

# 联合迭代滤波与压扩参数优化的 OFDM 信号峰平比抑制

杨超, 王勇, 葛建华

(西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 针对现有基于压扩变换处理的信号峰平比抑制方法性能单一且参数固定等缺陷, 提出一种联合迭代滤波与自适应压扩参数优化的 OFDM 信号峰平比抑制方案。该方案能够同时对信号的峰平比 PAPR 和接收端误码率 BER 性能进行联合优化, 并在迭代过程中有效消除因信号幅度畸变所引起的带外频谱再生; 所提信号压扩及解压扩函数形式简单, 计算复杂度较小; 推导并给出了该方案可获得的 PAPR 抑制增益和 BER 理论性能界。仿真结果表明, 该方案可同时获得较好的信号 PAPR 抑制、误码率以及带外功率谱性能, 并在迭代过程中对压扩参数进行自适应调整, 能够有效提高算法的适用灵活性。

**关键词:** 正交频分复用; 峰平比; 压扩变换; 参数优化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

## Companding transform technique combined with iterative filtering for reducing PAPR of OFDM signals

YANG Chao, WANG Yong, GE Jian-hua

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Considering the drawbacks of the traditional companding transforms, an efficient companding scheme combined with iterative filtering was proposed to reduce the peak-to-average power ratio (PAPR) of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals. By introducing a joint optimization approach for PAPR and bit error rate (BER) performances along with remaining an unchanged average output power level, the scheme could achieve significant reduction in PAPR as well as an improved BER simultaneously. Moreover, by adaptively adjusting the transform parameters in the iterative process, more design flexibility in companding form and lower out-of-band radiation could also be given to satisfy various system requirements. The proposed scheme had a simple functional form and less computational complexity. The theoretical results regarding the transform gain and impact of companding distortion were derived. Simulation results show that this scheme can substantially offer better overall performances in terms of PAPR reduction, BER performance and bandwidth efficiency.

**Key words:** OFDM; PAPR; companding transform; parameter optimization

### 1 引言

正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)多载波调制技术具有高频谱效率以及有效抑制多径衰落、符号间干扰等优点<sup>[1]</sup>, 广泛应用于各类现代无线通信系统。但是, 由于

OFDM 信号由多个独立子载波信号相叠加而成, 从而导致 OFDM 系统有一个很严重的缺点: 当多个子载波信号相位相同时, 通过相互叠加产生较高的信号峰平比(PAPR, peak-to-average power ratio)。若无线传输信号的峰平比很高, 为了保证信号能够获得线性放大, 必然要求功率放大器具有较宽的线性动

收稿日期: 2014-01-11; 修回日期: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61101145); 国家科技重大专项资助项目(2012ZX03001008); 111 基地资助项目(B08038)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61101145); The National Important Science Technology Specific Project (2012ZX03001008); 111 Project (B08038)

态范围,从而导致 OFDM 发射机的构造成本大大增加;反之,如果信号通过线性范围较窄的功率放大器,将导致发射信号出现严重的带内失真和带外频谱再生,使 OFDM 传输系统性能急剧下降。目前,研究者已经提出了许多信号峰平比抑制方法<sup>[2]</sup>,如限幅滤波法<sup>[3~5]</sup>、信号压扩变换法<sup>[6~11]</sup>、有效星座图扩展法(ACE, Active constellation extension)<sup>[12]</sup>、选择映射法(SLM, Selected mapping)<sup>[13]</sup>、部分传输序列法(PTS, partial transmit sequences)<sup>[14]</sup>等。在诸多现有的无线 OFDM 信号 PAPR 抑制技术中,信号压扩变换技术因其实现简单,且对系统参数无任何限制等特点,成为一种非常具有吸引力的 PAPR 抑制解决方案。

现有信号压扩变换方法的基本思路是,利用压扩函数对信号进行预畸变处理。Huang 提出的线性压扩变换方法利用分段函数对小幅度信号和大幅度信号分别进行压扩处理,在对系统性能影响较小的情况下有效抑制信号峰平比<sup>[8]</sup>。但该方法仅针对信号的峰平比进行了优化,却不能同时对系统的误码率(BER, bit-error-rate)性能及带外频谱扩展性能进行有效控制,且其压扩参数通常为固定值,不能依据实际信号分布进行实时自适应调整。文献[4]提出的迭代限幅滤波采用迭代结构多次限幅滤波来减小信号峰平比,利用迭代过程灵活地对系统峰平比和带外频谱扩展性能进行联合优化控制,但所需迭代次数较大,极大地增加了系统计算复杂度。基于上述技术背景,针对现有信号压扩变换方法普遍存在的缺陷,本文结合迭代限幅滤波与压扩变换方法的基本思想,提出一种基于自适应线性压扩参数优化的无线 OFDM 信号峰平比抑制方法,该方法综合考虑了信号 PAPR 抑制以及 BER 性能,可根据系统需求对方案配置参数进行适当调整;同时,在迭代过程中,对压扩信号畸变引起的带外噪声进行消除,在获得较好的 PAPR 抑制与 BER 性能的同时,不会造成带外频谱性能的恶化。特别需要说明的是,由于所提信号压扩变换模型等效于对单路信号进行独立匹配滤波处理,可直接推广至多路信号并行模型,如多天线 MIMO-OFDM 系统。

## 2 系统模型

每个 OFDM 符号由经过调制的多个独立子载波信号相加而成,假设  $N$  为并行传输信息的子载波个数,  $X_k (k=0,1,\dots,N-1)$  为 OFDM 符号中的第  $k$

个复调制信号,则  $X_k$  经过  $N$  点快速傅里叶逆变换(IFFT)后可表示为

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(j \frac{2\pi}{N} kn\right), n=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

信号的峰值平均功率比 PAPR 定义为

$$\text{PAPR(dB)} = 10 \lg \frac{\max\{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}} \quad (2)$$

其中,  $|x_n|$  为  $x_n$  的幅度,  $E[\cdot]$  表示数学期望运算。由中心极限定理可知,当符号子载波个数  $N$  较大时,OFDM 信号的实部  $\text{Re}(x_n)$  和虚部  $\text{Im}(x_n)$  都服从均值为 0 且方差为  $\sigma^2$  的高斯分布<sup>[8]</sup>;其幅度  $|x_n|$  服从瑞利分布,所对应的概率密度函数(PDF, probability density function)为

$$f_{|x_n|}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{2x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right), & x \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

所对应的累积分布函数(CDF, cumulative distribution function)为

$$F_{|x_n|}(x) = \int_{-\infty}^x f_{|x_n|}(y) dy = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right), & x \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

假设 OFDM 符号周期内的每个采样值之间相互独立,则信号 PAPR 均小于某一门限  $z$  的概率为  $P\{\text{PAPR} \leq z\} = \left(P\{|x_n|^2 \leq z\}\right)^N = [1 - \exp(-z)]^N$  (5)

通常,采用互补累积分布函数(CCDF, complementary cumulative distribution function)函数来衡量信号的 PAPR 分布,定义为 OFDM 符号的 PAPR 超过某一门限值  $z$  的概率。

$$\begin{aligned} P\{\text{PAPR} > z\} &= 1 - P\{\text{PAPR} \leq z\} \\ &= 1 - [1 - \exp(-z)]^N \end{aligned} \quad (6)$$

在实际应用中,由于单倍采样值往往不能真正反映连续 OFDM 信号幅度的变化特性,所以通常采用过采样以更准确地表示 OFDM 模拟信号,过采样因子  $J$  越大越能准确反映出信号的变化趋势。

## 3 所提新方案

图 1 所示为本文所提出新方法的信号处理流程

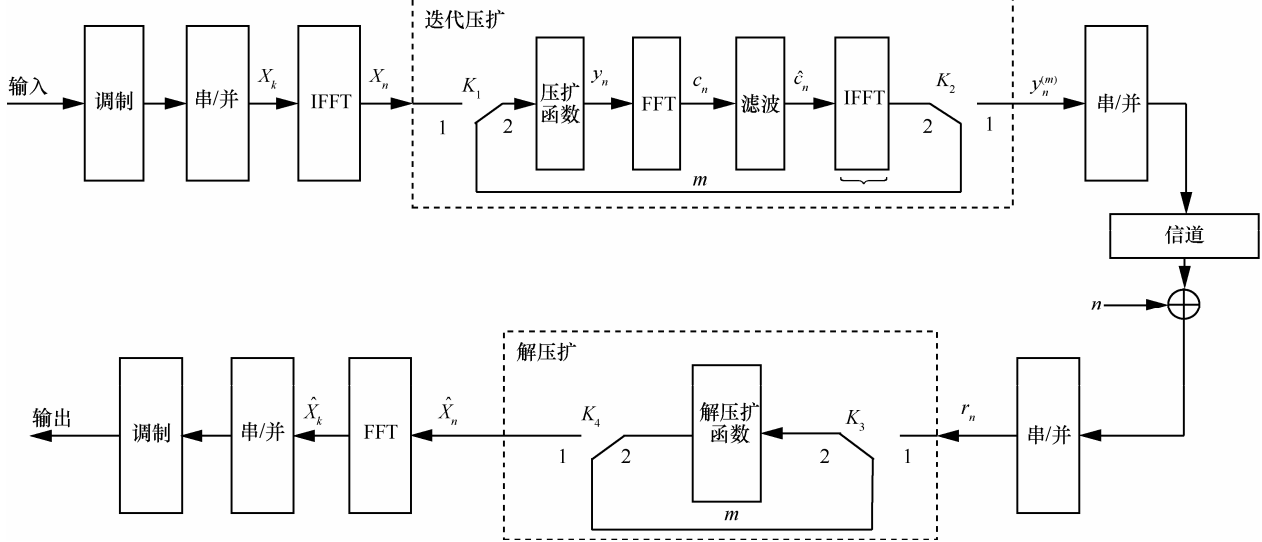


图 1 基于迭代压扩方法的 OFDM 系统

框图。首先，经过 OFDM 调制的信号在时域上进行信号幅度压扩处理，即使用非对称线性压扩函数对信号进行畸变处理；之后，再经过 FFT 运算将信号变换到频域进行频域滤波，之后再返回时域，由此构成一个循环结构。图中的  $m$  为迭代次数，当  $m$  等于最大迭代次数  $M$  时，循环结束。若考虑高斯白噪声 AWGN 信道，在接收端接收到的信号则为  $r_n = y_n^{(m)} + \omega_n$ ，其中， $y_n^{(m)}$  表示经过  $m$  次迭代后获得的传输信号， $\omega_n$  表示高斯白噪声。信号在接收端进行  $m$  次解压扩运算，再经过 FFT 变换、并/串变换和解调等，即可得到原始 OFDM 信号。

在发射端的迭代压扩算法中，每一次迭代可以抽象为一个数学优化问题，即每一次迭代都在满足一定条件下，获得最小的信号 PAPR。

$$\begin{aligned} \min \quad & PAPR = \frac{\max\{|y_n|^2\}}{E\{|y_n|^2\}}, \\ \text{s.t} \quad & \alpha = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^\infty xh(x)f_{|x_n|}(x)dx \geq a, \\ & c_n = \text{FFT}(y_n), \\ & c_n' = \hat{c}_n' H_m, \\ & c_n'' = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $\alpha$  为信号在每一次进行压扩后的衰减系数， $c_n'$  和  $\hat{c}_n'$  为带内信号， $c_n''$  为带外信号，频域滤波的过程即为将频域信号带外置零的过程。其具体的算法步骤可以描述如下。

**第 1 步：** 设置初始值  $\alpha$  及最大迭代次数  $M$ 。

**第 2 步：** 将  $K_1$  开关打到 1 端，使一个 OFDM 符号进入循环；设  $m=1$ ，同时  $K_1$  开关及  $K_2$  开关均打到 2 端，开始循环。

**第 3 步：** 将原始 OFDM 信号  $x_n$  在时域上进行压扩变换得到压扩信号  $y_n$ 。

**第 4 步：** 将  $y_n$  经过 FFT 变换转化到频域，得到频域信号  $c_n$ 。

**第 5 步：** 将  $c_n$  送入滤波器进行滤波得到信号  $\hat{c}_n'$ ，滤波器将频域信号  $c_n$  的带外部分置 0，不影响带内信号，其响应函数如下。

$$H(i) = \begin{cases} 1, & 1 \leq i \leq N-1 \\ 0, & N \leq i \leq JN-1 \end{cases} \quad (8)$$

**第 6 步：** 滤波后的信号再进行 IFFT 变换，就得到一个新的信号  $z_n$ 。令  $m=m+1$ ，若  $m=M$ ，则迭代结束，将开关  $K_2$  打到 1 端，输出信号  $z_n$ ，同时返回第 2 步，对下一个 OFDM 符号进行处理；若  $m < M$ ，则返回第 3 步，继续进行迭代。

本方案压扩过程中采用的压扩函数为非对称线性分段函数，以信号幅度是否大于拐点值为标准，将信号分为 2 部分进行处理。

$$y_n = \begin{cases} \frac{1}{k}x_n, & 0 < |x_n| \leq v \\ kx_n, & |x_n| > v \end{cases} \quad (9)$$

其中， $0 \leq k \leq 1$  为第二段函数的斜率； $0 \leq v \leq V$  为函数拐点， $V = \max\{|x_n|\}$  为信号  $x_n$  的最大幅值。在压扩过程中，为了保证信号在压扩前后的功率保持

不变, 信号功率应满足  $E[|x_n|^2] = E[|y_n|^2]$ , 即

$$\int_0^v \left(\frac{1}{k}x\right)^2 f_{|x_n|}(x)dx + \int_0^{+\infty} (kx)^2 f_{|x_n|}(x)dx = \sigma^2 \quad (10)$$

化简后得到

$$\frac{1}{k^2} + \left(k^2 - \frac{1}{k^2}\right) \left(1 + \frac{v^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{v^2}{\sigma^2}\right) = 1 \quad (11)$$

为了便于计算, 假设归一化门限值为  $v_n = v^2 / \sigma^2$ , 则上式可以化简为

$$\frac{1}{k^2} + \left(k^2 - \frac{1}{k^2}\right) (1 + v_n) \exp(-v_n) = 1 \quad (12)$$

图2为  $k$  取值不同时  $v_n$  随  $k$  的变化曲线, 由图可以看出  $v_n$  与  $k$  呈现出近似的线性关系, 其数学关系可以描述为

$$v_n = \frac{5}{3}k \quad (13)$$

代入式(12), 可知斜率  $k$  满足条件

$$\frac{1}{k^2} + \left(k^2 - \frac{1}{k^2}\right) \left(1 + \frac{5}{3}k\right) \exp\left(-\frac{5}{3}k\right) = 1 \quad (14)$$

在接收端对信号进行解压扩变换, 解压扩函数为

$$h^{-1}(y_n) = \begin{cases} ky_n, & n \in \phi_1(v) \\ \frac{1}{k}y_n, & n \in \phi_2(v) \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\phi_1(v) = \{n, \forall |x_n| \leq v\}$ ,  $\phi_2(v) = \{n, \forall |x_n| > v\}$ 。

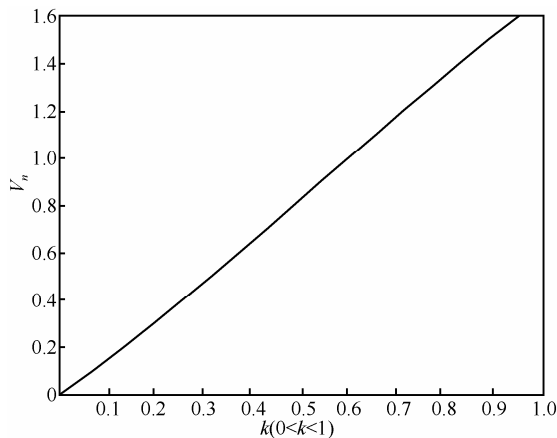


图2 归一化门限值  $v_n$  随斜率  $k$  的变化曲线

## 4 方案理论性能分析

### 4.1 峰平比抑制增益

由 OFDM 信号峰平比的定义, 信号在经过一次

压扩变换后的  $PAPR$  为

$$PAPR(\text{dB}) = 10 \lg \frac{(kV)^2}{\sigma^2} = 20 \lg \frac{kV}{\sigma} \quad (16)$$

变换增益  $G$  为

$$G(\text{dB}) = 10 \lg \frac{PAPR_{orig}}{PAPR} = 20 \lg \frac{1}{k} \quad (17)$$

其中,  $PAPR_{orig}$  为压扩前的信号峰平比。图3为  $k$  取不同值时变换增益  $G$  的变化曲线, 可知  $k$  越小, 则信号的  $PAPR$  抑制效果越好。

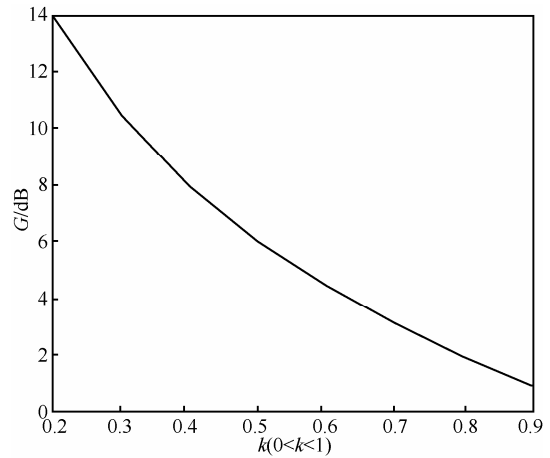


图3 变换增益  $G$  随斜率  $k$  的变化曲线

在迭代过程中, 信号在压扩变换后又变换到频域进行滤波消除带外干扰, 这一过程会导致信号的峰值再生, 使时域信号的  $PAPR$  增大, 即增益  $G$  变小。但循环迭代结构可以多次对信号进行压扩处理, 减小甚至消除有滤波引起的峰值再生对信号  $PAPR$  性能的影响。

### 4.2 系统误码率

首先分析压扩运算对信号影响, 由 Busgang 复高斯信号理论<sup>[15]</sup>可知, 压扩后的信号可以看作由衰减系数  $\alpha$  和一个压扩噪声组成的信号

$$y_n = \alpha x_n + b_n \quad (18)$$

其中,  $b_n$  为压扩噪声。文献[16]证明了 OFDM 信号是时不变的, 由此给出了衰减因子  $\alpha$  的计算公式如下。

$$\alpha = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\infty} xh(x)f_{|x_n|}(x)dx \quad (19)$$

将式(3)、式(11)和式(14)代入式(19), 可得衰减

因子为

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{1}{\sigma^2} \left( \int_0^v \frac{1}{k} x^2 f_{|x_n|}(x) dx + \int_v^\infty k x^2 f_{|x_n|}(x) dx \right) \\ &= \frac{1}{k} + \left( k - \frac{1}{k} \right) \left( 1 + \frac{5}{3} k \right) e^{-\frac{5}{3}k}\end{aligned}\quad (20)$$

图 4 图为本方案中  $k$  取不同值时衰减系数  $\alpha$  随  $k$  的变化曲线。由图可以看出, 随着  $k$  的减小,  $\alpha$  也相应减小; 当  $\alpha$  较大时系统的 BER 性能较好, 即  $k$  越大, 则系统的 BER 性能就越好。当迭代次数  $m=1$  时, 经过 AWGN 信道后得到的信号为

$$r_n = h(x_n) + w_n = \begin{cases} \frac{1}{k} x_n + w_n, & 0 < |x_n| \leq v \\ k x_n + w_n, & |x_n| > v \end{cases}\quad (21)$$

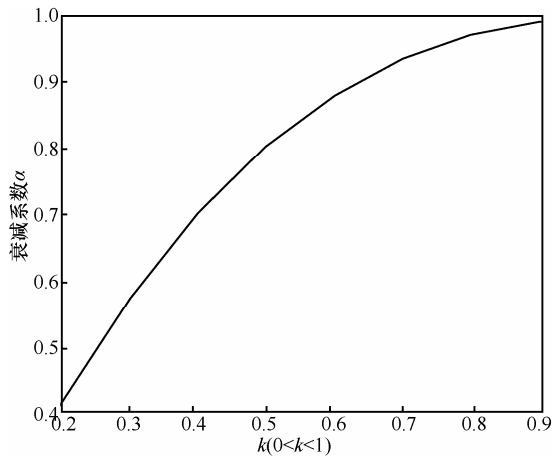


图 4 衰减系数  $\alpha$  随  $k$  的变化曲线

其中,  $w_n$  为高斯白噪声。在接收端对信号进行解压扩变换, 在接收端得到的信号为

$$\hat{x}_n = h^{-1}(r_n) = \begin{cases} x_n + k w_n, & 0 < |x_n| \leq v \\ x_n + \frac{x_n}{k}, & |x_n| > v \end{cases}\quad (22)$$

由此可以得到信号误差为

$$|e| = |\hat{x}_n - x_n| = \begin{cases} |k w_n|, & n \in \phi_1(v) \\ \left| \frac{w_n}{k} \right|, & n \in \phi_2(v) \end{cases}\quad (23)$$

则当  $m \geq 1$  时, 解压扩变换后得到的信号误差为

$$|e_m| = \begin{cases} |k^m w_n|, & n \in \phi_1(v) \\ \left| \frac{w_n}{k^m} \right|, & n \in \phi_2(v) \end{cases}\quad (24)$$

其中,  $k$  满足  $0 < k \leq 1$ 。上式表明当  $n \in \phi_1(v)$  时, 信道噪声  $w_n$  被缩小至  $k^m w_n$ ; 而  $n \in \phi_2(v)$  时, 信道噪声  $w_n$  被放大到  $w_n / k^m$ , 且随迭代次数  $m$  增加, 噪声的缩小或放大程度也会急剧增加。由于 OFDM 信号中大幅度信号出现的概率较小, 当接收端采用解压扩运算时信道噪声  $w_n$  将被缩小; 而由式(18)可知在接收端不进行解压扩时, 得到的噪声为信道噪声  $w_n$  与迭代  $m$  次后的等效压扩噪声  $b'_n$  的和, 接收端采用解压扩运算时可以获得更好的 BER 性能。

综合上述讨论分析, 首先, 压扩信号峰平比抑制与系统误码率性能之间呈“此消彼长”的相互折中关系, 根据式(17)与式(20)可见, 随着  $k$  值的减小, 压扩处理可获得更高的 PAPR 抑制增益, 但同时信号衰减将加剧, 导致系统 BER 性能逐渐恶化, 而该方案可根据不同的 OFDM 系统具体需求, 在二者之间选择最佳性能折中及其对应的参数配置 (图 3、图 4 所示非常直观); 其次, 若所需 PAPR 抑制目标量确定, 则优化方法可由式(7)通过有限次迭代自适应地保证 BER 性能损失最小; 最后, 需要特别说明的是, 由于信号的压扩变换本质上是一个非线性处理过程, 会引起带宽有限信号的带外频谱失真, 而在本方案中, 信号在时域进行压扩后会变换到频域, 将带外部分置零而不影响带内信号, 可以消除由压扩产生的带外干扰, 使信号获得最佳带外频谱性能, 有效避免产生邻道干扰 ACI。

## 5 仿真结果及分析

本节对提出方案的综合性能进行计算机仿真与验证。系统仿真条件与参数设置: 采用未编码 OFDM 系统, 子载波个数  $N=1024$ , 调制星座为 QPSK 和 16QAM, 信号过采样因子  $J=8$ ; OFDM 符号数量  $s=1000$ 。为便于性能比较, 对现有的 3 类经典峰平比抑制方法也进行了仿真, 包括限幅滤波方法<sup>[3]</sup>、指数压扩方法<sup>[6]</sup>及线性压扩方法<sup>[8]</sup>。

图 5 为采用不同抑制方法所得到 OFDM 输出信号的 CCDF 曲线, 图上还附出了原始 OFDM 信号的 CCDF 曲线。由图可见本方案  $\alpha=0.92$  且迭代次数  $m=3$  获得的 PAPR 抑制性能最优, 基本与指数压扩方法获得的 PAPR 性能相同, 远远优于线性压扩方法<sup>[8]</sup>, 在 CCDF 为  $10^{-3}$  时, 略优于限幅滤波方法约 0.5 dB。

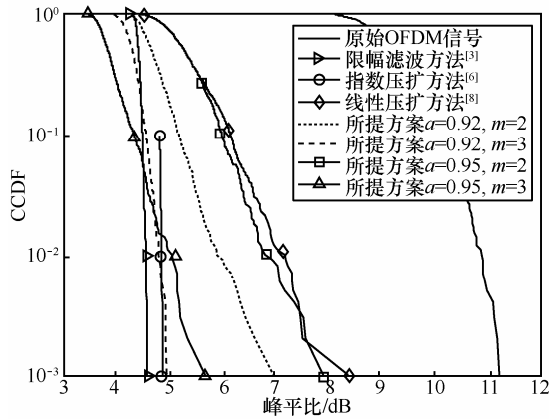


图5 OFDM 输出信号 CCDF 曲线 (QPSK 调制)

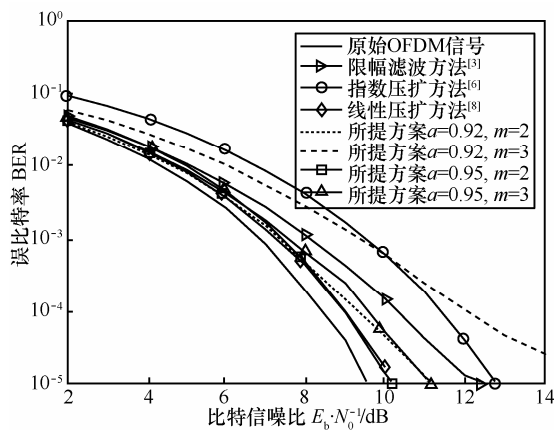


图6 本方法与其他方法 BER 曲线 (QPSK, AWGN 信道)

图6和图7分别为几种不同方法采用QPSK和16QAM星座调制信号时经过高斯白噪声AWGN信道的信号误码率BER性能仿真曲线。由图可知,在本方案 $\alpha=0.95$ 且迭代次数 $m=2$ 时所获得的BER性能最好。图6可知,本方案BER性能远远优于指数压扩方法,在BER为 $10^{-5}$ 时优于限幅滤波法约2 dB,与线性LNST方法<sup>[8]</sup>基本相同;图7为16QAM调制下,经过AWGN信道时不同方法的BER性能曲线,当 $\alpha=0.95$ 且迭代次数 $m=2$ 时,本方案获得的BER性能远远优于指数压扩方法和限幅滤波方法,且在BER小于 $10^{-4}$ 时优于线性压扩方法。图8为QPSK信号通过莱斯Rician衰落信道<sup>[17]</sup>的误码率性能仿真曲线,可见本方案性能优于其他方法,在 $10^{-5}$ 时优于指数压扩方法2 dB,优于限幅滤波方法和线性压扩方法1 dB左右。

图9为采用几种不同方法的输出信号功率谱密度(PSD, power spectral density)曲线图。由图可见,由于所提方案采用了时频域迭代滤波处理,可以完全滤除因信号压扩所导致的带外再生频谱干扰,获

得与原始OFDM信号相同的频谱性能,在归一化频率0.4附近,带外衰减可达到45 dB以上,未产生任何邻道干扰ACI,满足射频发射谱形要求。

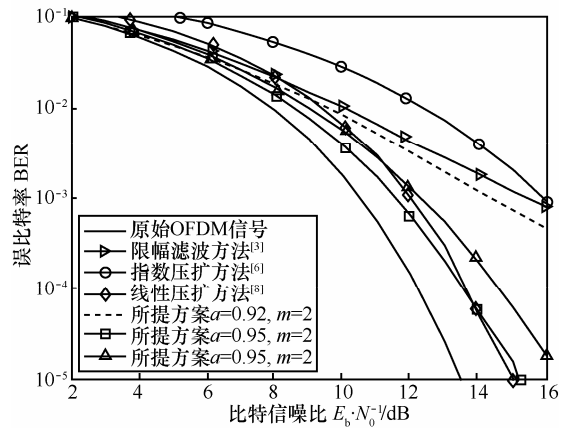


图7 本方法与其他方法 BER 曲线 (16QAM, AWGN 信道)

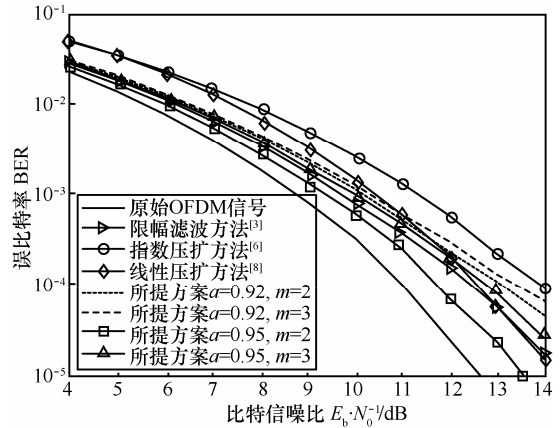


图8 本方法与其他方法 BER 曲线 (QPSK, Rician 信道)

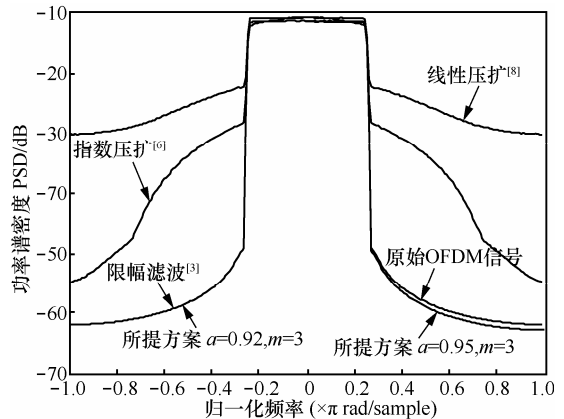


图9 本方法与其他方法的信号 PSD 曲线图(QPSK)

综上仿真结果表明,本方案在高斯白噪声信道下可以获得优于传统线性压扩方法的峰平比抑制性能,以及优于指数压扩方法与限幅滤波方法的误

码率 BER 性能; 并获得最佳的带外频谱性能, 整体综合性能优于限幅滤波法及现有的几种压扩方法; 特别是在如 16QAM 高阶调制以及多径衰落信道下, 依然能获得好的误码率性能。此外, 本方案所讨论模型基于单路 OFDM 信号, 考虑到压扩变换处理等效于对信号进行独立匹配滤波处理, 易推广至多路信号并行的 MIMO-OFDM 系统<sup>[18]</sup>。

## 6 结束语

针对传统压扩变换中参数固化且对信号性能优化单一的问题, 提出一种联合迭代滤波与自适应压扩参数优化的 OFDM 信号峰平比抑制方案。该方案对信号峰平比和误码率性能进行联合优化, 在降低信号 PAPR 的同时对信号 BER 性能进行控制, 并在迭代过程有效消除由信号畸变导致的带外频谱再生; 方案信号压扩及解压扩函数形式简单, 计算复杂度小, 且能够在迭代过程中对参数进行自适应调整, 大大增加了其适用灵活性; 分析推导了方案可获得的 PAPR 增益和信号衰减性能界, 仿真结果也验证了该方案的有效性, 综合性能优于现有 OFDM 信号压扩变换方法。在 MIMO-OFDM 系统中, 如何同时对多路并行信号进行联合优化迭代处理以降低运算复杂度, 将是进一步的研究思路。

## 参考文献:

- [1] HWANG T, YANG C, WU G, LI S, LEE G Y. OFDM and its wireless application: A survey [J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1673-1694.
- [2] RAHMATALLAH Y, MOHAN S. Peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems: A survey and taxonomy [J]. IEEE Commun Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1567-1592.
- [3] ARMSTRONG J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering [J]. Electronics letters, 2002, 38(5): 246-247.
- [4] WANG Y, LUO Z. Optimized iterative clipping and filtering for PAPR reduction of OFDM signals[J]. IEEE Trans Commun, 2010, 59(1): 33-37.
- [5] WANG L, TELLAMBURA C. A simplified clipping and filtering technique for PAR reduction in OFDM systems [J]. IEEE Signal Processing Lett, 2005, 12(6): 453-456.
- [6] JIANG T, YANG Y, SONG Y H. Exponential companding technique for PAPR reduction in OFDM systems [J]. IEEE Trans Broadcasting, 2005, 51(2): 244-248.
- [7] YUAN J. New companding transform for PAPR reduction in OFDM [J]. IEEE Commun Lett, 2010, 14(4): 282-284.
- [8] HUANG X, LU J, ZHENG J, *et al.* Companding transform for reduction in peak-to-average power ratio of OFDM signals [J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2004, 3(6): 2030-2039.
- [9] WANG Y, GE J H, WANG L H, *et al.* Nonlinear companding trans-

form for reduction of peak-to-average power ratio in OFDM systems [J]. IEEE Trans Broadcasting, 2013, 59(2): 369-375.

- [10] JENG S S, CHEN J M. Efficient PAPR reduction in OFDM systems based on a companding technique with trapezium distribution [J]. IEEE Trans Broadcasting, 2011, 57(2): 291-298.
- [11] HOU J, GE J H, LI J. Trapezoidal companding scheme for peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals [J]. Electronics Lett, 2009, 45(25): 1349-1351.
- [12] KOU Y J, LU W S, ANTONIOU A. A new peak-to-average power-ratio reduction algorithm for OFDM systems via constellation extension [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2007, 6(5): 1823-1832.
- [13] LI L, QU D M. Joint decoding of LDPC code and phase factors for OFDM systems with PTS PAPR reduction[J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 2012, 62(1): 444-449.
- [14] CIMINI J L J, SOLLENBERGER N R. Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences [J]. IEEE Commun Lett, 2000, 4(3): 86-88.
- [15] DARDARI D, TRALLI V, VACCARI A. A theoretical characterization of nonlinear distortion effects in OFDM systems [J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48(10): 1755-1764.
- [16] BANELLI P, CACOPARDI S. Theoretical analysis and performance of OFDM signals in nonlinear AWGN channels [J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48(3): 430-441.
- [17] ETSI EN 300 744 v1.4.1[C], Digital Video Broadcasting: Framing Structure, Channel coding, and Modulation for Digital Terrestrial Television. 2001.
- [18] JIANG T, LI C. Simple alternative multisequences for PAPR reduction without side information in SFBC MIMO-OFDM systems [J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 2012, 61(7): 3311-3315.

## 作者简介:



杨超 (1988-), 女, 天津人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线 OFDM 信号的峰平比抑制技术。



王勇 (1976-), 男, 陕西西安人, 西安电子科技大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为新型无线通信系统传输技术、通信信号自适应处理技术。



葛建华 (1961-), 男, 江苏南通人, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线移动通信系统信道编码技术、信息安全技术。