

9-1-2020

Low Complexity Method Based on FC-CE-SLM for PAPR Reduction in OFDM System

Ce Ji

College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

Lijuan Wang

College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Low Complexity Method Based on FC-CE-SLM for PAPR Reduction in OFDM System

Abstract

Abstract: Selected mapping (SLM) algorithm uses Cross Entropy (CE) algorithm to get the most optimal sign sequence so that SLM can make the effect of PAPR Reduction achieve optimum. However, it needs too many times iterative computations, so it will increase the complexity of the algorithm. In order to solve this problem, *a fast convergence factor in the CE-SLM algorithm was introduced to make the sampling probability converge to 0 or 1 quickly in the system, which reduced the iterative times of getting the optimal sign sequence.* Computer simulation results show that the approved algorithm reduces the iterative times of getting the optimal sign sequence under the condition of having the same effect of reducing PAPR with the CE-SLM algorithm, eventually reducing the complexity of the algorithm effectively.

Keywords

cross entropy, convergence factor, OFDM, PAPR

Recommended Citation

Ji Ce, Wang Lijuan. Low Complexity Method Based on FC-CE-SLM for PAPR Reduction in OFDM System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 943-947.

一种基于 FC-CE-SLM 降低系统 PAPR 的低复杂度算法

季策, 王丽娟

(东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 通过在选择性映射算法(SLM)中引入交叉熵(CE), 可以得到最优的符号序列, 使 SLM 算法降低 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 系统峰均功率比的效果达到最优。在 CE-SLM (Cross Entropy-Selected mapping)算法实现的过程中, 需经过多次迭代运算, 势必增加了算法的复杂度。拟在 CE-SLM 算法中引入一个快速收敛因子, 使得系统中的采样概率快速收敛到 0 或者 1 的状态, 降低了优化符号序列所需的迭代次数。仿真结果表明: 改进算法在保持与 CE-SLM 算法降低 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)效果一致的情况下, 降低了得到最优符号序列所需的迭代次数, 使得算法的复杂度得到有效降低。

关键词: 交叉熵; 快速收敛因子; OFDM; PAPR

中图分类号: TN 919.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 05-0943-05

Low Complexity Method Based on FC-CE-SLM for PAPR Reduction in OFDM System

Ji Ce, Wang Lijuan

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Selected mapping (SLM) algorithm uses Cross Entropy (CE) algorithm to get the most optimal sign sequence so that SLM can make the effect of PAPR Reduction achieve optimum. However, it needs too many times iterative computations, so it will increase the complexity of the algorithm. In order to solve this problem, a fast convergence factor in the CE-SLM algorithm was introduced to make the sampling probability converge to 0 or 1 quickly in the system, which reduced the iterative times of getting the optimal sign sequence. Computer simulation results show that the approved algorithm reduces the iterative times of getting the optimal sign sequence under the condition of having the same effect of reducing PAPR with the CE-SLM algorithm, eventually reducing the complexity of the algorithm effectively.

Keywords: cross entropy; convergence factor; OFDM; PAPR

引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是一种多载波复用技术。它具有频谱利用率高、抗多径衰落能力强和对延迟效应

敏感度低的优点。目前, OFDM 技术已经被广泛应用于很多领域, 例如 ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line), DAB(Digital Audio Broadcasting), DVB(Digital Video Broadcasting), HDTV(High Definition Television)和 WLAN(Wireless Local Area Networks)中。OFDM 系统的主要缺点之一就是具有较高的峰均功率比(PAPR)。目前, 降低 PAPR 的技术主要包括^[1-2]: 预畸变类、编码类、概率类技术。选择性映射算法(SLM)是概率类技术的一种,



收稿日期: 2014-05-03 修回日期: 2014-09-13;
基金项目: 国家自然科学基金项目(11273001, 61273164, 61370152);
作者简介: 季策(1969-), 女, 沈阳, 博士, 副教授, 研究方向为 OFDM 关键技术、盲信号处理; 王丽娟(1991-), 女, 辽宁丹东, 满族, 硕士生, 研究方向为 OFDM 关键技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 943 •

其基本思想是通过引入很小的冗余来提高系统 PAPR 的统计特性^[3]。

在文献[4]中, 通过引入交叉熵^[5](CE, Cross Entropy)来优化 SLM 算法中的符号序列, 使之与原始信号相乘, 进而无失真的降低了 OFDM 系统的峰均功率比。然而, 在 CE-SLM 算法的实现过程中, 由于将其概率优化到理想状态所需的迭代次数通常较大, 从而增加了系统的复杂度。针对 CE-SLM 算法的这一问题, 提出了一种改进算法—FC-CE-SLM 算法, 即: 在优化概率 P 的过程中加入一个快速收敛因子 C (Convergence Factor), 使得概率 P 收敛到最优状态的速度得到提高, 从而简化了系统得到最优符号序列的迭代过程, 最终降低了 OFDM 系统的复杂度。仿真结果表明: 改进算法在保持与 CE-SLM 算法降低 PAPR 效果一致的情况下, 减少了得到最优符号序列所需的迭代次数, 使系统复杂度得到降低。

1 OFDM 系统中的 PAPR

经过快速傅里叶逆变换(FFT)后的信号可以表示为:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi nk/JN} \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

式中: X_k 表示经过调制后的数据; N 表示子载波的数量。

信号的峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR), 即信号的最大峰值与信号平均功率的比值, 可以表示为:

$$\text{PAPR}(X) = \frac{\max |x(n)|^2}{E[|x(n)|^2]} \quad (2)$$

式中: $\max(\cdot)$ 表示最大值; $E(\cdot)$ 表示数学期望; $E(|x_n|^2)$ 表示信号的平均值; PAPR 的单位为 dB。

通常情况下, 用互补累计分布函数(CCDF)来描述 OFDM 系统的 PAPR, 其定义为:

$$P(\text{PAPR} > z) = 1 - P(\text{PAPR} \leq z) = 1 - (1 - \exp(-z))^N \quad (3)$$

由公式(3)可知: 当门限值不变时, 增加子载波数量 N ,

则 CCDF 的值会增加, 超过门限值 z 的概率就会增大。

2 CE-SLM 算法

交叉熵, 又称 Kullback-Leibler(K-L)距离^[6], 是对两个概率分布之间差异性的描述。若给定一个符号序列^[7]: $c = [c_0, \dots, c_{N-1}]$, 将其与频域信号 X 相乘, 得到 $\hat{X} = [X_0 c_0, \dots, X_{N-1} c_{N-1}]$, 则 X 的时域信号为:

$$\hat{x}(n; c) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} c_k X_k e^{j2\pi nk/JN} \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (4)$$

从公式(4)中可以看出: $E[|x(n)|^2]$ 与 $E[|\hat{x}(n; c)|^2]$ 的值是相等的, 令 $L(c) = \max |\hat{x}(n; c)|^2$, 则降低 PAPR 的问题可以转化为组合优化问题:

$$\min_c L(c) \quad (5)$$

$$\text{subject to: } c \in \{1, -1\}^N$$

从公式(5)可以看出, 求解 OFDM 信号的最小 PAPR, 首先要求出使 $L(c)$ 取最小值时的最优序列 c^* , 令序列 $d \in \{0, 1\}^N$, 即序列 d 中的每个元素都服从二项分布, 即:

$$P(d_k = 1) = p_k \quad (6)$$

$$P(d_k = 0) = 1 - p_k \quad k=0,1,\dots,N-1$$

$$\text{则 } c = 1 - 2d, \quad L(d) = \max_n |\hat{x}(n; 1 - 2d)|^2。$$

二项分布的概率分布函数为:

$$f(d; p) = \prod_{k=0}^{N-1} p_k^{d_k} (1 - p_k)^{1-d_k} \quad (7)$$

在 CE-SLM 算法中, 通过不断更新概率, 直至产生最优的概率 P^* , P^* 可以由公式(8)获得:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{\{L(d_i) \leq \gamma\}} \nabla \ln f(d_i; p) = 0 \quad (8)$$

式中: I 为示性函数, 其定义为:

$$I_{\{x \leq \gamma\}} = \begin{cases} 1 & x \leq \gamma \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\gamma = L_{n_s}$, n_s 由样本数 n 和系数 ρ 决定,

$n_s = \lceil \rho \cdot n \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

公式(7)的偏导数为:

$$\frac{\partial \ln f(d; p)}{\partial p_k} = \frac{d_k}{p_k} - \frac{1-d_k}{1-p_k} \quad (10)$$

将公式(10)代入到公式(8)中, 得到更新概率 P 的计算公式:

$$P_k^* = \frac{\sum_{i=1}^n I_{\{L(d_i) \leq \gamma\}} d_{ik}}{\sum_{i=1}^n I_{\{L(d_i) \leq \gamma\}}} \quad (11)$$

式中: d_{ik} 表示 d_i 的第 k 个元素。

通过以上分析可以得出, CE-SLM 算法迭代求解最优符号序列 c^* 可以大致分为 2 步^[8-11]:

(1) 根据指定的概率分布函数 $f(d; p)$ 产生一组随机样本 d_1, d_2, \dots, d_n ;

(2) 根据 $L(d_1), L(d_2), \dots, L(d_n)$ 来更新概率 P , 从而使 $f(d; p)$ 产生更好的随机样本, 直到得到最优符号序列 c^* 。

通过 CE-SLM 算法优化符号序列, 最终可以将概率向量 P 中的元素全部优化到 1 或者 0, 得到最优概率 P^* , 进一步产生最优符号序列 c^* , 与原始数据信号相乘, 便可以无失真的降低 OFDM 系统的 PAPR。后面的仿真表明, CE-SLM 算法降低 PAPR 的效果优于传统的 SLM 算法。

3 FC-CE-SLM 算法

在 CE-SLM 算法中, 通过循环迭代产生最优的符号序列。然而, 在算法迭代过程中, 概率 p_k 从初始值 0.5 逐渐改变至 0 或者 1, 这个过程需要经过多次迭代, 虽然最终概率 p_k 总会收敛到 0 或者 1, 但是迭代次数很大, 增加了系统的复杂度。针对 CE-SLM 算法复杂度相对较高的这一问题, 在根据 $L(d_1), L(d_2), \dots, L(d_n)$ 更新概率 P 后, 本文拟引入一个快速收敛因子 C 来加速 p_k 收敛到 0 或者 1 的过程, 即加速得到最优概率 P^* 的过程, 从而减少了迭代次数, 降低了系统的复杂度。具体实现过程如下:

$$p_k = \begin{cases} p_k \cdot (1+C) & p_k > 0.5 \text{ and } p_k \neq 1 \\ p_k \cdot (1-C) & p_k < 0.5 \text{ and } p_k \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

因为本文选取的概率分布是二项分布, 因此快速收敛因子 C 的取值范围为 $0 < C < 1$ 。由于上式中可能出现 $p_k > 1$ 的情况, 而二项分布的概率必然在 $0 \sim 1$, 所以当 $p_k > 1$ 时, 置 $p_k = 1$ 。从(12)式不难看出, 加入收敛因子 C 后, 能使 p_k 快速收敛到 0 或者 1。例如: 某次迭代后的概率 $p_k = 0.8$, 则表明下一次有 80% 的可能性产生数据符号 1, 若取 $C = 0.2$, 经过公式(12)加速后概率 $p_k = 0.96$, 则下一次产生数据符号 1 的概率增大, 从而加速了收敛的过程。

综上所述, 得到改进的 CE-SLM 算法, 即快速收敛交叉熵算法, 简记为 FC-CE-SLM (Fast convergence cross entropy selected mapping algorithm)。FC-CE-SLM 算法的流程图如图 1 所示。

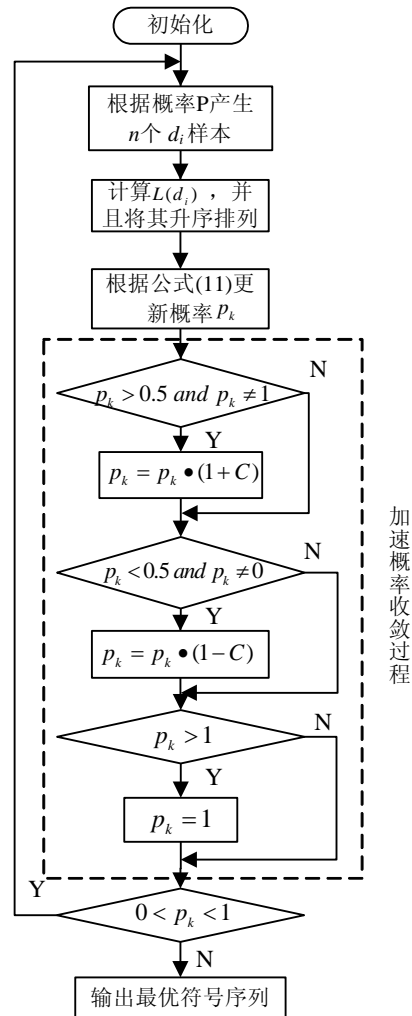


图 1 FC-CE-SLM 算法流程图

具体实现过程如下:

- (1) 初始化: 令 $p_0 \equiv 1$, $p_k \equiv 0.5, k=1, 2, \dots, N-1$, $\rho=0.17$, $n=30$;
- (2) 根据概率 P 产生 n 个 d_i 样本, 则 $c_i=1-2d_i$, 计算 $L(d_i)$;
- (3) 将 $L(d_i)$ 按由小到大的顺序排列, 得到升序序列 $\{L_0, L_1, \dots, L_{N-1}\}$;
- (4) 根据公式(11)更新概率 p_k ;
- (5) 根据公式(12)加速概率 p_k 收敛;
- (6) 如果 $0 < p_k < 1$, 则返回步骤 2; 否则输出最优符号序列: $c^* = 1-2p$ 。

在最优情况下, 概率 p_k 会收敛到 0 或者 1, 此时 $d_k = p_k$ 。

4 仿真实验

为了验证新算法的有效性, 对 CE-SLM 算法、FC-CE-SLM 算法及 SLM 算法进行了 Matlab 仿真对比。

首先对 3 种算法降低 OFDM 系统 PAPR 的效果进行了仿真对比。仿真参数设置如下: 调制方式为 QPSK 调制, 子载波数 N 为 128, 仿真 OFDM 信号数为 1 000, 由概率 P 产生的采样数为 $n=30$, $\rho=0.17$, 则 $L_{n_s}=5$, SLM 中的随机序列数 $M=20$ 。在上述仿真环境下, 经过多次仿真实验, 发现 C 取 0.3 时仿真效果最好。因此在后面的仿真中, 快速收敛因子 C 均取为 0.3。图 2 给出了 OFDM 系统经过 CE-SLM 算法、FC-CE-SLM 算法及 SLM 算法后的 CCDF 性能曲线。

由图 2 可以看出: CE-SLM 算法降低 OFDM 系统 PAPR 的效果好于传统的 SLM 算法, 并且使 PAPR 范围更加集中, 而本文提出的 FC-CE-SLM 算法在降低 PAPR 效果上几乎与 CE-SLM 算法一致。但是在本次仿真中, CE-SLM 算法的平均迭代次数为 14.562 0 次/符号, 而 FC-CE-SLM 算法的平均迭代次数为 13.470 0 次/符号, 即对于每个 OFDM 符号来说减少了 1.092 次迭代, 则对 1 000 个 OFDM 符号就减少了 1 092 次迭代, 即本文提出的

FC-CE-SLM 算法在保证降低 PAPR 效果的基础上, 有效降低了算法的复杂度。

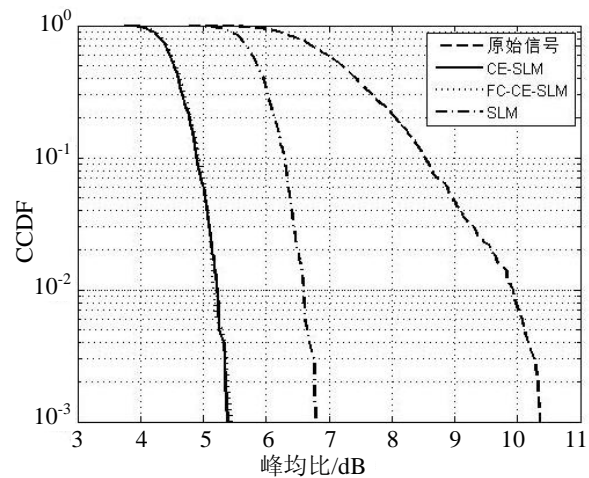


图 2 不同算法的 CCDF 曲线

下面对 FC-CE-SLM 与 FE-CE-SLM 两种算法的复杂度进行了对比, 本文中复杂度的对比体现在产生最优序列时所需的平均迭代次数。

表 1 为改变采样数 n , CE-SLM 算法与 FC-CE-SLM 算法的复杂度对比。此时, 仿真参数设定为: 调制方式为 QPSK 调制, 子载波数 N 为 128, 仿真 OFDM 信号数为 1 000, $\rho=0.17$, 收敛因子 $C=0.3$ 。从表 1 中可以看出, 当 n 取不同值时, 相对于 CE-SLM 算法, FC-CE-SLM 算法降低了每个 OFDM 符号所需的平均迭代次数, 且采样数 n 越大, FC-CE-SLM 算法降低平均迭代次数的优势越明显。随着采样数 n 的取值不同, 改进算法平均迭代次数降低的范围为 0.727 0~2.753 0 次/符号, 改进算法平均迭代次数降低的百分比范围为 4.63%~20.90%, 虽然从单个 OFDM 符号上来看, 算法降低的迭代次数较小, 但是实际传输中有多个 OFDM 符号, 因此 FC-CE-SLM 算法可以明显降低寻找最优符号序列的次数, 可以有效的降低系统的复杂度。

表 2 为改变子载波个数 N , CE-SLM 算法与 FC-CE-SLM 算法的复杂度对比。调制方式为 QPSK 调制, 仿真 OFDM 信号数为 1 000, 由概率 P 产生的采样数为 $n=40$, $\rho=0.13$, 则 $L_{n_s}=5$, 收敛因

子 $C = 0.3$ 。从表 2 中可以看出: 随着子载波数 N 的取值不同, 改进算法平均迭代次数降低的范围为 0.509 0~3.021 0 次/符号, 改进算法平均迭代次数降低的百分比范围为 2.76 %~26.36 %, 相比于

CE-SLM 算法, FC-CE-SLM 算法降低了每个 OFDM 符号得到最优序列所需的平均迭代次数, 且随着子载波数量的降低, FC-CE-SLM 算法降低平均迭代次数的优势越明显。

表 1 改变采样数 n , CE-SLM 算法与 FC-CE-SLM 算法的复杂度对比

根据概率 P 产生的采样数 n /个	20	30	40	50	60	70
CE-SLM 算法平均迭代次数 (次/符号)	15.696 0	14.562 0	14.007 0	13.708 0	13.336 0	13.176 0
FC-CE-SLM 算法平均迭代次数 (次/符号)	14.969 0	13.470 0	12.502 0	11.802 0	11.107 0	10.423 0
改进算法降低平均迭代次数的百分比	4.63 %	7.50 %	10.74 %	13.90 %	16.71 %	20.90 %

表 2 改变子载波个数 N , CE-SLM 算法与 FC-CE-SLM 算法的复杂度对比

子载波数 N (个)	64	128	192	256	320	384
CE-SLM 算法平均迭代次数 (次/符号)	11.462 0	14.007 0	15.655 0	16.791 0	17.764 0	18.432 0
FC-CE-SLM 算法平均迭代次数 (次/符号)	8.441 0	12.502 0	14.667 0	16.065 0	17.160 0	17.923 0
改进算法降低平均迭代次数的百分比	26.36 %	10.74 %	6.31 %	4.32 %	3.40 %	2.76 %

5 结论

提出了一种改进的 CE-SLM 算法: FC-CE-SLM 算法, 即在 CE-SLM 算法中加入一个快速收敛因子 C , 在保证降低 PAPR 效果的前提下, 加速了概率 P 收敛到最优的情况, 从而降低了 CE-SLM 算法的迭代次数, 有效的解决了 CE-SLM 算法选取最优序列迭代次数过多这个缺点, 降低了系统的复杂度。仿真结果表明, FC-CE-SLM 算法保持了 CE-SLM 算法降低 PAPR 的效果, 但有效的降低了得到最优序列的迭代次数, 从而降低了系统的复杂度。

参考文献:

[1] Jiang T, Wu Y Y. An overview: peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals [J]. IEEE Transactions on Broad-casting (S0018-9316), 2008, 54(2): 257-268.

[2] 王沁, 李磊, 陆成勇. 基于动态离散粒子群优化的 PTS 相位系数搜索算法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12): 2799-2804. (Wang Qin, Li Lei, Lu Chengyong. PTS Phase Coefficient Search Algorithm Based on Dynamic Discrete Particle Swarm Optimization [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2010, 22(12): 2799-2804.)

[3] 魏克军, 益晓新. 一种基于 SLM 算法的峰平功率比减小方案[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(4): 557-559.

[4] J C Chen, C K Wen. A low-complexity scheme to reduce the PAPR of an OFDM signal using sign-selection

algorithms [J]. IEEE Signal Process (S1070-9908), 2010, 17(2): 189-192.

[5] R Rubinstein, D Kroese. The Cross-Entropy Method: A Unified Approach to Combinatorial Optimization, Monte Carlo Simulation, and Machine Learning [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2004.

[6] R Y Rubinstein, D P Kroese. The Cross-Entropy Method [M]. Berlin, Germany: Springer, 2004.

[7] Luqing Wang, Tellambura C. Cross-Entropy-Based Sign-Selection Algorithms for Peak-to-Average Power Ratio Reduction of OFDM Systems [J]. IEEE Signal Processing (S1053-587X), 2008, 56(10): 4990-4994.

[8] Jung-Chieh Chen, Min-Han Chiu, Yi-Syun Yang, *et al.* A Suboptimal Tone Reservation Algorithm Based on Cross-Entropy Method for PAPR Reduction in OFDM Systems [J]. IEEE Broadcasting (S0018-9316), 2011, 57(3): 752-756.

[9] Jung-Chieh Chen, Chao-Kai Wen. PAPR Reduction of OFDM Signals Using Cross-Entropy-Based Tone Injection Schemes [J]. IEEE Signal Processing Letters (S1070-9908), 2010, 17(8): 727-730.

[10] Jung-Chieh Chen. Partial Transmit Sequences for Peak-to-Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals With the Cross-Entropy Method [J]. IEEE Signal Processing Letters (S1070-9908), 2009, 16(6): 545-548.

[11] Jung-Chieh Chen, Chih-Peng Li. Tone Reservation Using Near-Optimal Peak Reduction Tone Set Selection Algorithm for PAPR Reduction in OFDM Systems [J]. IEEE Signal Processing Letters (S1070-9908), 2010, 17(11): 933-936.