

# 联合星座扩展的预留子载波 OFDM 信号峰均比抑制算法

刘芳, 王勇

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

**摘要:** 针对现有预留子载波 TR 技术对无线 OFDM 信号峰均比 (PAPR) 抑制性能效率低, 且难以同时兼顾峰均比抑制、误码率 (BER) 性能损失及带外频谱分量扩展的问题, 提出一种联合智能梯度映射主动星座扩展 ACE 的预留子载波峰均比抑制 ACE-TR 算法, 能以较低的复杂度同时对信号峰均比和接收端误码率性能进行联合优化, 并在迭代过程中消除因限幅处理所导致的信号带外频谱分量再生; 特别是, 由于在优化迭代过程中可以对迭代参数进行自适应调整, 能够有效提高算法的适用灵活性。对算法进行了全面深入的理论分析, 推导了其可获得的 PAPR 抑制增益理论界和接收信号误码率性能理论值。理论分析与仿真表明, ACE-TR 算法能以更快的收敛速度产生所需的削峰信号, 并同时获得优异的峰均比抑制、误码率及带外功率谱性能。

**关键词:** 正交频分复用; 峰均比; 预留子载波; 主动星座扩展

中图分类号: TP393

文献标识码: A

## Tone reservation technique combined with active constellation extension for PAPR reduction of OFDM signal

LIU Fang, WANG Yong

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

**Abstract:** To overcome the drawbacks of existing tone reservation (TR) techniques, an efficient TR algorithm combined with active constellation extension (ACE-TR) was proposed for reducing the peak-to-average power ratio (PAPR) of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal. By means of a specially designed iterative procedure and a joint optimization approach for PAPR and bit-error-rate (BER) performances, ACE-TR was able to obtain both an improved BER and minimized out-of-band interference while reducing the PAPR effectively. A comprehensive theoretical analysis was presented, and some important results including the bounds of achievable PAPR gain, BER bound, and maximum iteration number were derived. Specifically, by adaptively adjusting the iterative parameters in the optimization approach, more trade-off flexibility between PAPR reduction and BER performance can be offered to satisfy various design requirements. Simulations demonstrate that ACE-TR can dramatically decrease the number of required iterations to reach the desired PAPR with low computation complexity. In addition, the transmitted OFDM symbols using the proposed ACE-TR have less in-band distortion and lower out-of-band spectral regrowth than traditional TR algorithms.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing, peak-to-average power ratio, tone reservation, active constellation extension

### 1 引言

正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)多载波调制技术能够显著减小

符号码间干扰并抵抗信道多径衰落<sup>[1]</sup>, 已被广泛应用于各类现代无线通信系统。但是, 无线 OFDM 信号具有高的峰均比(PAPR, peak-to-average power ratio), 过大的信号峰均比会对发射机射频功率放大

收稿日期: 2015-01-25; 修回日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61101145); 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2012ZX03001008); 111 基地基金资助项目 (No.B08038)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61101145), The National Important Science Technology Specific Project (No.2012ZX03001008), The 111 Project (No.B08038)

器提出更高的线性度要求。若放大器的线性度达不到要求,OFDM 信号会因子载波之间的正交性遭到破坏而产生符号间干扰;此外,还会产生额外的带外频谱扩展,导致传输系统整体性能恶化。针对 OFDM 信号峰均比抑制问题已有多种解决方法<sup>[2-5]</sup>,如信号限幅削峰(clipping)、压扩变换、主动星座扩展(ACE, active constellation extension)、选择映射(SLM, selected mapping)、预留子载波(TR, tone reservation)<sup>[6-13]</sup>等。其中,预留子载波 TR 方法以其高效性且无需传送额外边带信息等优势受到了关注,已成为多个无线 OFDM 通信系统标准选项,如欧洲地面数字电视 DVB-T2 标准。

预留子载波方法基本思路是:发送端保留少量不承载数据的子载波作为预留子载波,通过对原始频域信号进行处理以获得削峰信号;再将其经过逆快速傅里叶 IFFT 变换后叠加至原始信号,从而获得低峰均比发射信号。其中,限幅噪声比预留子载波算法(clipping-TR)<sup>[9]</sup>利用限幅噪声信号的范数平方求解关于频域削峰信号的梯度值,能显著降低运算复杂度;但其步长参数为固定值,不能依据信号实际情况自适应地折衷信号峰均比、误码率(BER)及带外功率谱性能;而且其所需迭代优化次数过多、收敛缓慢,并不适宜于高吞吐量的无线传输系统。为此,最小平方估计预留子载波(LSA-TR, least squares approximation-TR)<sup>[10]</sup>利用最小平方估计原理求解最优系数以减小迭代次数,但因其将目标函数逼近转换为凸优化求解问题,导致寻优过程有极高的运算复杂度;且发端需传送加权系数额外信息,降低了系统频谱利用率;此外,简单限幅处理会导致信号带内失真和带外频谱分量的再生。

基于上述技术背景和问题,本文提出一种联合智能梯度映射 ACE 的最小平方估计 TR 峰均比抑制(ACE-TR)算法,基本思想是将主动星座扩展 ACE 处理与预留子载波最小平方估计相结合,通过提升信号的平均功率及修正信号星座分布 2 类手段,获得信号峰均比抑制综合性能的提升。具体地,首先,在原始信号子载波上叠加扩展向量,保持信号峰值功率不变的前提下增加信号平均功率以降低发射信号峰均比;其次,在保证星座点间最小距离不减的条件下,对外围星座点作间隔距离扩展处理,通过增大星座点间的最小欧氏距离改善系统误码率性能。2 类技术手段可以在对系统误码率性能影响较小的条件下,高效抑制

OFDM 信号峰均比;特别是,通过对频域削峰信号做滤波处理,可以有效抑制信号非线性处理带来的带外频谱分量扩展。文中推导了 ACE-TR 算法 PAPR 抑制可达增益理论界及其接收误码率理论值。理论分析与仿真表明,该算法能以较快的收敛速度产生所需的时域削峰信号,可同时获得优异的信号峰均比抑制、误码率损失以及带外功率谱性能,从而有效提升 OFDM 传输系统的整体综合性能。

## 2 OFDM 信号峰均比

每个 OFDM 符号由经过调制的多个独立子载波相互叠加而生成,假设  $X = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$  为 OFDM 频域符号复数向量,其中,  $N$  为并行传输的子载波个数,对  $X_k$  进行  $N$  点快速傅里叶逆变换 IFFT,可得时域 OFDM 调制信号

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

离散 OFDM 时域信号  $x = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T$  的峰值平均功率比定义为

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

其中,  $| \cdot |$  表示信号幅值,  $E[\cdot]$  表示数学期望运算。根据中心极限定理,当  $N$  较大时,信号样点的实部和虚部均服从均值为 0、方差为  $s^2$  的高斯分布;而信号的幅度  $|x_n|$  则服从瑞利分布,其对应的概率密度函数(PDF, probability density function)为<sup>[13]</sup>

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

由于时域 OFDM 符号周期内的各个信号采样值之间不具有相关性,因此,信号样点的 PAPR 值均小于门限值  $PAPR_0$  的概率分布可表述为

$$P\{PAPR < PAPR_0\} = \left(P\{|x_n|^2 < PAPR_0\}\right)^N \quad (4)$$

其中,  $P\{\cdot\}$  为事件的概率。通常,可以采用互补累积分布函数(CCDF, complementary cumulative distribution function)衡量信号峰均比分布,其定义为 OFDM 符号的 PAPR 超过某一特定门限值  $PAPR_0$  的概率。对于  $J(J > 1)$  倍的过采样时域 OFDM 信号,其 CCDF 的计算定义为

$$CCDF(PAPR_0) = P\{PAPR > PAPR_0\} \quad (5)$$

### 3 所提预留子载波方案

图 1 为所提联合智能梯度映射与预留子载波峰均比抑制 ACE-TR 算法信号处理流程。图 2 和图 3 分别为最小平方估计预留子载波处理以及智能梯度映射主动星座扩展处理模块的信号流程。由图 1 可见，首先对原始过采样 OFDM 信号进行限幅操作；再将限幅信号变换至频域，对有效数据子载波进行主动星座扩展 ACE 后再变换到时域；而对预留子载波，则进行最小平方估计和智能梯度映射处理；其间，实时计算信号 PAPR，根据迭代参数判断迭代是否结束：若结束，则获得满足系统峰均比要求的传输信号；否则，继续迭代，由此构成一个循环结构。图中  $m$  为迭代次数，当  $m$  等于最大迭代次数  $M_I$  时，结束迭代。

本算法的信号 PAPR 计算定义为

$$PAPR(x, c) = \frac{\|x + c\|_{\infty}^2}{\frac{1}{JN} \|x + c\|_2^2} \quad (6)$$

其中， $x \in \mathbb{F}^{JN}$  为时域过采样 OFDM 符号， $c \in \mathbb{F}^{JN}$  为时域信号修正值； $\|\cdot\|_k$  表示求向量  $k$ -范数。在每次迭代过程中，主动星座扩展的优化目标定义为

$$\underset{c}{\text{minimize}} \|x + c\|_{\infty} = \underset{c}{\text{minimize}} \|x + QX\|_{\infty} \quad (7)$$

其中， $C \in \mathbb{F}^{JN}$  是时域信号  $c$  通过 FFT 变换之后得到的频域信号， $Q$  为乘以因子  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  之后的  $JN$  点的 IFFT 矩阵，其中， $q_{n,k} = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{j2\pi nk}{JN}\right)$ 。本算法的信号处理步骤描述如下。

步骤 1 将 QAM 信号经插值和 IFFT 变换，得到  $J$  倍过采样 OFDM 信号  $x_n$  ( $n \in [0, JN - 1]$ )。

步骤 2 设置最大迭代次数  $M_I$ ，子载波个数  $N$ ，预留子载波个数  $L$  ( $L < N$ ) 及限幅门限  $A$ 。

步骤 3 将开关  $K_1$  打到 1 端，将一个 OFDM 符号送入循环；设  $m=1$ ，同时  $K_1$  开关及  $K_2$  开端均打到 2 端，开始进入循环迭代处理。

步骤 4 对原始 OFDM 信号  $x_n$  进行时域限幅处理，得到信号  $y_n$ ，即

$$y_n = \begin{cases} x_n, & |x_n| \leq A \\ A \exp(jq_n), & |x_n| > A \end{cases} \quad (8)$$

步骤 5 信号  $y_n$  减去信号  $x_n$ ，得到时域限幅噪声信号  $f_n = y_n - x_n$ ，再将  $y_n$  经过 FFT 变换得到频域限幅噪声信号  $F \in \mathbb{F}^{JN}$ 。

步骤 6 如图 2 所示，将  $F$  中数据子载波位置的数据置零，得到频域信号  $C$ ；而将  $F$  中预留子载波位置的数据置零，得到频域信号  $\mathcal{C}$ ，如图 3 所示。保持  $\mathcal{C}$  中主动星座扩展允许延伸方向的值，而将不能扩展方向的数据置零，得到星座修正后的频域峰值衰减信号  $\bar{C}$ 。 $C$  和  $\bar{C}$  通过 IFFT 变换之后，分别得到时域削峰信号  $c$  和时域峰值衰减信号  $\bar{c}$ 。

步骤 7 利用最小平方估计 LSA 和智能梯度映射处理分别求解出最优系数  $p$  和放大倍数  $m$ ，随后将  $c$  和  $\bar{c}$  分别乘以  $p$  和  $m$  后得到更新的 OFDM 信号样值： $\mathcal{X} = cp + \bar{c}m$ 。

步骤 8 令  $m=m+1$ ，若  $m=M_I$ ，则迭代结束，将开关  $K_2$  打到 1 端，输出信号  $\mathcal{X}$ ，同时返回步骤 3，对下一个 OFDM 符号进行迭代处理；若  $m < M_I$ ，则返回步骤 4，继续进行该符号的迭代优化处理。

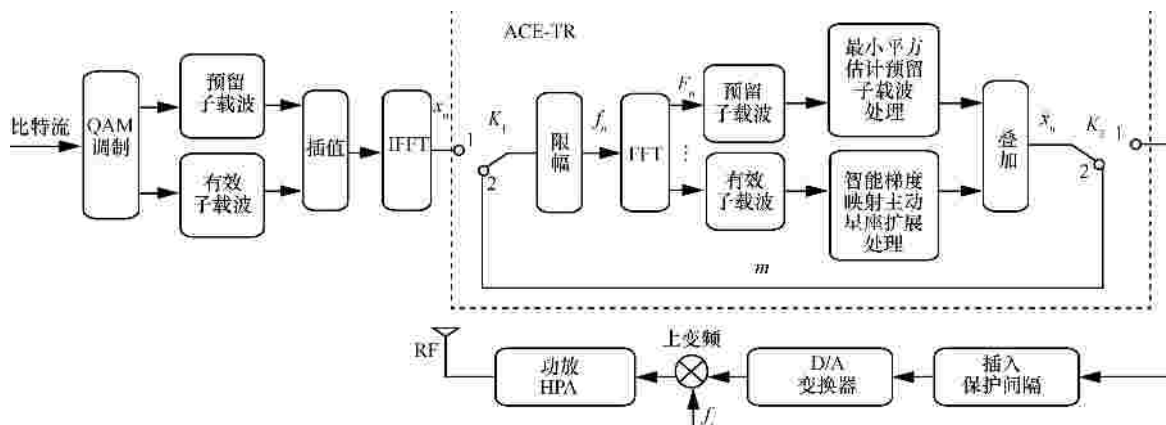


图 1 本文提出的 TR 峰均比抑制算法信号处理流程

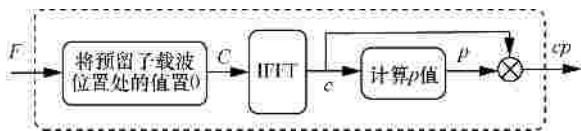


图 2 最小平方估计 LSA 预留子载波处理原理

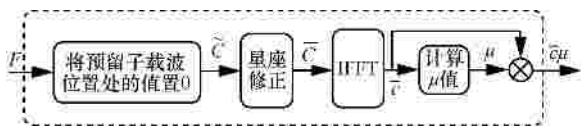


图 3 智能梯度映射主动星座扩展处理原理

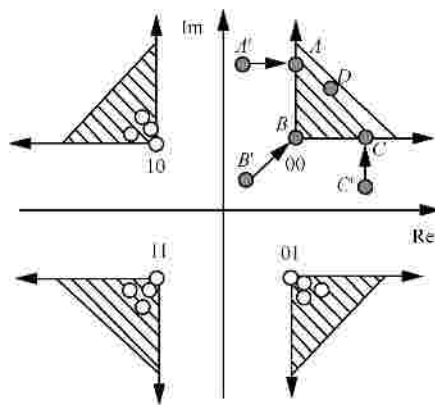
图 4 为步骤 6 主动星座扩展 ACE 处理规则示意，图中阴影区是各个象限中星座点可扩展的区域。若接收符号星座点落在可扩展区域内，则保留其星座点，无需修正；否则，按星座点修正规则处理可扩展区域外星座点。以图 4(a)QPSK 星座第一象限为例： $B$  点为标称星座点；若  $X$  落在  $A'$  点，则  $X$  的虚部不变，将  $A'$  点修正为  $A$  点；若  $X$  落在  $B'$  点，则把  $X$  的实部、虚部分别修正为  $B$  点的实部、虚部，将  $B'$  点修正为  $B$  点；若  $X$  落在  $C'$  点，则  $X$  的实部不变，将  $C'$  点修正为  $C$  点；若  $X$  落在阴影区域内，如  $D$  点则无需修正。简而言之，对于 QPSK 调制，其幅度扩展向量  $C = [C_0, C_1, L, C_{N-1}]$  须满足  $\text{Re}(C_k)\text{Re}(X_k) > 0, \text{Im}(C_k)\text{Im}(X_k) > 0$ ，其中， $\text{Re}(\cdot)$  和  $\text{Im}(\cdot)$  分别为取复数的实部和虚部。对于高阶星座 16QAM 或 64QAM，规则为：最外层的星座点向外扩展；边角星座点向 2 个方向扩展；边界星座点向一个方向扩展；而内部星座点则无需扩展<sup>[12]</sup>。

步骤 7 中最小平方估计 LSA 优化目标定义为  $\min \left\{ \sum_{n \in P} [p|c_n| - |f_n|]^2 \right\}$ ，其中， $g(p) = \sum_{n \in P} [p|c_n| - |f_n|]^2$ 。对函数  $g(p)$  求导数求解最优加权系数  $p$ ，即

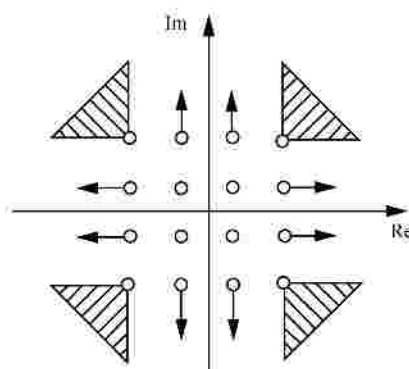
$$\begin{aligned} \frac{g(p)}{p} &= \frac{\partial \left( \sum_{n \in P} [p|c_n| - |f_n|]^2 \right)}{\partial p} \\ &= \frac{\partial \left( \sum_{n \in P} [p^2|c_n|^2 + |f_n|^2 - 2p|c_n||f_n|] \right)}{\partial p} \\ &= 2p \sum_{n \in P} |c_n|^2 - 2 \sum_{n \in P} |c_n||f_n| \end{aligned} \quad (9)$$

再令  $\frac{\partial g(p)}{\partial p} = 0$ ，则

$$p = \frac{\sum_{n \in P} |c_n||f_n|}{\sum_{n \in P} |c_n|^2} \quad (10)$$



(a) QPSK



(b) 16QAM

图 4 ACE 星座扩展区域及规则示意

图 3 中利用智能梯度映射原理求  $m$  值的计算过程为：首先求出信号最大幅值  $E = \max_n |x_n|$  和其对应的最大幅值位置  $n_{\max} = \arg \max_n |x_n|$ ；然后，求解信号

$x_n$  在  $\bar{c}_n$  方向的投影  $\bar{c}_n^{\text{proj}} = \frac{\text{Re}\{x_n \bar{c}_n^*\}}{|x_n|}$ ，则最大幅值点和其他采样点平衡的  $m_n$  值为

$$m_n = \frac{E - |x_n|}{\bar{c}_n^{\text{proj}} - \bar{c}_{n_{\max}}^{\text{proj}}} \quad (11)$$

最后，通过取  $m_n$  中的最小值以获得  $m$  值。

由上述步骤可知，ACE-TR 的运算复杂度主要集中于 IFFT/FFT 变换、放大倍数  $m$  及优化系数  $p$  求解 3 个环节。因后两者运算量远远小于时频域变换，其总体运算复杂度约为  $O(3M_s J N_b J N)$ ，其中， $N$  为子载波个数， $J$  为采样率， $M_s$  为最大迭代次数。传统 clipping-TR<sup>[9]</sup>及凸集投影 POCS-TR<sup>[11]</sup>算法运算复杂度均为  $O(2M_s J N_b J N)$ ，但由于这 2 种算法收敛速度缓慢，通常需  $M_s > 10$  次迭代处理；根据后续分析与仿真可知，ACE-TR 算法  $M_s$  仅需 2~3 次迭代即可达到满意的优化目标，相比较能有效降低运算复杂度和优化时延。而 LSA-TR<sup>[10]</sup>算法的优

化问题若采用标准内点方法求解，则其运算复杂度上界为  $O(N^3 + 2M_r JN \ln JN)$ 。

#### 4 算法性能理论分析

本节分析讨论 ACE-TR 算法的 PAPR 抑制增益、接收 BER 及带外频谱扩展理论性能，可据此并结合系统设计需求来设定优化目标与相关参数初始值，使本算法具备高的适用灵活性。

##### 4.1 可达峰均比理论界

ACE-TR 算法的 PAPR 抑制性能与调制方式选用星座点分布有关。定义  $M$ -QAM 调制的星座点坐标为  $(\pm kd, \pm kd)$ ,  $k = 1, 3, \dots, \sqrt{M}-1$ ，且假设信号星座点等概率分布于整体星座图上，若第  $m$  个星座点的坐标为  $(a_{mc}, a_{ms})$ ，则信号平均功率为

$$d_s^2 = \frac{\sum_{m=1}^M (a_{mc}^2 + a_{ms}^2)}{M} = \frac{4 \sum_{m=1}^{\frac{M}{4}} (a_{mc}^2 + a_{ms}^2)}{M} = \frac{8d^2}{M} \sqrt{\frac{M}{4}} \sum_{m=1}^{\frac{M}{4}} (2m-1)^2 \quad (12)$$

考虑到  $\sum_{m=1}^N (2m-1)^2 = \frac{N(2N-1)(4N-1)}{3}$ ，可将

$d_s^2$  可以化简为  $\frac{2d^2(\sqrt{M}-1)(2\sqrt{M}-1)}{3}$ 。由 Parseval 定理<sup>[14]</sup>可知，时域 OFDM 符号的信号平均功率为

$$E \{ |x(n)|^2 \} = \frac{2d^2(\sqrt{M}-1)(2\sqrt{M}-1)}{3N} \quad (13)$$

时域 OFDM 信号的峰值功率为

$$\max_{0 \leq n \leq JN-1} |x(n)|^2 = \max_{0 \leq n \leq JN-1} \left| \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j2pkn}{JN}\right) \right|^2 \quad (14)$$

鉴于 OFDM 信号的峰值平均功率小于信号最大峰值，有

$$\max_{0 \leq n \leq JN-1} |x(n)|^2 \leq \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (\max_k |X_k|)^2 \quad (15)$$

若所有子载波上的符号同相则 PAPR 值最大，所以信号峰值功率的最大取值为  $\hat{P}_{\max} = 2d^2(\sqrt{M}-1)^2$ 。

同样由式(13)可知，信号峰值功率的最小取值为

$\hat{P}_{\min} = \frac{2d^2}{N}$ 。因此，ACE-TR 算法最终可获得的信号

PAPR 可达理论界为

$$\frac{3}{(\sqrt{M}-1)(2\sqrt{M}-1)} \text{PAPR} = \frac{3(\sqrt{M}-1)N}{(2\sqrt{M}-1)} \quad (16)$$

进一步，可得 ACE-TR 算法在采用  $M$ -QAM 调制时可获得信号峰均比 CCDF 理论界为

$$1 - \left( 1 - \exp \left[ - \left( 10 \lg \frac{3(\sqrt{M}-1)N}{(2\sqrt{M}-1)} \right) \right] \right)^{JN} \text{CCDF} = 1 - \left( 1 - \exp \left[ - \left( 10 \lg \frac{3}{(\sqrt{M}-1)(2\sqrt{M}-1)} \right) \right] \right)^{JN} \quad (17)$$

##### 4.2 系统误码率损失

对于  $M=2^k$  进制的矩形 QAM 调制星座，若  $k$  为偶数，则矩形信号星座图等价于 2 个脉冲幅度调制 PAM 信号，2 个 PAM 信号均有  $\sqrt{M}=2^{\frac{k}{2}}$  个信号点。为了简化计算，利用 PAM 的误码率确定 QAM 的误码率， $\sqrt{M}$  进制 PAM 的高斯信道误码率为

$$P_{\sqrt{M}} = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left( \sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{E_{av}}{N_0}} \right) \quad (18)$$

其中， $\frac{E_{av}}{N_0}$  为平均信噪比，因此  $M$  进制 QAM 的正确判决概率为  $P_c = (1 - P_{\sqrt{M}})^2$ ，进一步可以得到  $M$  进制 QAM 的高斯信道误码率理论值为

$$P_M = 1 - (1 - P_{\sqrt{M}})^2 \quad (19)$$

##### 4.3 带外功率谱扩展

由于 ACE-TR 算法包含有限幅、叠加等非线性信号处理过程，因此会导致一定的信号带内失真和带外频谱扩展。如图 2 和图 3 及步骤 6 所示，在每次的迭代逼近过程中，反复对频域削峰信号的有效子载波部分进行了数据置零处理，该处理过程简单直观，但非常有效，可有效保证在随后的时域叠加时不会影响到 OFDM 传输信号的有效数据子载波数据。因此，ACE-TR 算法能够有效降低其各个环节非线性信号处理所带来的带内失真和带外频谱再生效应，从而获得优异的带外功率谱性能。

#### 5 仿真结果及分析

本节对所提 ACE-TR 算法综合性能进行仿真验

证。系统仿真条件与参数设置：采用未编码无线 OFDM 系统，子载波个数  $N=1024$ ，预留子载波个数  $L=54$ ；星座采用 QPSK 和 16QAM；信号过采样因子  $J=4$ ；OFDM 符号数量  $s=1000$ 。为便于性能比较，对现有 4 种相关的峰均比抑制算法也进行了仿真，包括：限幅噪声比 TR 算法(clipping-TR)<sup>[9]</sup>、最小平方估计 TR 算法(LSA-TR)<sup>[10]</sup>、凸集投影 TR 算法(POCS-TR)<sup>[11]</sup>、智能梯度映射主动星座扩展算法(SGP-ACE)<sup>[12]</sup>。

图 5 为所提算法在不同迭代次数条件下得到的 OFDM 输出信号 CCDF 曲线。当  $CCDF=10^{-3}$  时，所提 ACE-TR 算法在 1 次迭代之后 PAPR 即可降至 7.7 dB，2 次迭代后为 7 dB，分别优于 SGP-ACE、LSA-TR、clipping-TR、POCS-TR 算法 0.7 dB、1.0 dB、3.0 dB、3.4 dB；而且所提算法的 CCDF 曲线下降更为陡峭。此外，虽然迭代次数的增加能提高 PAPR 抑制性能，但当迭代次数超过 4 次后，抑制效果逐渐开始放缓；图 5 中还给出了根据式 (17) 所得到的 CCDF 理论值下界，可见随着迭代次数增加逐渐逼近该门限。但需要注意的是，过多的迭代次数意味着优化时延的增加，因此可根据实际系统需求灵活选择迭代次数。

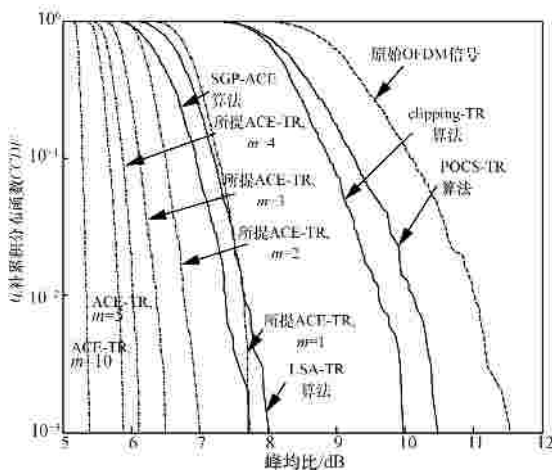


图 5 5 种峰均比抑制算法 CCDF 曲线(QPSK 调制)

图 6 和图 7 分别为 5 种不同峰均比抑制算法采用 QPSK 和 16 QAM 星座时经过高斯 AWGN 信道的接收信号 BER 性能曲线，为了便于比较，还列出了 2 种调制方式的 BER 理论界。由图 6 可见，所提 ACE-TR 算法的 BER 性能随迭代次数的增加有一定的退化。在  $BER=10^{-4}$  时，ACE-TR 算法在迭代 2 次后，其 BER 性能略差于其他 4 种参考算法 0.2~0.4 dB，但对比图 5 其可获得的 PAPR 增益，可

知 ACE-TR 算法在一定的信号带内失真条件下，具有更为高效的峰均比抑制能力。对于高阶 16QAM 星座，由图 7 可见 ACE-TR 算法在 2 次迭代后获得的误码率性能较优，特别是远优于 SGP-ACE 算法，有效克服了其对高阶星座失真敏感的问题。图 8 为 QPSK 星座信号通过莱斯频率选择性衰落信道<sup>[15]</sup>的接收信号 BER 性能仿真曲线，可见其性能与在 AWGN 信道的表现一致。

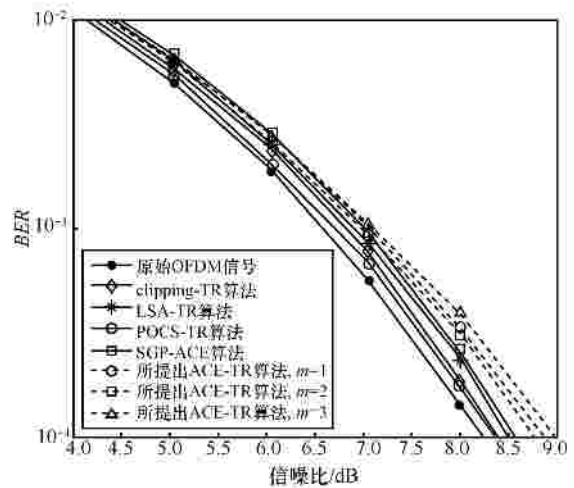


图 6 5 种峰均比抑制算法 BER 曲线(QPSK, AWGN 信道)

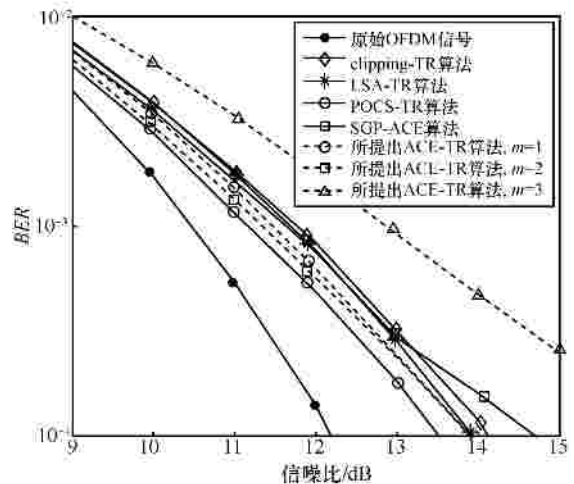


图 7 5 种峰均比抑制算法 BER 曲线(16QAM, AWGN 信道)

图 9 为采用 5 种不同算法的 OFDM 调制器输出信号功率谱密度(PSD, power spectral density)曲线。SGP-ACE 算法的带外性能最为恶劣；由于 ACE-TR 算法通过对频域削峰信号的有效子载波作置零处理，有效缓解了限幅导致的带外频谱分量扩展，可获得与原始 OFDM 信号几乎相近的带外频谱性能，优于其他 3 类 TR 参考算法。例如，在归一化频率 0.4 附近，ACE-TR 带外衰减可达到 45 dB 以上，满足射

频发射谱形要求。

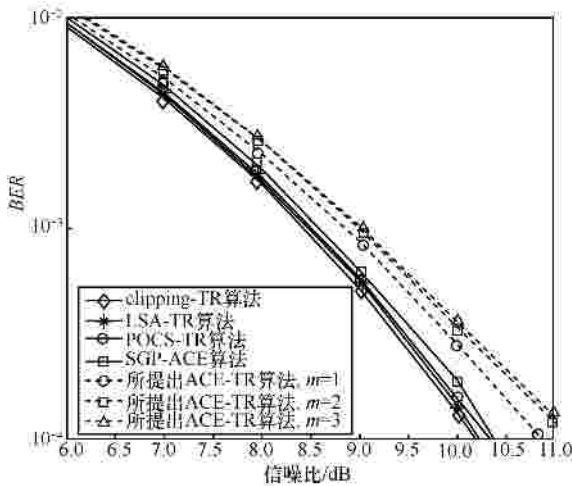


图 8 5 种峰均比抑制算法 BER 曲线(QPSK, Rician 信道)

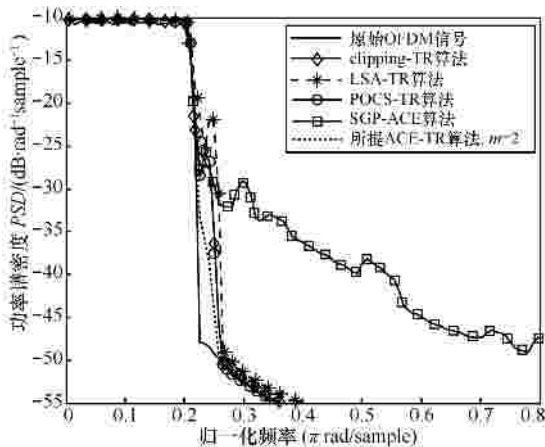


图 9 5 种峰均比抑制算法输出信号 PSD 曲线(QPSK)

### 6 结束语

针对传统预留子载波技术信号峰均比抑制效率低的问题，提出一种联合智能梯度映射 ACE 的预留子载波 OFDM 信号峰均比抑制算法。该算法将 ACE 处理与预留子载波最小平方估计相结合，通过提升信号的平均功率及修正信号星座分布 2 类手段，对信号 PAPR 和 BER 性能进行联合迭代优化，在降低信号 PAPR 的同时对信号带内失真进行控制；并在迭代过程有效消除由信号畸变所导致的带外频谱再生；此外，算法能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。本文推导了该算法可获得的 CCDF 性能理论界和接收端信号误码率理论闭式。仿真结果验证了 ACE-TR 算法的有效性，其综合性能优于现有各类预留子载波 TR 算法。

### 参考文献：

- [1] WANG T H, YANG C, WU G, et al. 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] WANG Y, LUO Z. Optimized iterative clipping and filtering for PAPR reduction of OFDM signals[J]. IEEE Trans Commun, 2010, 59(1): 33-37.
- [4] 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.
- [5] BAE K, ANDREWS J G, POWERS E J. Adaptive active constellation extension algorithm for peak-to-average ratio reduction in OFDM[J]. IEEE Commun Letters, 2010, 14(1): 39-41.
- [6] KRONGOLD B S, JONES D L. An active-set approach for OFDM PAR reduction via tone reservation [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2004, 52(2): 495-509.
- [7] WANG L, TELLAMBURA C. Analysis of clipping noise and tone-reservation algorithms for peak reduction in OFDM systems [J]. IEEE Trans Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1675-1694.
- [8] PARK K, PARK I C. Low-complexity tone reservation for PAPR reduction in OFDM communication systems [J]. IEEE Trans Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2012, 20(10): 1919-1923.
- [9] TELLADO-MOURELO J. Peak to average power reduction for multicarrier modulation[D]. Stanford University, 1999.
- [10] LI H, JIANG T, ZHOU Y. An improved tone reservation scheme with fast convergence for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Trans Broadcasting, 2011, 57(4): 902-906.
- [11] COMBETTES P L. Convex set theoretic image recovery by extrapolated iterations of parallel subgradient projections[J]. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(4): 493-506.
- [12] KRONGOLD B S, JONES D L. PAR reduction in OFDM via active constellation extension [J]. IEEE Trans Broadcasting, 49(3): 258-268.
- [13] WANG Y, WANG L H, GE J H. An efficient nonlinear companding transform for reducing PAPR of OFDM signals[J]. IEEE T ns Broadcasting, 2012, 58(4): 677 -684.
- [14] BANELLI P, CACOPARDI S. Theoretical analysis and performance of OFDM signals in nonlinear AWGN channels[J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48(3): 430-441.
- [15] ETSI EN 300 744 v1.4.1. Digital video broadcasting: framing structure, channel coding, and modulation for digital terrestrial television[S]. 2001.

### 作者简介：



刘芳 (1990-)，女，湖北荆州人，西安电子科技大学硕士生，主要研究方向为无线 OFDM 信号峰均比抑制技术。

王勇 (1976-)，男，陕西西安人，西安电子科技大学教授、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。