



OFDM系统中基于最优阈值ACE的PAPR抑制

吴群 周晓 王成优

PAPR reduction based on optimal threshold ACE in OFDM system

WU Qun, ZHOU Xiao, WANG Cheng-you

引用本文:

吴群, 周晓, 王成优. OFDM系统中基于最优阈值ACE的PAPR抑制[J]. 工程科学学报, 2023, 45(1): 150–157. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.06.15.001

WU Qun, ZHOU Xiao, WANG Cheng-you. PAPR reduction based on optimal threshold ACE in OFDM system[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(1): 150–157. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.06.15.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.06.15.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

迭代生成微分方程分解方法研究

Decomposition method of iterated generating differential equation

工程科学学报. 2017, 39(10): 1575 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.10.017>

基于人机协同的车道保持辅助系统研究进展

Overview of lane-keeping assist system based on humanmachine cooperative control

工程科学学报. 2021, 43(3): 355 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.13.001>

基于SiC功率器件的大功率DC-DC变换器

High-power DC-DC converter based on SiC power device

工程科学学报. 2017, 39(8): 1224 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.08.012>

基于双维度搜索的地下自主铲运机最优转弯轨迹规划

Optimal turning trajectory planning of an LHD based on a bidimensional search

工程科学学报. 2021, 43(2): 289 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.11.09.002>

基于周期势系统随机共振的轴承故障诊断

Bearing fault diagnosis by stochastic resonance method in periodical potential system

工程科学学报. 2018, 40(8): 989 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.08.013>

迭代广义短时Fourier变换在行星齿轮箱故障诊断中的应用

Application of iterative generalized short-time Fourier transform to fault diagnosis of planetary gearboxes

工程科学学报. 2017, 39(4): 604 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.04.016>

OFDM 系统中基于最优阈值 ACE 的 PAPR 抑制

吴 群, 周 晓[✉], 王成优

山东大学机电与信息工程学院, 威海 264209

✉通信作者, E-mail: zhouxiao@sdu.edu.cn

摘 要 动态星座图扩展 (Active constellation extension, ACE) 是一种能够有效降低正交频分复用 (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 系统峰均功率比 (Peak-to-average power ratio, PAPR) 的方法, 为解决现有 ACE 算法因选择固定限幅阈值而限制降低 PAPR 效果的问题, 提出一种最优阈值 ACE (Optimal threshold ACE, OTACE) 算法, 该算法能在每次迭代时根据信号功率求得最合适的限幅阈值, 从而增强抑制 PAPR 的效果. 通过数据拟合得到合适的迭代次数, 在此基础上对 OTACE 算法抑制 PAPR 的效果进行了仿真分析, 仿真结果表明, 与凸集映射 (Projection onto convex sets, POCS) 和智能梯度投影 (Smart gradient projection, SGP) 算法相比, OTACE 分别能提高 5 dB 和 3 dB 左右的 PAPR 增益. 在广电 1、广电 6 和巴西 A 三种信道下, 分别在多普勒频移为 20 Hz 和 60 Hz 时测试 OTACE 算法对系统误码率 (Bit error rate, BER) 的影响. 实验结果显示, 采用 OTACE 可提高系统的 BER 性能, 并且与 POCS 相比, OTACE 可提高 1 dB 左右的信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) 增益; 与 SGP 相比, OTACE 在高 SNR 时有明显的优势.

关键词 正交频分复用; 峰均功率比; 动态星座图扩展; 迭代; 阈值

分类号 TN911.2

PAPR reduction based on optimal threshold ACE in OFDM system

WU Qun, ZHOU Xiao[✉], WANG Cheng-you

School of Mechanical, Electrical and Information Engineering, Shandong University, Weihai 264209, China

✉ Corresponding author, E-mail: zhouxiao@sdu.edu.cn

ABSTRACT Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology, which can divide the frequency selective fading channel into multiple flat fading sub-channels, is widely used in wireless communication systems because of its robustness to frequency selectivity in wireless channels and the ability to mitigate multipath fading that causes inter-symbol interference. Therefore, it has become one of the key technologies of 5G mobile communication. However, it has a serious shortcoming, i.e., the high peak-to-average power ratio (PAPR), especially when the number of subcarriers is large. High PAPR will make the high-power amplifier work in its nonlinear region, leading to inter-modulation interference among subcarriers and out-of-band interference of OFDM signals. Active constellation extension (ACE) reduces the PAPR of OFDM signals effectively by extending external constellation points outwards. Most of the ACE algorithms currently used set a fixed threshold to limit the amplitude of the OFDM signal during the iteration. As the statistical characteristics of OFDM signals will change after each iteration, the same threshold will reduce the ability of the method to suppress the PAPR of OFDM systems. To solve this problem, an optimal threshold ACE (OTACE) method is proposed, which can determine an appropriate threshold according to the signal power at each iteration to enhance the performance of PAPR reduction. The appropriate number of iterations is obtained by data fitting, and on this basis, the impact of the OTACE algorithm in suppressing the PAPR is simulated and analyzed. The simulation results demonstrate that compared with POCS and SGP, OTACE can increase the

收稿日期: 2021–06–15

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2022MF256); 山东省自然科学基金创新发展联合基金资助项目 (ZR2021LZH003); 国家自然科学基金资助项目 (61702303); 山东大学 (威海) 科研训练计划资助项目 (A21246, A22085)

performance to reduce PAPR by approximately 5 dB and 3 dB gains, respectively. Under the CDT 1, CDT 6, and Brazil A channels, the impact of the OTACE algorithm on the bit error rate (BER) is tested when the Doppler frequency shift is 20 Hz and 60 Hz, respectively. The experimental results show that the OTACE can achieve better BER performance. Compared with POCS, OTACE has about 1 dB signal-to-noise ratio (SNR) gain in BER performance. OTACE has obvious advantages over SGP at a high SNR.

KEY WORDS orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); peak-to-average power ratio (PAPR); active constellation extension (ACE); iteration; threshold

正交频分复用 (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术作为 5G 移动通信的关键技术之一, 因其优越的性能和较高的频谱效率^[1]在现代无线通信系统中得到了普遍应用^[2]。但其也存在不足之处, 例如具有较高的峰均功率比^[3-4] (Peak-to-average power ratio, PAPR), 尤其是在子载波数较多的情况下^[5]。OFDM 调制是将子载波信号在时域进行叠加, 若子载波的相位相同, 则会产生较高的时域峰值, 从而导致 PAPR 过高, 过高的 PAPR 会使发射机的功率放大器工作在非线性区域, 引起信号互调干扰^[6]。目前, OFDM 系统中降低 PAPR 的方法有: 选择映射 (Selected mapping, SLM) 法^[7-8], 部分传输序列 (Partial transfer sequence, PTS) 法^[9-10]和子载波预留 (Tone reservation, TR) 法^[11-12]。如今 5G 带给人们生活便利的同时面临着频谱资源匮乏的问题^[13], 而 SLM 法需要将扰码序列告知接收端才可恢复信号, PTS 法要向接收端发送分块方式和相位因子信息, TR 法只能选择一部分子载波传输数据信息, 其他子载波插入预定的冗余数据, 这都会额外增加系统的开销, 浪费频带资源。随着深度学习的广泛应用^[14], 也出现了一些基于深度学习的抑制 PAPR 方法的研究^[15-16], 但该类方法需要耗费大量时间训练网络模型^[17]。动态星座图扩展 (Active constellation extension, ACE) 法^[18-22]不会额外占用带宽, 且操作方便, 是一种直接有效降低 PAPR 的方法。

ACE 是将星座空间中最外层的星座点动态地向外扩展, 增大该星座点与其他星座点之间的距离, 从而降低信号的 PAPR。该方法的缺点是信号的平均功率会因星座点之间距离的增大而变大, 但由于其实现简单且在接收端不需要进行额外操作, 因此被广泛应用于降低信号的 PAPR。Jones 等^[18]提出一种求次优解的凸集映射 (Projection onto convex sets, POCS) 方法, 用来解决使用 ACE 方法降低信号 PAPR 时二次优化复杂度较高的问题, POCS 算法能够绝对收敛, 但收敛速度较慢。在 POCS 算法的基础上, Samayoa 等^[19]提出了修正后的 ACE 算法, 在迭代时对扩展之后的频域信号

与初始信号之差引入一个修正因子进行优化。针对 POCS 算法收敛速度慢的问题, Krongold 等^[20]提出了智能梯度投影 (Smart gradient projection, SGP) 方法, SGP 算法比 POCS 算法收敛速度快且简化了迭代, 在一定程度上降低了计算复杂度。Li 等^[21]提出了一种基于 ACE 和联合时空选择性映射的低复杂度 SLM 方法, 用于降低空时分组码多输入多输出 OFDM 系统的 PAPR。Liu 等^[22]提出了一种凸集到凸集的 ACE 方案用来优化迭代过程, 从而降低计算复杂度。

基于 ACE 抑制 PAPR 的算法主要有两个部分: 限幅和星座扩展。限幅阈值的大小决定了限幅后信号的优劣, 若取值过大, 则无法有效抑制 PAPR; 若取值过小, 又会使信号引入过多的限幅噪声, 从而导致信号失真严重。现有的 ACE 算法大多是设置固定的阈值^[18-20], 但迭代后信号的统计特性会发生改变, 因此设置固定阈值在一定程度上限制了抑制 PAPR 的性能。针对这一问题本文提出了最优阈值 ACE (Optimal threshold ACE, OTACE) 方法, 在每次迭代时动态改变信号限幅阈值, 构建一个优化问题并求解得到可以取得的最小阈值, 在提高 ACE 算法降低信号 PAPR 的能力的同时, 尽可能少地提升信号的平均功率。以正交相移键控 (Quadrature phase shift keying, QPSK) 调制为例, 采用互补累计分布函数 (Complementary cumulative distribution function, CCDF) 来描述系统 PAPR 的分布概率, 在单输入单输出 OFDM (Single input single output-OFDM, SISO-OFDM) 系统中针对使用 OTACE 算法前后对系统误码率 (Bit error rate, BER) 的影响进行仿真实验, 并采用最小二乘 (Least square, LS) 算法^[23]和线性最小均方误差 (Linear minimum mean square error, LMMSE) 算法^[24]进行信道估计, 实验结果表明该算法能够在有效抑制 OFDM 系统 PAPR 的同时提高系统的 BER 性能。

1 OFDM 系统模型

带有抑制 PAPR 模块的 OFDM 系统框图如图 1 所示。在发送端, 先将输入比特流调制为不同的复

数符号, 然后运用 ACE 算法抑制调制信号的 PAPR, 再对信号进行串并转换 (Serial to parallel, S/P), 插入导频子载波, 经快速傅里叶逆变换 (Inverse fast Fourier transform, IFFT) 后, 在每一个 OFDM 符号前添加循环前缀 (Cyclic prefix, CP) 以抑制符号间干扰, 最后对信号进行并串变换 (Parallel to serial,

P/S), 发送到具有加性高斯白噪声 (Additive white Gaussian noise, AWGN) 的多径信道中. 在接收端, 接收到的信号经 S/P, 去除 CP, 快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 后, 提取导频用于信道估计, 根据估计出的信道信息对接收符号进行均衡, 最后解调得到输出比特流.

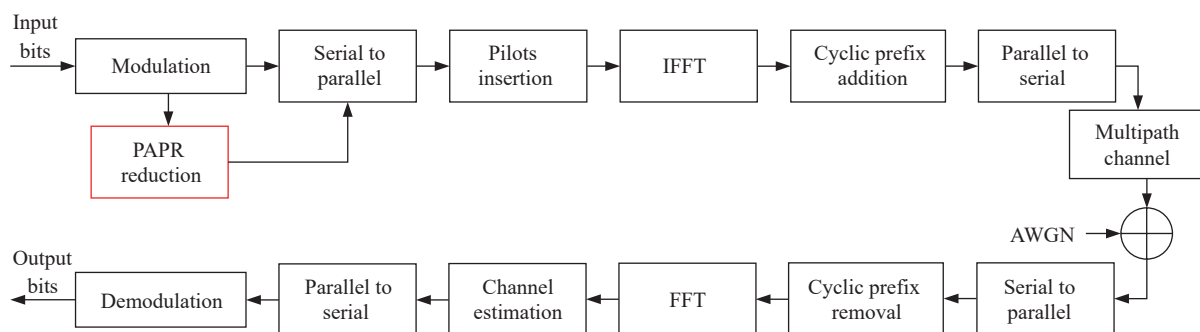


图 1 具有 PAPR 抑制的 OFDM 系统模型

Fig.1 OFDM system model with PAPR reduction

假设一个 OFDM 系统有 N 个子载波, 调制到第 k 个子载波上的复数符号为 X_k , N 个子载波上的信号相加得到 OFDM 调制后的时域信号为:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (1)$$

其中, j 表示虚数单位, n 表示时域的第 n 个采样点. 信号的 PAPR 可表示成^[4]:

$$P_{\text{PAPR}} = 10 \log_{10} \frac{\max\{|x(n)|^2\}}{E\{|x(n)|^2\}} \quad (2)$$

其中, $\max\{\cdot\}$ 表示取最大值运算, $E\{\cdot\}$ 表示取均值运算.

2 传统 ACE 算法

2.1 POCS 算法

POCS 算法可看成在两个凸集 C_1 和 C_2 之间通过不断迭代寻找最优解的过程. 第 i 次迭代的算法流程图如图 2 所示.

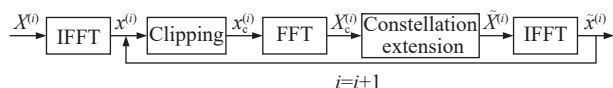


图 2 POCS 算法流程图

Fig.2 Specific process of POCS algorithm

集合 C_1 的作用可看成图 2 中的限幅和 FFT 变换. 限幅是将所有大于阈值 A 的信号幅值都缩小到 A , 同时相位保持不变, 即^[19]:

$$x_c^{(i)}(n) = \begin{cases} x^{(i)}(n), & |x^{(i)}(n)| \leq A \\ A e^{j\theta(n)}, & |x^{(i)}(n)| > A \end{cases} \quad (3)$$

其中, $x^{(i)}(n) = |x^{(i)}(n)| e^{j\theta(n)}$, $\theta(n)$ 表示辐角, $x^{(i)}(n)$ 和 $x_c^{(i)}(n)$ 分别表示第 i 次迭代时限幅前、后的第 n 个 OFDM 符号. 在对 $x_c^{(i)}$ 进行 FFT 运算时, 可令^[19]:

$$x_c^{(i)} = x^{(i)} + c^{(i)} \quad (4)$$

其中, $x^{(i)}$ 和 $x_c^{(i)}$ 分别表示限幅前、后的信号, $c^{(i)}$ 是限幅时被削掉的部分, 其元素可表示成:

$$c^{(i)}(n) = \begin{cases} 0, & |x^{(i)}(n)| \leq A \\ (A - |x^{(i)}(n)|) e^{j\theta(n)}, & |x^{(i)}(n)| > A \end{cases} \quad (5)$$

因为 $c^{(i)}$ 中只有少量的非零元素, 所以通过式 (4) 可以将对 $x_c^{(i)}$ 的 FFT 运算变成对 $c^{(i)}$ 的 FFT 运算, 从而简化计算.

集合 C_2 的作用可看成图 2 中的星座扩展和 IFFT 变换. 星座扩展是将所有内部星座点还原到原始位置, 外部星座点移动到可扩展区域内. 扩展后的信号经 IFFT 变换后再次映射到 C_1 进行限幅, 直至达到最大迭代次数或所有时域信号的幅值都小于阈值 A 时停止.

2.2 SGP 算法

POCS 算法收敛速度较慢, SGP 算法通过设置加权因子 μ 对削掉的信号进行缩放, 从而加快收敛速度, 即^[20]:

$$x_c^{(i)} = x^{(i)} + \mu c^{(i)} \quad (6)$$

获取 μ 的具体步骤^[20] 为:

(1) 计算时域信号 x 的幅度最大值及其对应位置, 即:

$$B = \max_{n=0,1,\dots,N-1} \{|x(n)|\} \quad (7)$$

$$n_{\max} = \arg \max_n \{|x(n)|\} \quad (8)$$

其中, 式 (8) 表示找到使 $|x(n)|$ 取最大值的 n .

(2) 计算 $c(n)$ 在 $x(n)$ 上的投影 $c_p(n)$, 即:

$$c_p(n) = \frac{\text{Re}\{x(n)c^*(n)\}}{|x(n)|} \quad (9)$$

其中, $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部, $(\cdot)^*$ 表示取共轭.

(3) 根据 $c_p(n)$ 计算加权因子集合 $\beta(n)$, 即:

$$\beta(n) = \frac{B - |x(n)|}{c_p(n) - c_p(n_{\max})} \quad (10)$$

(4) 选择最小的 $\beta(n)$ 作为加权因子 μ , 若 μ 小于零, 则停止算法.

3 OTACE 算法

由于信号的统计特性在迭代后会发生改变, 使用同一个限幅阈值会降低抑制 PAPR 的能力, 为此本文提出一种在迭代时寻找最优阈值的 OTACE 方法, 构建一个关于阈值 A 的函数, 通过求解该函数得到每次迭代时所需的最优阈值. 目标函数可表示成:

$$A_{\text{opt}} = \arg \min_A \log_{10} \frac{\max\{|z^{(i)}(n)|^2\}}{\mathbb{E}\{|z^{(i)}(n)|^2\}} \quad (11)$$

其中, A_{opt} 表示 A 的最优解; $\mathbb{E}\{\cdot\}$ 表示取均值运算; $z^{(i)}(n)$ 表示一个复数, 且有:

$$z^{(i)}(n) = \begin{cases} x^{(i)}(n) + \mu c^{(i)}(n), & |x^{(i)}(n) + \mu c^{(i)}(n)| \leq A \\ A \frac{x^{(i)}(n) + \mu c^{(i)}(n)}{|x^{(i)}(n) + \mu c^{(i)}(n)|}, & |x^{(i)}(n) + \mu c^{(i)}(n)| > A \end{cases} \quad (12)$$

其中, 式 (11) 表示找到使 $\log_{10} \frac{\max\{|z^{(i)}(n)|^2\}}{\mathbb{E}\{|z^{(i)}(n)|^2\}}$ 取最小值的 A , 其可化简为:

$$A_{\text{opt}} = \arg \min_A \frac{\max\{|z^{(i)}(n)|^2\}}{\mathbb{E}\{|z^{(i)}(n)|^2\}} \quad (13)$$

求解 A_{opt} 的具体过程如算法 1 所示.

对信号进行限幅的目的是消除信号的尖峰, 所以阈值 A 可能取到的最大值是信号的峰值, 若阈值小于信号的均值, 则信号会因削波过多而导致严重失真, 因此 A 可能取到的最小值是信号的均值. OTACE 算法在每次迭代时选择最小的 A 作为阈值, 能够尽可能较少地提升传输信号的平均功率.

Algorithm 1 Searching the optimal threshold

Variable declaration:

A_{array} : Array of all possible values of the threshold

S : Size of A_{array}

L : Total number of OFDM symbols

M_P : Average signal power after clipping

P_P : Maximum signal power after clipping

A_{opt} : Optimal threshold

Searching procedure:

for $s = 1 : S$ do

for $n = 1 : L$ do

calculate $z(n)$ according to (12)

end for

$M_P(s) = \mathbb{E}\{|z(n)|^2\}$

$P_P(s) = \max\{|z(n)|^2\}$

$R(s) = \frac{P_P(s)}{M_P(s)}$

$M = R(1)$

if $M > R(s)$

$M = R(s)$

$k = s$

end if

end for

$A_{\text{opt}} = A_{\text{array}}(k)$

Output A_{opt}

4 仿真结果与分析

4.1 评价指标

本文采用 CCDF 曲线描述系统抑制 PAPR 的能力. 令 N 表示系统的子载波数, T 表示某一确定的门限 PAPR 值, r_{PAPR} 表示信号的 PAPR, $P[r_{\text{PAPR}}(s_k) > T]$ 表示第 k 个符号 s_k 的 PAPR 大于 T 的概率, 则 CCDF 可定义为^[22]:

$$P_{\text{CCDF}} = P[r_{\text{PAPR}}(s_k) > T] = 1 - (1 - e^{-T})^N \quad (14)$$

采用 BER 曲线描述系统的误码率性能, BER 可表示为:

$$r_{\text{BER}} = \frac{N_E}{N_T} \quad (15)$$

其中, N_E 为错误比特数, N_T 为发送比特数.

4.2 CCDF 性能分析

图 3 给出了在 $N = 256$ 时 OTACE 算法在不同迭代次数下的 CCDF 曲线, 从图 3 可知, 迭代次数越多, 抑制 PAPR 的性能越好, 但运算所需时间也会变长. 通过 MATLAB 拟合得到 PAPR 增益 g_{PAPR} 与迭代次数 i 之间的函数关系大致可表示为:

$$g_{\text{PAPR}} = 2.7e^{-0.34i} \quad (16)$$

由式 (16) 可知, g_{PAPR} 是关于 i 的单调递减函数, 且当 $i > 7$ 时, $g_{\text{PAPR}} < 0.2$, PAPR 增益增长得尤为缓慢, 权衡程序运行时间与 PAPR 增益, 本文选定迭代次数为 7.

对使用 OTACE、POCS 和 SGP 抑制 PAPR 的效果进行仿真实验, 采用 QPSK 调制方式, 仿真的 OFDM 符号数为 5000, 子载波数 $N = 256, 512, 1024$

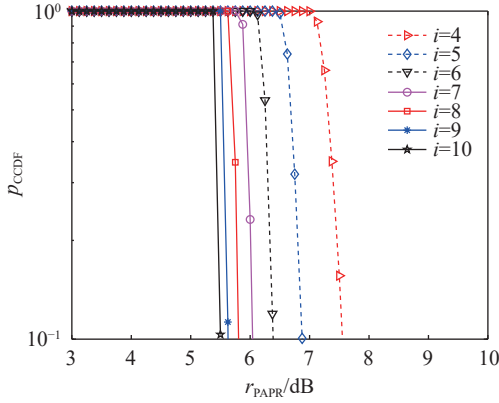
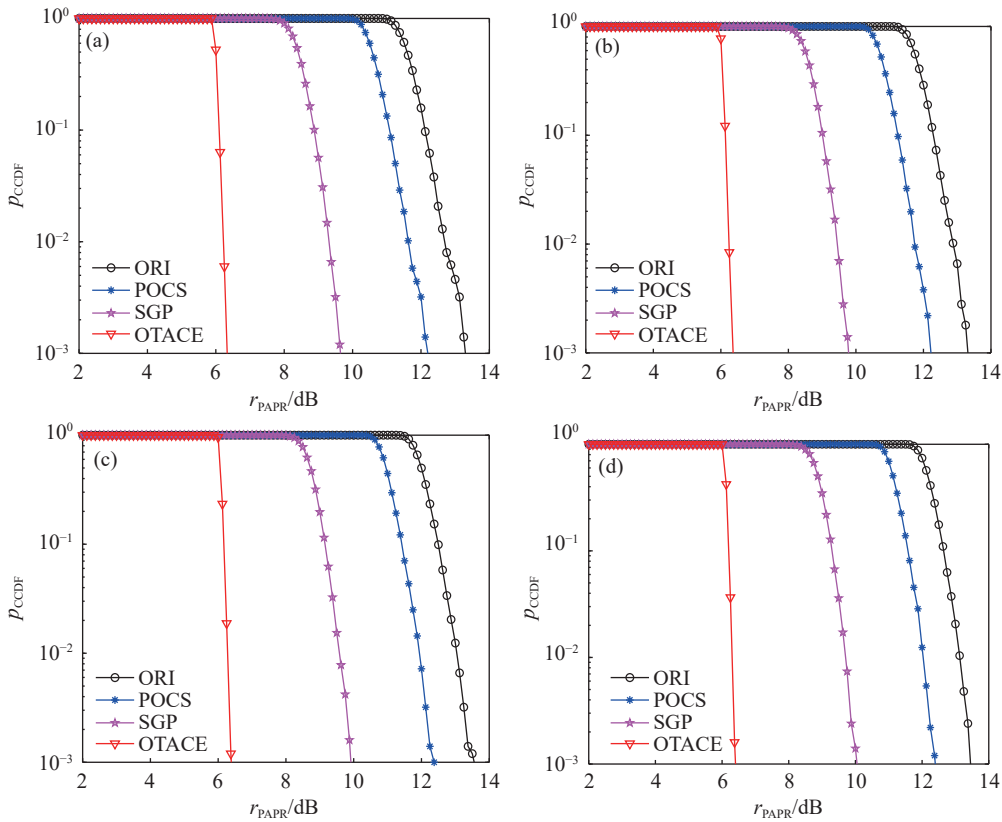


图 3 不同迭代次数下的 CCDF 曲线

Fig.3 CCDF curves under different iteration times

图 4 不同子载波数下的 CCDF 曲线. (a) $N = 256$; (b) $N = 512$; (c) $N = 1024$; (d) $N = 2048$ Fig.4 CCDF curves under different subcarriers: (a) $N = 256$; (b) $N = 512$; (c) $N = 1024$; (d) $N = 2048$

均采用 LS 和 LMMSE 算法进行信道估计. 仿真实验的具体参数设置见表 1, 在广电 1(China digital television test 1st, CDT 1)^[25]、广电 6(China digital television test 6th, CDT 6)^[26] 和巴西 A(Brazil A)^[27] 三种信道下的 BER 性能曲线分别如图 5、图 6 和图 7 所示, 其中图 5、图 6 和图 7 中的 LS-ORI 和 LMMSE-ORI 曲线分别代表在发送端不进行 PAPR 抑制的曲线.

从图 5、图 6 和图 7 可知, 在信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) $r_{\text{SNR}} \leq 14$ dB 时, 使用三种算法对

和 2048 时的 CCDF 曲线仿真结果分别如图 4(a) ~ (d) 所示.

当 $p_{\text{CCDF}} = 10^{-2}$ 时, 对比 POCS 和 SGP 算法, 在图 4(a) 中, OTACE 的 PAPR 增益分别为 5.41 dB 和 3.1 dB, 图 4(b) 中, OTACE 的 PAPR 增益分别为 5.54 dB 和 3.23 dB, 图 4(c) 中, OTACE 分别获得 5.66 dB 和 3.29 dB 的 PAPR 增益, 图 4(d) 中, OTACE 分别获得 5.74 dB 和 3.4 dB 的 PAPR 增益.

4.3 BER 性能分析

将 OTACE 算法用于 OFDM 系统, 测试它对 BER 性能的影响, 并与 POCS 和 SGP 算法进行对比. 为了进行客观、公正、全面的评价, 以上三种算法中

BER 的影响不大, 但当 $r_{\text{SNR}} > 14$ dB 时, 使用 SGP 算法抑制 PAPR 会降低系统的 BER 性能, 这是由于随着 r_{SNR} 的增大, 信号的功率占比变大, 系统中因限幅而引入的误差增大, 但 SGP 算法不能改变限幅阈值, 所以导致整个 OFDM 系统的 BER 性能下降.

采用 LS 信道估计时, 在图 5(a) 的 $r_{\text{BER}} = 2.5 \times 10^{-3}$ 处, 采用 OTACE 算法降低信号的 PAPR 与采用 POCS 降低信号的 PAPR 和原信号相比, SNR 增益分别为 1.27 dB 和 0.90 dB; 在图 5(b) 的 $r_{\text{BER}} = 7 \times$

表1 系统仿真设置

Table 1 System simulation setting

Meaning	Parameters	Specifications
System model		SISO-OFDM
Modulation mode		QPSK
System baseband bandwidth	B_{bw}/MHz	7.56
OFDM symbols number	N_{OFDM}	100
Pilot pattern		Comb
Pilot interval	P_i	3
CP length	N_{CP}	256
Data subcarriers number	N	2048
Total subcarriers number	N_{TS}	2304
Doppler spread	f_D/Hz	20, 60

10^{-3} 处, 采用 OTACE 算法降低信号的 PAPR 与采用 POCS 降低信号的 PAPR 和原信号相比, SNR 增益分别为 1.23 dB 和 0.92 dB. 采用 LMMSE 信道估计时, 在图 5(a) 的 $r_{\text{BER}} = 1.5 \times 10^{-3}$ 处, 采用 OTACE 算法降低信号的 PAPR 与采用 POCS 降低信号的 PAPR 和原信号相比, SNR 增益分别为 1.68 dB 和 1.02 dB; 在图 5(b) 的 $r_{\text{BER}} = 5 \times 10^{-3}$ 处, 采用 OTACE 算法降低信号的 PAPR 与采用 POCS 降低信号的 PAPR 和原信号相比, SNR 增益分别为 1.32 dB 和 0.90 dB.

由图 6 和图 7 可见, CDT 6 和 Brazil A 信道的 BER 性能与 CDT 1 信道的结果类似, OTACE 算法

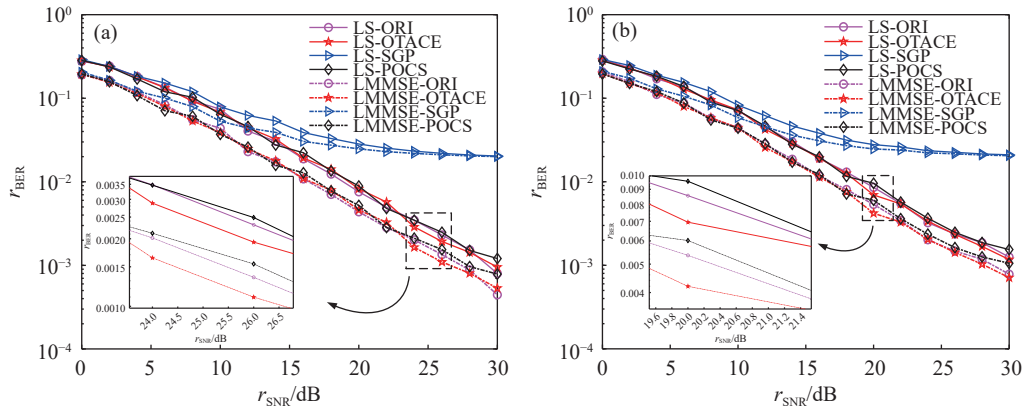


图5 动态 CDT 1 信道下 BER 性能曲线. (a) 20 Hz; (b) 60 Hz

Fig.5 BER performance curves under the CDT 1 dynamic channel: (a) 20 Hz; (b) 60 Hz

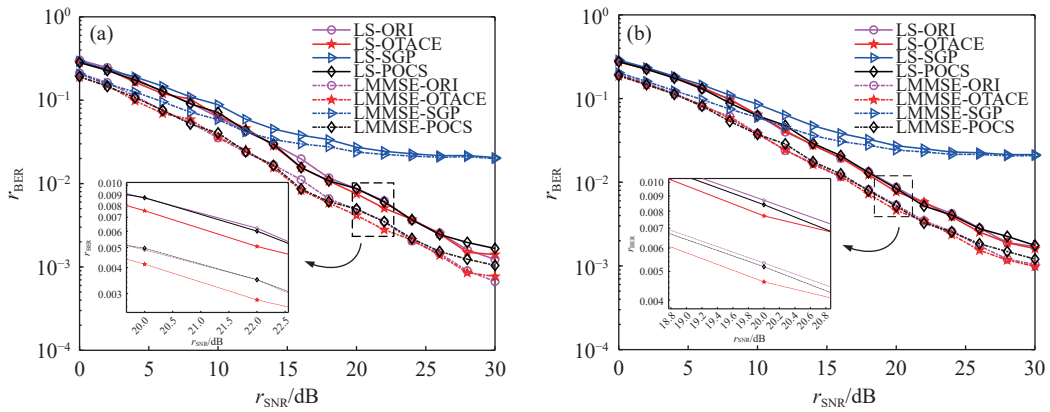


图6 动态 CDT 6 信道下 BER 性能曲线. (a) 20 Hz; (b) 60 Hz

Fig.6 BER performance curves under the CDT 6 dynamic channel: (a) 20 Hz; (b) 60 Hz

比 POCS 算法和不进行 PAPR 抑制有微弱的 SNR 增益, 这是因为 OTACE 使用最优的阈值对信号限幅, 与其他算法相比, 因限幅而引入的噪声较少, 且 OTACE 在发送端增大了外部星座点与相邻星座点之间的距离, 一定程度上增强了信号的抗干扰能力.

4.4 复杂度分析

分析一个 N 点 OFDM 符号的计算复杂度, 只考虑复数乘法和复数加法操作. OTACE 算法主要包括: 限幅、求加权因子 μ 、寻找最优阈值、FFT 运算和 IFFT 运算. 限幅是比较信号星座点的幅值与阈值, 复数加法复杂度为 N ; 求 μ , 主要包括式 (9) 和

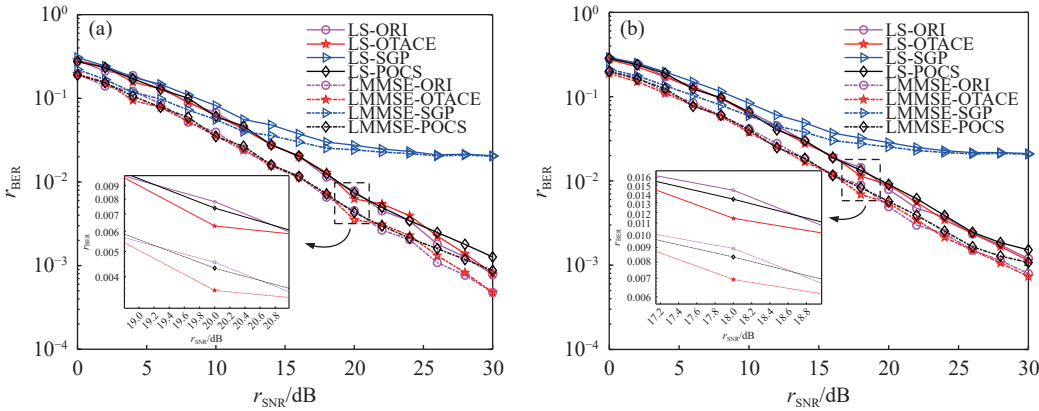


图 7 动态 Brazil A 信道下 BER 性能曲线. (a) 20 Hz; (b) 60 Hz

Fig.7 BER performance curves under the Brazil A dynamic channel: (a) 20 Hz; (b) 60 Hz

式 (10), 复数加法和复数乘法复杂度都为 N ; 寻找最优阈值的复数乘法复杂度为 N ; FFT 运算和 IFFT 运算的复数加法复杂度都为 $N\log_2 N$, 复数乘法复杂度都为 $(N/2)\log_2 N$. 综上, OTACE 的复数乘法复杂度为 $2N(1 + \log_2 N)$, 复数加法复杂度为 $N(2 + \log_2 N)$. 为了进一步比较, 表 2 给出了 OTACE 与文献 [18–22] 的计算复杂度对比. 由表 2 可知, OTACE 的复数乘法复杂度与改进的动态星座图扩展 (Modified active constellation extension, MACE)^[19] 和 SGP^[20] 算法相等, 略高于 POCS^[18]、动态星座扩展和联合空时选择性映射 (Active constellation extension and joint space time-selective mapping, AST-SLM)^[21] 和凸集上的扩展投影 (Extension projection onto the convex sets, EPOCS)^[22] 算法; OTACE 的复数加法复杂度高于 POCS、MACE 和 SGP 算法, 低于 AST-SLM 和 EPOCS 算法. 当子载波数 N 较大时, N 相较于 $N\log_2 N$ 可忽略不计. 因此整体而言, OTACE 的计算复杂度在可接受范围内, 其主要优点是在合理的计算复杂度下大幅度提高抑制 PAPR 的能力, 且能够获得更高的 BER 性能.

表 2 计算复杂度对比

Table 2 Computational complexity comparison

PAPR suppression algorithms	Complex multiplication	Complex addition
POCS ^[18]	$N(1 + 2\log_2 N)$	$N\log_2 N$
MACE ^[19]	$2N(1 + \log_2 N)$	$N(1 + \log_2 N)$
SGP ^[20]	$2N(1 + \log_2 N)$	$N(1 + \log_2 N)$
AST-SLM ^[21]	$N\log_2 N$	$2N(1 + \log_2 N)$
EPOCS ^[22]	$N\log_2 N$	$2N\log_2 N$
OTACE	$2N(1 + \log_2 N)$	$N(2 + \log_2 N)$

5 总结

针对现有 ACE 算法设置固定阈值而限制抑

制 OFDM 系统 PAPR 的能力, 本文提出了一种动态寻找限幅阈值的 OTACE 算法, 结合仿真和数据拟合得到迭代次数. 在此基础上将 OTACE 与 POCS 和 SGP 算法在 CCDF 方面进行了对比, 仿真结果表明, OTACE 抑制 PAPR 的效果最好, 其次是 SGP, POCS 的性能最差. 在三种动态衰落信道中比较了 PAPR 抑制算法对信道估计精度的影响, 结果显示, 相较于 POCS 和 SGP 抑制 PAPR 以及不抑制 PAPR, 采用 OTACE 抑制 PAPR 能够为 OFDM 系统的 BER 性能带来 1 dB 左右的 SNR 增益.

参 考 文 献

[1] Senol H, Tepedelenlioglu C. Subspace-based estimation of rapidly varying mobile channels for OFDM systems. *IEEE Trans Signal Process*, 2021, 69: 385

[2] Hu C, Wang L, Zhou Z. PAPR reduction scheme for OFDM systems based on Arnold transform without side information // *Proceedings of the IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*. Dalian, 2021: 1287

[3] Memisoglu E, Duranay A, Arslan H. Numerology scheduling for PAPR reduction in mixed numerologies. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2021, 10(6): 1197

[4] Wang B, Si Q, Jin M. A novel tone reservation scheme based on deep learning for PAPR reduction in OFDM systems. *IEEE Commun Lett*, 2020, 24(6): 1271

[5] Wunder G, Fischer R F H, Boche H, et al. The PAPR problem in OFDM transmission: New directions for a long-lasting problem. *IEEE Signal Process Mag*, 2013, 30(6): 130

[6] Hu M X, Wang W, Cheng W, et al. A generalized piecewise linear companding transform for PAPR reduction in OFDM systems. *IEEE Trans Broadcast*, 2020, 66(1): 170

[7] Mestdagh D J G, Monsalve J L G, Brossier J M. Green OFDM: A new selected mapping method for OFDM PAPR reduction. *Electron Lett*, 2018, 54(7): 449

- [8] Lim S C, Kim N, Park H. Polar coding-based selective mapping for PAPR reduction without redundant information transmission. *IEEE Commun Lett*, 2020, 24(8): 1621
- [9] Kumar T D, Venkatesan P. Performance estimation of multicarrier CDMA using adaptive brain storm optimization for 5G communication system in frequency selective fading channel. *Trans Emerg Telecommun Technol*, 2020, 31(4): e3829
- [10] Harthi N A, Zhang Z F, Kim D, et al. Peak-to-average power ratio reduction method based on partial transmit sequence and discrete Fourier transform spreading. *Electronics*, 2021, 10(6): 642
- [11] Lahbabi N, Bulusu S S K C, Helard J F, et al. Very efficient tone reservation PAPR reduction fully compatible with ATSC 3.0 standard: Performance and practical implementation analysis. *IEEE Access*, 2018, 6: 58355
- [12] El Hassan M, Crussiere M, Helard J F, et al. EVM closed-form expression for OFDM signals with tone reservation-based PAPR reduction. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2020, 19(4): 2352
- [13] Ma Z G, Song J Q. Survey of energy efficiency for 5G ultra-dense networks. *Chin J Eng*, 2019, 41(8): 968
(马忠贵, 宋佳倩. 5G超密集网络的能量效率研究综述. 工程科学学报, 2019, 41(8): 968)
- [14] Li J Y, Zhao Y K, Xue Z E, et al. A survey of model compression for deep neural networks. *Chin J Eng*, 2019, 41(10): 1229
(李江昀, 赵义凯, 薛卓尔, 等. 深度神经网络模型压缩综述. 工程科学学报, 2019, 41(10): 1229)
- [15] Wang X, Jin N D, Wei J D. A model-driven DL algorithm for PAPR reduction in OFDM system. *IEEE Commun Lett*, 2021, 25(7): 2270
- [16] Ro J, Lee W S, Kang M G, et al. A strategy of signal detection for performance improvement in clipping based OFDM system. *Comput Mater Continua*, 2020, 64(1): 181
- [17] Kalinov A, Bychkov R, Ivanov A, et al. Machine learning-assisted PAPR reduction in massive MIMO. *IEEE Wirel Commun Lett*, 2021, 10(3): 537
- [18] Jones D L. Peak power reduction in OFDM and DMT via active channel modification // *Proceedings of the Asilomar Conference*. Pacific Grove, 1999: 1076
- [19] Samayoa Y, Ostermann J. Modified active constellation extension algorithm for PAPR reduction in OFDM systems // *Proceedings of the Wireless Telecommunications Symposium*. Washington, 2020: 9198714
- [20] Krongold B S, Jones D L. PAR reduction in OFDM via active constellation extension. *IEEE Trans Broadcast*, 2003, 49(3): 258
- [21] Li G, Li T Y. A low-complexity PAPR reduction SLM scheme for STBC MIMO-OFDM systems based on constellation extension. *KSII Trans Internet Inf Syst*, 2019, 13(6): 2908
- [22] Liu Y Z, Wang Y, Ai B. An efficient ACE scheme for PAPR reduction of OFDM signals with high-order constellation. *IEEE Access*, 2019, 7: 118322
- [23] Tang R G, Zhou X, Wang C Y. A Haar wavelet decision feedback channel estimation method in OFDM systems. *Appl Sci*, 2018, 8(6): 877
- [24] Tang R G, Zhou X, Wang C Y. A novel low rank LMMSE channel estimation method in OFDM systems // *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Communication Technology*. Chengdu, 2017: 249
- [25] Zhang M T, Zhou X, Wang C Y. Noise suppression threshold channel estimation method using RC and SRRC filters in OFDM systems // *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Communication Technology*. Chongqing, 2019: 176
- [26] Tang R G, Zhou X, Wang C Y. Kalman filter channel estimation in 2×2 and 4×4 STBC MIMO-OFDM systems. *IEEE Access*, 2020, 8: 189089
- [27] Zhang M T, Zhou X, Wang C Y. A novel noise suppression channel estimation method based on adaptive weighted averaging for OFDM systems. *Symmetry*, 2019, 11(8): 997