 的升高。因此可以预测,联合降低法的性能将优于分两步分别对 PAPR 和 OBP 进行降低方法的性能,下面的仿真实验证实了这一点。

**仿真 3** 基于 SW 的联合降低算法与采取分两步分别用 SW 法对 PAPR 和 OBP 进行降低的系统性能的比较。图 5 给出了仿真结果。通过比较可以看出,联合降低法的性能明显优于两步法。这是由于两步法在执行每一步优化时总是尽可能地使目标 (PAPR/OBP) 最优,而通过前面的叙述可以知道,对一方目标的最优化会导致另一方目标性能的下降,因此,两步法在执行第 2 步的同时破坏了上一步结果的最优性,使得总体性能无法达到最优。而联合优化通过寻找优化目标的 Pareto 解,使得系统性能在整体上达到最优。

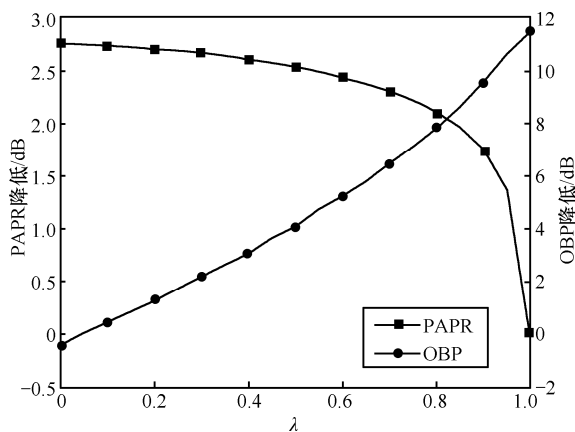


图 4 不同折衷系数  $\lambda$  下, PAPR 与 OBP 联合降低性能

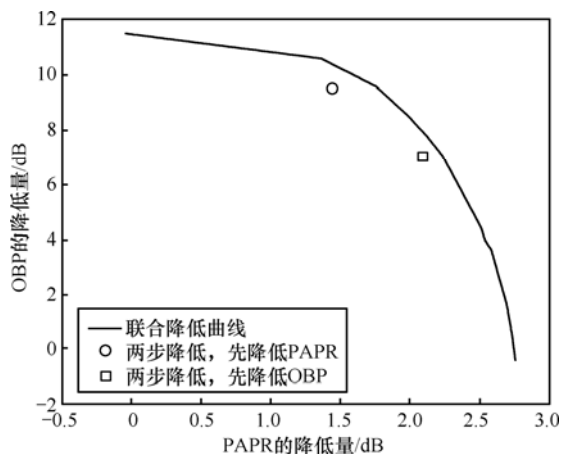


图 5 联合降低与分步降低性能比较

**仿真 4** PAPR 与 OBP 的 CCDF 性能仿真。以上对联合降低算法的平均性能进行了分析,为分析联合降低后 PAPR 与 OBP 的分布性能,图 6 给出

了 PAPR 与 OBP 的互补累计分布函数 (CCDF) 的仿真结果, 并与一般 OFDM 系统的 CCDF 进行了比较。

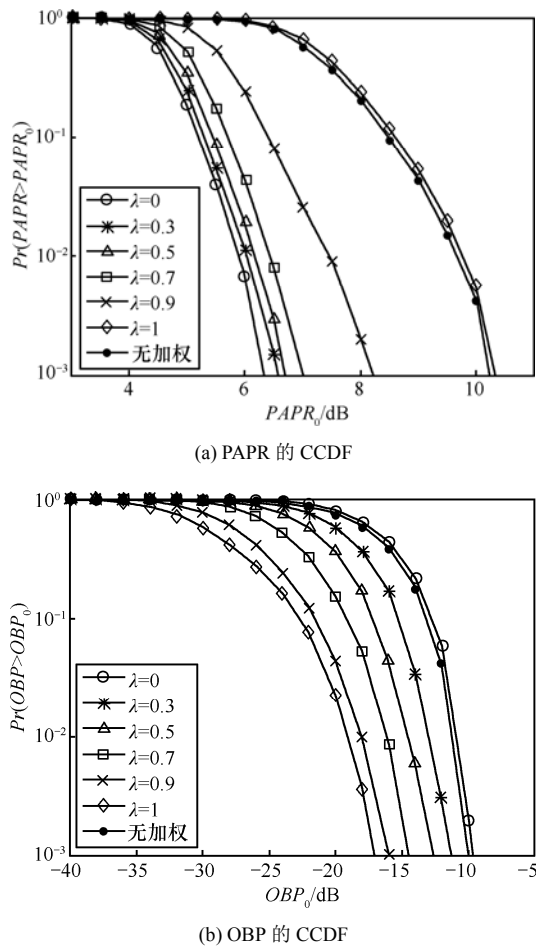


图6 PAPR 与 OBP 在不同  $\lambda$  下的 CCDF

可以看出,  $\lambda = 0$  时, PAPR 的 CCDF 和  $\lambda = 1$  时 OBP 的 CCDF 均略大于不加权 OFDM 的 CCDF, 也说明了单纯对一方性能的优化会导致另一方性能的下降。另外可以看出,  $\lambda$  对 OBP 的影响大于 PAPR, 比如对于  $Pr = 10^{-3}$ , 与  $\lambda = 0$  相比, 即使  $\lambda$  增加较小的值 ( $\lambda = 0.3$ ), OBP 可以降低 2dB, 而 PAPR 却降低不到 0.5dB。

**仿真 5** 基于 SW 联合降低算法的误符号率 (SER) 性能仿真。加权法的缺点是: 加权会造成各子载波上功率的不同, 使得子载波上的信噪比下降而导致误码率的提高。表 2 给出了不同  $g_{\max}/g_{\min}$  下 PAPR 与 OBP 的平均降低结果。可以看出,  $\rho$  越大, 对 PAPR 和 OBP 的降低效果越好, 但随着  $\rho$  的增大降低程度逐渐趋缓。这是由于  $\rho$  的增大使得式(11)的条件约束变松, 于是式(9)解

的自由度就越大, 使得算法的效果越好。同时, 图 7 说明随着  $\rho$  的增大, 系统的 SER 性能不断下降。这是由于当  $\rho$  较大时, 某些子载波因无法接收到足够的功率从而不能正确地进行解调, 导致系统性能的下降。

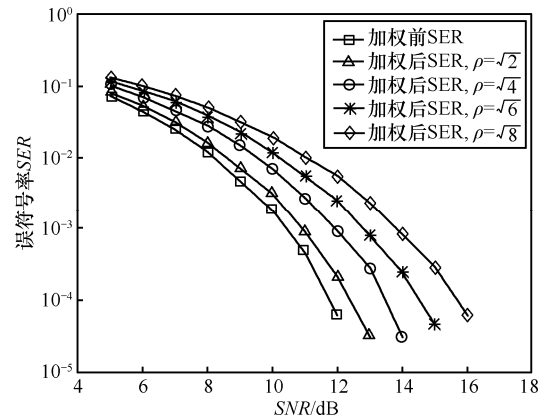


图7 SW 法联合降低 SER 性能 ( $\lambda = 0.5$ )

表 2 不同  $g_{\max}/g_{\min}$  下 SW 法平均降低性能 ( $\lambda = 0.5$ )

$g_{\max}/g_{\min}$	平均降低性能	
	OBP	PAPR
$\sqrt{2}$	1.947 1	1.734 2
$\sqrt{4}$	3.926 8	2.564 6
$\sqrt{6}$	4.565 2	2.771 7
$\sqrt{8}$	5.430 6	2.960 4

## 6 结束语

本文提出了一种基于子载波加权的 PAPR 与 OBP 联合优化方法, 并对其性能进行了仿真分析。仿真结果表明, 与两步法相比, 新方法能够更显著地降低 OFDM 系统中的 PAPR 与 OBP, 并在实际应用中取得了理想的效果。由于不需要占用子载波, 其频谱效率高, 且不需要发送额外的用于解调的信息。新方法最大的特点是可以通过调整折衷系数适应当前通信环境, 使其在 PAPR 与 OBP 均较高的 OFDM 系统中具有很高的应用价值, 如蜂窝系统中采用 OFDMA 的上行链路。SW-JR 方法实现简单, 采用改进的遗传算法求取最优加权向量大大降低了计算的复杂度, 具有很强的应用性。

如何根据环境的变化自适应地调整折衷参数将是下一步研究的主要内容。由于遗传算法有时会陷入局部最优解, 且用在发送端仍会稍显复杂, 因

此, 如何自适应地调整遗传算法的参数并进一步降低算法的复杂度也是下一步研究的主要目标。

### 参考文献:

- [1] 汪裕民. OFDM 关键技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
WANG Y M. OFDM Technology and Applications[M]. Beijing: China Industry Press, 2007.
- [2] WULICH D, GOLDFELD L. Reduction of peak factor in orthogonal multicarrier modulation by amplitude limiting and coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(1): 18-21.
- [3] OCHIAI H, IMAI H. Performance analysis of deliberately clipped OFDM signals[J]. IEEE Trans Commun, 2002, 50(1): 89-101.
- [4] JIANG Y. New companding transform for PAPR reduction in OFDM[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(4): 282-284.
- [5] JONES A E, WILKINSON T A, BARTON S K. Block coding schemes for reduction of peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes[J]. Electronics Letters, 1994, 30(25): 2098-2099.
- [6] EETVELT V, WADE J, TOMLINSON M. Peak to average power reduction for OFDM schemes by selective scrambling[J]. Electronic Letters, 1996, 32(22): 1963-1964.
- [7] DAVIS J A, JEDWAB J. Peak-to-mean power control and error correction for OFDM transmission using Golay sequences and reed-muller codes[J]. Electronic Letters, 1997, 33(4): 267-268.
- [8] BAUML R W, FISHER R F H, HUBER J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping[J]. Electronic Letters, 1996, 32(22): 2056-2057.
- [9] MARCO B, STEFAN H M W, JOHANNES B H. SLM Peak-power reduction without explicit side information[J]. IEEE Commun Letters, 2001, 5(6): 239-241.
- [10] KANG S G, KIM J G, JOO E K. A novel subblock partition scheme for partial transmit sequence OFDM[J]. IEEE Trans Broadcasting, 1999, 45(3): 333-338.
- [11] WANG C. L., KU S J, YANG C J. A low complexity PAPR estimation scheme for OFDM signals and its application to SLM-based PAPR reduction[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(3): 637-645.
- [12] MULLER S H, HUBER J B. OFDM with reduced peak to average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences[J]. Electronic Letters, 1997, 33(5): 368-369.
- [13] LI C P, WANG S H, WANG C L. Novel low-complexity SLM schemes for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(5): 2916-2921.
- [14] 李庆, 胡捍英. 基于子载波加权降低 OFDM 系统峰均功率比的方法[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(4), 40-43.  
LI Q, HU H Y. A PAPR reduction method based on subcarrier weighting in OFDM system[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(4): 40-43.
- [15] WEISS T A, JONDRAL F K. Spectrum pooling: an innovative strategy for enhancement of spectrum efficiency[J]. IEEE Communications Magazine, Radio Communications Supplement, 2004, (3): 8-14.
- [16] WEISS T A, HILLENBRAND J, KROHN A, *et al.* Mutual Interference in OFDM-based spectrum pooling systems[A]. Proceedings of IEEE Vehicular Technological Conference[C]. 2004. 1872-1877.
- [17] BRANDES S, COSOVIC I, SCHNELLE M. Sidelobe suppression in OFDM systems by insertion of cancellation carriers[A]. Proceedings of the 62nd IEEE Vehicular Technology Conference-Fall[C]. 2005. 152-156.
- [18] BEEK J V D, BERGGREN F. Out-of-band power suppression in OFDM[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(9): 609-611.
- [19] COSOVIC I, BRANDES S, SCHNELLE M. Subcarrier weighting: a method for sidelobe suppression in OFDM systems[J]. IEEE Communication Letters, 2006, 10(6):444-446.
- [20] TELLADO-MOURELO J. Peak to Average Power Reduction for Multicarrier Modulation[D]. Stanford University, 1999.

### 作者简介:



李庆 (1983-), 男, 山东淄博人, 信息工程大学博士生, 主要研究方向为无线与移动通信、通信信号处理、认知无线电等。

胡捍英 (1961-), 男, 河南南阳人, 信息工程大学教授, 主要研究方向为无线与移动通信等。