

文章编号:1000-582X(2011)08-109-05

## 低实现复杂度的改善 OFDM 系统 PAPR 性能的 SLM 改进算法

蒋 阳, 罗 杨, 罗 艳

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:**为了兼顾实际应用实现的可行性与降低 OFDM 系统的复杂度,提出了一种 SLM 的改进算法。首先该算法把原始数据分段后进行组内扰码,打破原始数据序列的自相关性,降低了所有子载波间的相位一致性,从而减低了 OFDM 系统的 PAPR;其次利用傅立叶变换所具有的线性性质,对已获得的 IFFT 的数据序列进行线性组合得到新的扰码序列,从而严格控制 IFFT 个数,同时得到更多的时域备选数据序列,进一步降低了系统的 PAPR,同时也大大减少了系统的计算复杂度。理论分析与仿真结果表明,改进的 SLM 算法不仅能有效抑制 PAPR,同时可减小算法计算的复杂度与系统实现的复杂度。

**关键词:**正交频分复用;峰均功率比;分段式虚拟序列插入;线性组合

**中图分类号:**TN 301.6

**文献标志码:**A

### Improved SLM algorithm to improve the PAPR performance of OFDM system with low implementation complexity

JIANG YANG, LUO YANG, LUO YAN

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R China)

**Abstract:** In order to consider the feasibility of practical implementation and reduce the complexity of OFDM systems, an improved SLM algorithm is proposed. The original data are segmented and scrambled, which breaks the correlation of the original data sequences, and reduces all sub-carrier phase coherence, thereby reducing the OFDM system PAPR. Following the linear nature of the Fourier transform, the obtained IFFT data sequences are linearly combined to get the new scrambling code sequences, such that strictly controlling the IFFT number, while getting more data sequences, which further reduces the system PAPR, and significantly reduces the computational complexity of the system. Theoretical analysis and simulation results show that the improved SLM algorithm can effectively suppress PAPR, while reducing the algorithm complexity and system complexity.

**Key words:** OFDM; PAPR; segmented DSI; linear combination

OFDM 既是一种传输技术,又是一种多载波调制技术,其基本思想<sup>[1]</sup>是将高速传输的数据流通过

串/并变换,转换成在若干个正交的窄带子信道上并行传输的低速数据流。由于具有良好的抗多径能力

收稿日期:2011-03-11

基金项目:“211 工程”三期建设资助项目(S-09102)

作者简介:蒋 阳(1963-),男,重庆大学副教授,主要从事通信技术、EDA 技术、工业 CT 技术及应用等教学科研工作,  
(Tel)15902350700;(E-mail)jy@cqu.edu.cn。

和较高的频谱利用率,不需要复杂的均衡技术以及易于采用天线传输等优点,已成为下一代无线通信系统的核心技术之一,也被认为是第四代移动通信系统中不可或缺的关键技术。

由于 OFDM 信号在时域上表现为  $N$  个正交子载波信号叠加,当这  $N$  个信号一致性较大时,可能在某一时刻叠加成很大的幅值,最恶劣时, $N$  个子载波信号峰值点相叠加,产生的峰值功率可以达到平均功率的  $N$  倍,导致信号很容易超出功放电路的动态范围,使输出信号出现严重失真,破坏子载波间的正交性,造成严重的带内信号畸变和带外频谱弥散<sup>[2-3]</sup>。OFDM 系统的这种高峰值平均功率比问题,阻碍着 OFDM 技术的广泛运用。

目前解决 OFDM 系统高峰均比问题主要有信号畸变类技术、概率类技术等。概率类技术由于实用性得到了业界的广泛关注,国内外许多文献提出了该类降低 OFDM 系统高 PAPR 的新算法<sup>[4-6]</sup>,但其重点主要放在抑制 PAPR 性能上,而忽视整个系统实现的复杂度与系统整体计算量。为使该类算法能更好地运用于实际系统,所以在努力提升 OFDM 系统 PAPR 抑制性能的同时,必须重点考量系统实现复杂度、系统计算量、系统实现成本等问题。

因此以上述问题为出发点,提出了一种兼顾实现复杂度与系统计算量的降低 OFDM 系统 PAPR 的新算法。

## 1 改善 PAPR 性能的方法

目前解决 OFDM 系统高 PAPR 的主流方法大致可分为以下三类<sup>[1]</sup>:限幅类、编码类和概率类。这三类方法各具优缺点:限幅滤波类对 PAPR 的抑制效果很明显,方法也最简洁,但由于是对信号直接进行非线性操作,信号会产生带内失真和带外干扰,滤波器可以滤除带外噪声,但对带内失真却无能为力,经过滤波后信号还会产生峰值再生现象。编码类是选择 PAPR 较低的码字进行传输,对 PAPR 有较好的抑制效果。但编解码困难,信息速率和编码效率低,冗余大,同时会受子载波数及调制方式限制。

概率类方法不直接对信号进行处理,而是通过对信号进行加扰,使信号出现高 PAPR 的概率降低,如 SLM、PTS、PS 等都属于这类方法。但是如果得到比较好的抑制 PAPR 效果,很多参数必须达到很高的要求,会极大地增加计算复杂度和实现复杂度,造成系统的实时性降低。

从实际工程应用出发,不一味追求降低 PAPR

效果或降低实现的难易度而忽略性能要求,而是兼顾性能和实现复杂度,对传统 SLM 算法进行优化改进,提出一种综合性能较佳的 SLM 改进算法。

### 1.1 传统 SLM 算法原理

SLM 原理图<sup>[1]</sup>如图 1 所示,从图可知,SLM 算法由 4 步完成:首先是数据源  $X$  通过变换得到并行的多个同样的数据序列 $(X_1, X_2, \dots, X_N)$ ;每个数据序列  $X_i$  乘以不同的旋转向量  $R_i$  得到  $Y_i$ ;对每路  $Y_i$  进行快速傅立叶逆变换;从所获得的  $N$  路  $Y_i$  中选

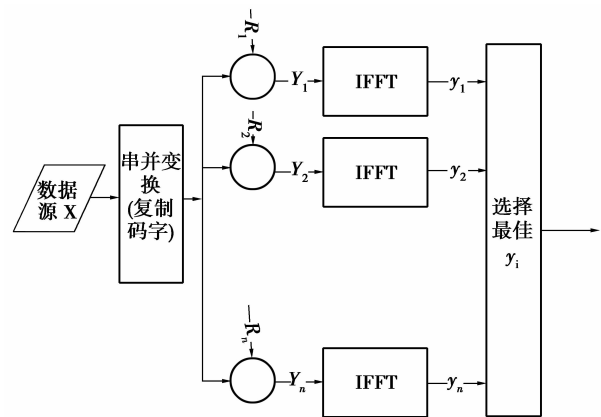


图 1 SLM 原理图

择出具有最小的 PAPR 值的一路进行传送。即

$$\text{PAPR}_{\text{slm}} = \min(\text{PAPR}_1, \text{PAPR}_2, \dots, \text{PAPR}_n)。$$

(1)

使用 SLM 算法可以使 PAPR 超过门限的概率大大降低,如果 1 个 OFDM 符号超过峰值  $Z$  的概率为  $P(\text{PAPR} \geq Z)$ ,则  $N$  个序列的 PAPR 都超过  $Z$  的概率为  $(P(\text{PAPR} \geq Z))^N$ ,

(2)

所以由  $P(\text{PAPR} > Z) = 1 - (1 - \exp(-Z))^N$  可得

$$P(\text{PAPR} > Z(\text{db})) = 1 - (1 - \exp(-10^{\frac{Z}{10}}))^N。$$

(3)

SLM 算法改善 OFDM 系统 PAPR 性能的优劣可用其互补累积分布函数(CCDF)曲线来描述,现利用 Matlab7.0 对 SLM 算法进行仿真,仿真结果如图 2 所示。仿真中设定 OFDM 系统基本参数为:OFDM 符号数为 10 000,子载波数  $N=128$ ,采用 16QAM 调制,4 倍过采样。

从上图可知采用 SLM 算法比未采用任何算法的 OFDM 系统相比较,采用 SLM 算法可提高 PAPR 性能 3.5db 左右,信号峰值出现的概率明显降低。

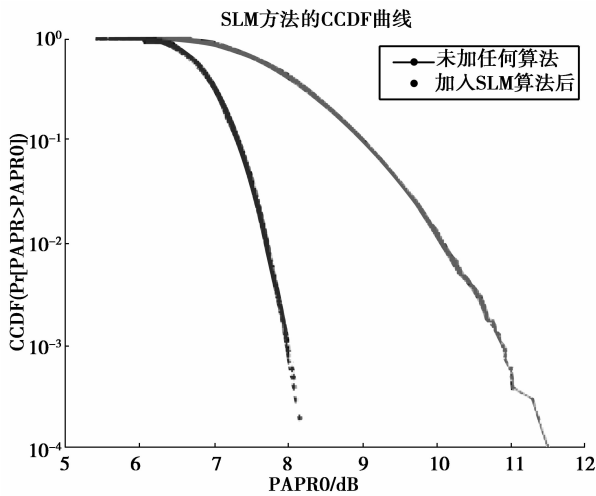


图 2 SLM 算法的互补累积分布函数曲线

## 1.2 传统 SLM 算法的缺陷

从以上仿真及分析可知,传统 SLM 算法能达到较好的降低 PAPR 的效果,其优势在于:首先,不会像限幅滤波类技术使信号畸变失真,产生带内噪声与带外干扰;其次也不会像编码类技术一样引入过多的冗余,且不受 IFFT 次数与映射方法的限制。但传统 SLM 算法也存在不足之处:

1)需要较多的 IFFT 变换个数来提高 PAPR 的抑制效果,从而增加系统的计算复杂度,同时对发射端硬件的复杂度和运算速度提出了很高的要求;

2)为了收端能恢复出传送的原始数据,需要发端把选择的支路信号通过发送边带信息给收端,这会造成频率资源的浪费。

## 2 SLM 算法的改进

### 2.1 理论分析

SLM 算法计算  $V$  个  $N$  点 IFFT 和相位优化所需的总计算量<sup>[7-8]</sup>为

$$N_{\text{SLM}} = N_{\text{SLM-mul}} + N_{\text{SLM-add}}, \quad (4)$$

其中  $N_{\text{SLM-mul}}$  是 SLM 算法中复数乘法运算量,  $N_{\text{SLM-add}}$  是 SLM 算法中复数加法运算量,其计算方法分别为

$$N_{\text{SLM-mul}} = VN + \frac{VN}{2} \log_2 N; \quad (5)$$

$$N_{\text{SLM-add}} = VN \log_2 N.$$

这 2 部分的运算量主要体现在以下 2 个方面:一部分是对数字信号进行 IFFT 运算操作时必须的复数乘法和复数加法运算;另一部分是在寻找最优相位加权时所必须的复数乘法、复数加法运算。然而一个  $N$  点的 IFFT 运算的复数乘法与加法运算是无法

改变的,只有  $V$  能改变,同时相位优化的复数计算量也由  $V$  大小决定。从式(5)可知,要减少 SLM 算法的计算量,其突破点只能在  $V$  (IFFT 的个数)上。

#### 2.1.1

针对 1.2 中 SLM 算法的缺陷 1),希望通过较少的 IFFT 变换个数,线性控制 IFFT 变换后的时域信号,生成伪 IFFT 变换后的新时域信号,达到扩充优选集的目的<sup>[9-18]</sup>。

首先令加扰后经过 IFFT 变换的任意的 2 个时域信号  $x^{(i)}, x^{(k)}$ ,由 SLM 算法原理可知,这 2 个信号包含同 1 个输入信号  $X$ ,由傅立叶变换的线性性质知道,任意 2 个经过 IFFT 变换的信号线性组合为

$$\begin{aligned} x^{(i,k)} &= c_i x^{(i)} + c_k x^{(k)} = \\ &= c_i \text{IFFT}(X \otimes R^{(i)}) + c_k \text{IFFT}(X \otimes R^{(k)}) = \\ &= \text{IFFT}(X \otimes (c_i R^{(i)} + c_k R^{(k)})), \end{aligned} \quad (6)$$

其中系数  $c$  为复数(如:  $c_i = \frac{1}{\sqrt{2}}, c_k = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ ),使得

$c_i p^{(i)} + c_k p^{(k)}$  具有单位幅度值,由此得到的时域备选信号  $x^{(i,k)}$  也可以作为 SLM 的 1 个备选信号,因此只要有了 2 个时域备选信号,就可以得到另 1 个时域备选信号  $x^{(i,k)}$ ,且这个信号是不需要进行 IFFT 变换的(但要注意的是信号  $c_i p^{(i)} + c_k p^{(k)}$  与  $p^{(i)}, p^{(k)}$  并不是统计独立的<sup>[10]</sup>)。考虑  $c_i p^{(i)}, \pm c_k p^{(k)}$  这种情况。由于  $\pm c_k$  共有 2 种情况,这样如果有  $M$  个扰码序列,那么就可以获得  $2C_M^2 = 2 \cdot \frac{M(M-1)}{2}$  个新的备选序列,加上原来的  $M$  个序列,则共有  $2C_M^2 + M$  个备选序列,但是却只做了  $M$  次的 IFFT 变换,由此减少了 SLM 算法的计算量。

#### 2.1.2

针对 1.2 中 SLM 算法的缺陷 2),通过将随机序列插入到信号序列中,从而改变信号序列的相位一致性,减小高峰值出现的概率,以此降低系统的 PAPR。由于是将额外的序列插入到信号序列中,这些插入的序列不含有任何有用信息,在接收端无需恢复处理,可直接将这些比特位丢弃而无需发送边带信息就可以无失真地恢复原始信号<sup>[9-13]</sup>。

然而此处的序列插入不是一般的补偿序列插入,而是把每个输入数据序列分成  $K$  段,把每段看成一个输入数据序列,再实施补偿序列插入(每段的末尾插入扰码),插入扰码后的数据块如图 3 所示:

通过插入随机比特位,打破了  $N$  个子载波信号相位的一致性, $N$  个子载波信号的相位差别越大,其 PAPR 值就越小,从这个角度来考虑,扰码比特均匀插

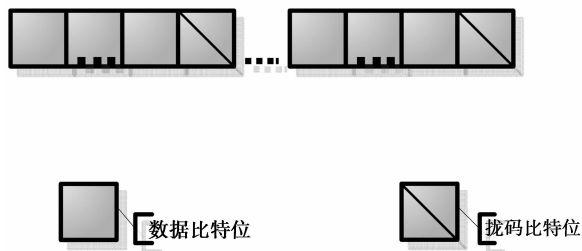


图 3 插入扰码后的数据块

入到信号序列中,比全部插入到信号序列末尾更为有效,这样打破信号相位一致性的力度就比较大,取得的效果就更好,这也是补码分组编码的基本思想<sup>[12-15]</sup>。

2.2 改进算法的实现

根据以上思路构建出改进的 SLM 原理框图如图 4 所示

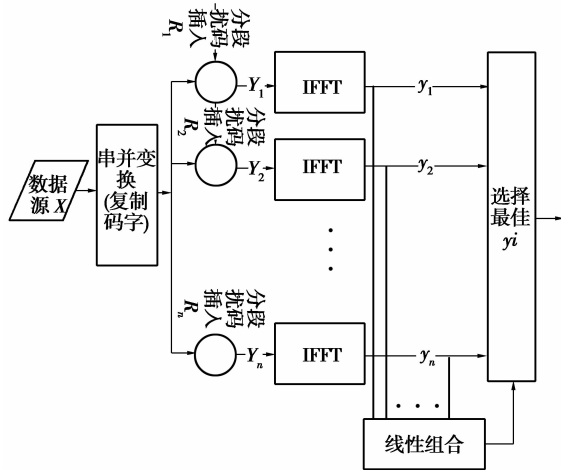


图 4 改进后的 SLM 框图

通过仿真得到的改进的 SLM 算法与现有比较优化的 PTS 迭代优化算法、不同 V 值的 SLM 算法的 CCDF 函数曲线比较图如下图 5 所示

仿真时设置的参数为:系统含有 128 个子载波,使用 16QAM 调制,4 倍过采样,10 000 OFDM 符号。PTS 算法中分为 V=4 个子向量。SLM 算法中 V 分别取 8、16、32、64。

通过仿真及算法实现过程的对照比较得出表 1 所示的结果,从表中可以得到以下结论:

改进的联合采用分段虚拟序列插入与时域数据序列线性组合的新 SLM 算法(V=8 线性组合)的 PAPR 抑制性能优于 PTS 迭代优化算法和 SLM 算法(V=8 未进行线性组合),且计算量低于 PTS 迭代优化算法。更值得注意的是 SLM 改进算法具有

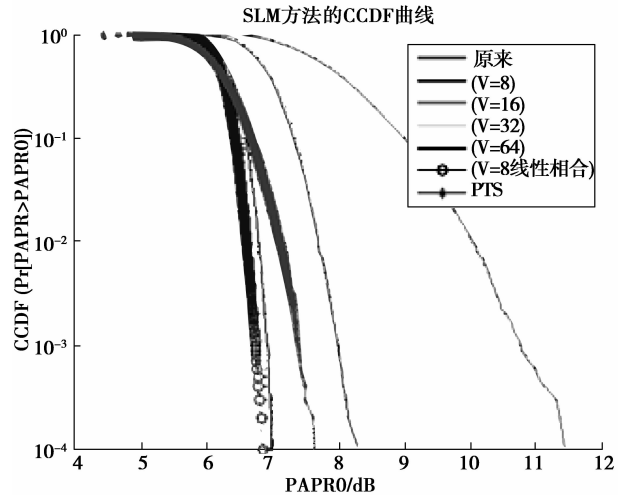


图 5 改进后的 SLM 算法与其它算法的互补累积分布函数曲线

以下优点:

1) SLM 改进算法只进行了 8 次 IFFT 运算(及 M=8 个扰码序列,此处采用的是 3 个时域序列线性组合方式),但其 PAPR 抑制性能却比进行 64 次 IFFT 运算(采用 64 个扰码序列)优秀 0.3db.

2) 发端无需发送边带信息给收端,收端直接把分段均匀插入的随机序列丢弃即可,因为这些序列不带有任何有用信息,从而节约了紧张的频带资源,同时也减小了收端的复杂度。

表 1 算法性能对比较表

	0.01%数据帖 PAPR 超过	发射机 复杂度	计算量	收端是否需 要边带信息
未加任何 算法(原来)	11.5db	最低	0	否
SLM (V=8)	8.3db	较低	1	要
SLM (V=16)	7.7db	一般	2	要
PTS 优化 迭代算法	7.5db	一般	2	要
SLM (V=32)	7.2db	高	4	要
SLM (V=64)	7.0db	最高	8	要
SLM(V=8) 线性组合	6.7db	最低	1	否

注:此处计算量以前面公式(4)、(5)为基础,预定义 V=8 计算量为单位 1。

3 结 论

在探讨改善 PAPR 性能的 SLM 概率类算法原

理及现有的一些较优算法的基础上,兼顾实际应用、实现的可行性及复杂度,提出了一种 SLM 算法的改进算法,在实际应用中,当对收、发端实现的复杂度、计算复杂度、成本控制和实时性要求较高的情况下,改进算法相当实用,特别适合于工程实际应用的需

要。如果在扰码序列  $M$  更多、扰码插入方式更合理优化、时域备选序列线性组合方式进一步优化的情况下,改进算法的 PAPR 抑制效果将得到更好的体现。但是新算法也存在一定的缺陷:当时域线性组合序列数越多,寻找最优时域序列的寻找范围就更大,这样不可避免的会增加一小部分计算量。

#### 参考文献:

- [1] 王文博,郑侃,宽带无线通信 OFDM 技术(二版)[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [2] WEINSTEIN S, EBERT P. Data transmission by frequency-division multiplex using the discrete fourier transform[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1971, 19(15): 628-634.
- [3] BAHAI A R S, SALTZBERG B R. Muli-carrier digital communications: theory and applications of OFDM[M]. (22nd ed). New York, Springer, 2004: 343-347.
- [4] JAYALATH A D S, TELLAMBURA C. A blind SLM receiver for PAR-reduced OFDM[C]//2002 IEEE 56<sup>th</sup> Veliicirlar Technology Conference, September 24-28, 2002, Vancouver, Canada. [S. l.]: IEEE Incorporated, [2002]: 219- 222.
- [5] OHKUBO N, OHTSUK T. Design criteria for phase sequences in selected mapping [C]//The 57<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conference, April 22-25, 2003, Jeju, Korea. [S. l.]: IEEE Incorporated, [2003]: 373-377.
- [6] LE GOFF S Y, AL-SAMAHI S S, KHOO B K, et al. Selected mapping without side information for PAPR reduction in OFDM[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3320-3325.
- [7] LIM D W, SHIN D J, HEO S J, et al. Analysis of PAPR reduction performance of SLM schemes with correlated phasevectors [C]//The 2009 IEEE International Conference Symposium on Information Theory, June 28-July 3, 2009, Seoul, Korea. [S. l.]: IEEE Incorporated, 2009: 1540-1543.
- [8] PARK S H, LEE J Y, HONG E P, et al. Merged SLM scheme for PAPR reduction of OFDM system with low complexity[C]//The 32<sup>nd</sup> International Conference on Sarnoff Symposium, March 30-April 1, 2009, Princeton, New Jersey, USA. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [9] MARUYAMA T, MARUTA K, MASHINO J, et al. Control information transmission without resource consumption for PAPR reduction of OFDM signal[J]. Electronics Letters, 2009, 45(8): 406-408.
- [10] ALSUSA E, YANG L. Selective post-IFFT amplitude randomising for peak-to-average power ratio reduction in orthogonal frequency-division multiplexing-based systems [J]. Communications, LET, 2008, 2(4): 553-561.
- [11] IRUKULAPATI N V, CHAKKA V K, JAIN A. SLM based PAPR reduction of OFDM signal using new phase sequence[J]. Electronics Letters, 2009, 45(24): 1231-1232.
- [12] VADALI S, CHAKRABARTI S, RAJAKUMAR R V. A low complexity PAPR reduction scheme without side information for pilot assisted OFDM systems [C]// IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems, 2008, December 8-10, 2008. Kharagpur, India; IEEE Incorporated, 2009, 03(06): 1-4.
- [13] KIM S W, BYEON H S, KIM J K, et al. An SLM-based real-time PAPR reduction method using dummy sequence insertion in the OFDM communication[C]// 2005 Fifth International Conference on Information Communications and Signal Processing, December 6-9, 2005, Bangkok. [S. l.]: IEEE Incorporated, 2006: 258-262.
- [14] YANG L, ALSUSA E. Novel low-complexity post-IFFT PAPR reduction technique for OFDM systems[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006, April 3-6, 2006. Las Vegas, USA; IEEE Incorporated, 2006: 2006- 2011.
- [15] VALLAVARAJ A, STEWART B G, HARRISON D K, et al. Reducing the PAPR of OFDM using a simplified scrambling SLM technique with no explicit side information [C]//14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems, 2008, December 8-10, 2008. Melbourne, VIC; IEEE Incorporated, 2008, 12: 902-907.
- [16] HAN S. An effective SLM-PRSC hybrid scheme for OFDM PAPR reduction based on repeated utilization of identical PRSC sequences in time domain[J]. IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2006, 4: 298-301.
- [17] LI Y C, YANG S Z. An effective low-complexity method for PAPR reduction in OFDM-based systems[J]. 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, 2009, 07: 176-180.
- [18] LIU Y F, LU G Y. Enhanced selected mapping via candidates combination for PAPR reduction in OFDM [C]// The 5<sup>th</sup> International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, September 24-26. Beijing, China; IEEE Incorporated, 2009, 10: 1-4.