

# A Research on Improved Algorithm of Reducing OFDM PAPR

#### ZENG Zhao-hua, YE Xiu-bin

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China Email: zeng.zhaohua@zte.com.cn, yexiubin0608@163.com

**Abstract:** OFDM has its good performance as the LTE key technologies, specially the OFDM modulating technology has provided the higher frequency use factor. But the OFDM modulation has a problem that the PAPR of signals is excessively high caused by many sub-carrier superimposition in time domain. This problem leads power amplifier efficiency to reduce, then easy to cause the signal to enter the nonlinear area of the power amplifier to have the distortion, thus reduces the performance of overall system. We research the problem of too high PAPR of OFDM signal in the TDD LTE system, and find some essential methods to reduce the OFDM peak, then carry on the performance simulation. This article mainly introduced the concept of reducing PAPR in intermediate frequency, and has designed the algorithm of noise forming in the intermediate frequency. This method has avoided the question of peak value regeneration after signal synthesis in the baseband peak clipping.

Keywords: OFDM; PAPR; Intermediate frequency peak clipping; CCDF; TDD LTE

# 一种降低 OFDM 峰均比改进算法的研究

#### 曾召华,叶秀斌

西安科技大学,西安,中国,710054 Email: zeng.zhaohua@zte.com.cn, yexiubin0608@163.com

【摘要】OFDM 作为 LTE 的关键技术有着其良好的性能,特别是 OFDM 调制技术提供了更高的频率 利用率,但是 OFDM 调制存在时域多个子载波叠加造成信号峰均功率比过高的问题,致使功率放大器 效率降低,进而易使信号进入功放的非线性区产生失真畸变,从而降低整个系统性能。针对 TDD LTE 系统 OFDM 信号的峰均比过高问题进行研究,并对降低 OFDM 峰均比的一些基本方法进行性能仿真。 本文主要介绍了中频降低峰均比的概念,并设计了中频中噪声成形算法,避免了基带削峰算法存在的 信号合成后的峰值再生的问题,并进行了相应的仿真。

【关键词】OFDM; PAPR; 中频削峰; CCDF; TDD LTE

## 1. 引言

随着社会的发展和经济的增长,人们对通信的要求也越来越高。"移动通信宽带化"成为移动通信技术的发展趋势,2004 年底 3GPP 通过了 LTE 即"3G 长期演进"的立项工作。LTE 项目实质是对移动通信与

宽带无线接入(Broadband Wireless Access, BWA)技术的融合。对于 LTE 系统中物理层下行的多址方案, 采用的是基于循环前缀(Cyclic Prefix, CP)的正交频 分复用(OFDM)。OFDM 调制技术提供了更高的频 率利用率,但是 OFDM 调制存在时域多个子载波叠加 造成信号峰均功率比(PAPR)过高的问题,致使功率 放大器效率降低,进而易使信号进入功放的非线性区 产生失真畸变,从而降低整个系统性能。因此,降低 OFDM 系统中所存在的高峰均功率比成为重要的研究 领域<sup>[5]</sup>。

#### 1.1 OFDM 系统信号模型

**资助信息:**1、LTE 基站多天线关键技术的研究,09JK596、陕西省 教育厅专项科研计划项目

<sup>2、</sup>室内 MIMO 关键技术整体解决方案、2010k06—03、陕西省科技厅 工业公关项目

**Fund:** 1. LTE base station key technology of multi-antenna,09JK596 Education Department of Shaanxi Province, a special research project 2. Indoor MIMO key technology integrated solutions.2010k06-03, Science and Technology Department of Shaanxi Province of industrial research projects



正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是多载波系统的一种,它将一 个高速的数据流分解为若干个低速的数据流并行处 理,从而降低或部分消除了时域的符号干扰(ISI)。 它的基本模型框图如下<sup>[2]</sup>

在OFDM系统中,已调制的OFDM信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j2\pi k\Delta ft} \qquad 0 \le t \le T_s$$
(1)

式中,N为载波数,Ts为OFDM符号宽度, $\Delta f = 1/Ts$ 为子载波频率间隔, $d_k$ (k=0,1,…N-1)为输入数据符号。s(t)的离散形式s(n)可表示为:

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \qquad n = 0, 1, \dots, N-1$$
(2)

本文的仿真建立在 TDD LTE 系统物理下行共享 信道进行,整个仿真过程以子帧为基本循环单位,采 用常规 CP 长度(144chips)。一个子帧包括 7 个 OFDM 符号,设置 512 个子载波,子载波宽度  $\Delta f = 15KHz$ , 采用 512 点的 IFFT 进行 OFDM 调制,调制方式为 QPSK<sup>[8]</sup>。

### 1.2 OFDM 系统均峰比的定义及分布

由于 OFDM 系统是多载波系统,其信号在时域 上表现为N个子载波的叠加,当N个具有相同或相似 相位的信号叠加在一起时峰值功率是平时功率的 N 倍,从而产生很大的峰值功率和平均功率之比,简称 峰均比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR),定义 为:

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \qquad n = 0, 1, \dots, N-1$$
(3)

其中X,表示经过 IFFT 运算之后所得到的输出信号,

 ${\mathbb E} {\mathbb P} \, x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k W_N^{nk} \ .$ 

在采用二进制相移键控(BPSK) 调制时,系统的



PARA值可以达到子载波数N,即

$$PAPR_{\max}(OFDM) = N \tag{4}$$

在实际应用中,通常采用峰均比超过某一门限值 δ的概率,即互补累积分布函数(CCDF)来衡量 OFDM系统的PAPR分布,即<sup>[3]</sup>

$$P\{PAPR \ge \delta^2\} = 1 - P\{PAPR \le \delta^2\} = 1 - (1 - e^{-\delta^2})^N \quad (5)$$

由上式可见, N 增大时, *P*{PAPR>δ<sup>2</sup>} 也随着增 大,即随着子载波数量的增多,各子载波之间的相位 的相关性增大了,因此同相子载波叠加后 PARP 值变 大的可能性增加。

在降低 PARP 同时也会引起信号失真的情况,我 们可以使用 EVM 来衡量信号失真的大小,定义失真 的信号为  $e = x(n) - x^*(n)$ ,则

$$EVM = \sqrt{\frac{E[e^2]}{E[x^2]}} \tag{6}$$

令削峰前信号的是削峰后信号的 $\alpha$ 倍,即 $x(n) = \alpha x^*(n)$ ,则

$$e = x(n) - x^{*}(n) = \alpha x^{*}(n) - x^{*}(n) = (\alpha - 1)x^{*}(n)$$
$$EVM = \sqrt{\frac{E[(\alpha - 1)x^{*2}]}{E[\alpha x^{*2}]}} = \sqrt{\frac{(\alpha - 1)^{2}E[x^{*2}]}{\alpha^{2}E[x^{*2}]}}$$
$$= 1 - \frac{1}{\alpha}$$
(7)

可以看到 EVM 和α 成反比关系,而α 同门限 A 是正比关系,因此 EVM 和门限 A 是反比关系,也就 是说削峰门限越低则 EVM 恶化情况越严重,但是削 峰效果越好。

### 2. 降低 OFDM 信号峰均比方法的比较

对于 OFDM 系统,过高的峰均比(PAPR)会给 系统带来诸多的不利因素,如增加模数转换和数模转 换的复杂度,低 RF 功率放大器的效率,增加发射机 功放的成本和耗电量使得不利于在上行链路实现等。 为了解决这些问题,一般有:限幅类、编码类和概率 类几种方法,它们各有优缺点。对于基带削峰,在射 频端的信号是基带信号的合成,因此信号到中频后有 可能会出现峰值再生的问题,它会使基带削峰的效果 变差。而中频削峰则可以有效的抑制这个问题,因此 被大范围的应用于削峰的算法中。本文就基带硬削峰 和中频削峰进行部分的研究,并做了相应的仿真<sup>[4]</sup>。 Information and Communication Technology and Smart Grid

## 2.1 限幅方法降低 OFDM 信号峰均比

限幅类技术是最简单的一种技术,又被称为预畸 变技术,它的基本思想是直接在 OFDM 信号幅度峰值 或峰值附近采用非线性才做来降低信号的 PAPR 值。 非线性过程的缺点是会引起 OFDM 信号的畸变,产生 过大的带外频率泄露以及带内干扰噪声,在解调端增 加信号的误码率。

以下以硬限幅为例,它是在时域上对基带信号进行幅度门限判断,给定一个门限值,对于时域 OFDM 信号中包络超过门限值得部门进行直接削除,保持削除前信号的相位;对于时域 OFDM 信号中包络未超过门限值得部门则直接输出,不做任何处理。

假设 A 为限幅门限值,当 OFDM 时域信号  $s_{k,n}$ 的 幅度  $|s_{k,n}|$ 大于该门限值,则将其幅值缩减为 A,相位 保持不变,从而得到限幅后的信号  $\tilde{s}_{k,n}$ 。经过限幅处 理后的时域信号  $\tilde{s}_{k,n}$ 与原信号  $s_{k,n}$ 有如下关系:









$$\tilde{s}_{k,n} = \begin{cases} s_{k,n}, |s_{k,n}| \le A \\ Ae^{j\phi_{k,n}}, |s_{k,n}| > A \end{cases} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

Scientific

Research

其中 A 表示限幅门限,  $|s_{k,n}|$ 表示  $s_{k,n}$  的包络,  $\phi_{k,n}$ 表示  $s_{k,n}$  的相位<sup>[6],[7]</sup>。

这种方法优点是操作简单实现方便,由仿真信号 图 4.2 也可见峰值有所减小,但是其会对信号造成比 较大的畸变从而影响系统的解调性能,此外在时域对 信号进行畸变处理会造成信号频谱的带外辐射。

当门限为7时,CCDF图如下所示

通过重新设置参数,经过仿真可知,随着门限的 升高,峰值减小的效果越不明显。在门限为7时为临 界状态,降低 PAPR 效果趋于无效。

#### 2.2 中频削峰法降低 OFDM 信号峰均比

限幅法是在基带降低 OFDM 符号峰均比,基带降 低峰均比方法应用起来比较灵活,但是在基带信号在 载波合成到中频后容易产生新的峰值信号,即峰值再 生的问题。我们提出将信号经过采样至中频进行降低 信号峰均比,以避免基带信号合成后产生的峰值再生 的问题。基带削峰和中频削峰的示意图分别如下:



Figure 4. Amplitude limit method CCDF graph 图 4. 限幅法的 CCDF 曲线图



Figure 5. Baseband peak clipping 图 5. 基带削峰





噪声成形是一种与限幅方法类似的降低 PAPR 的 有效方法。它的基本思想是:令中频 OFDM 信号 *x* 中 大于限幅门限 A 的信号为噪声信号 *n*,对噪声信号 *n* 进行滤波成形,然后将成形的噪声信号和原始的 OFDM 信号进行对消,从而降低信号的峰均比。需要 注意的是噪声成形是在中频完成的。基本的算法框图 如下所示

根据相关资料提到的算法进行仿真,步骤如下<sup>[1]</sup>: 1)先将基带信号经过防混叠滤波器,再通过内插 得到中频信号

$$x_{I}(m) = \begin{cases} x(\frac{m}{I}), (m = 0, \pm I, \pm 2I, \cdots) \\ 0, \pm E \end{cases}$$
(9)

其中 x 表示频域信号, I 表示上变频的倍数。

2)对 x<sub>I(m)</sub>进行 IFFT 变换,得到 OFDM 时域信号 X(n) = IFFT(x<sub>I</sub>(m)) (10)

3)对X(n)进行硬限幅处理,得到噪声信号N(n)

$$N(n) = \begin{cases} X(n) - \frac{A}{\sqrt{|X(n)|^2}} X(n), & |X(n)|^2 > A^2 \\ 0, & |X(n)|^2 < A^2 \end{cases}$$
(11)

其中 A 是硬限幅的门限。

4)为了滤除带外的杂散信号,噪声信号 N(n) 通过 和原信号带宽相同的一个低通滤波器,这个滤波器要 尽量保证通带平整,仿真中采用 Parks-McClellan 冲击 响应滤波器

$$N^{*}(n) = \sum_{n=0}^{J^{*}N-1} N(n)h(k-n)$$
(12)

5)把经过噪声成形后的噪声信号和经过处理的 OFDM 信号进行对消,再经过降采样得到削峰后的信



Figure 7. Intermediate frequency noise shaping algorithm diagram 图 7. 中频噪声成形算法框图

号 X\*(n),最后求其峰均比。

$$X^{*}(n) = X(n) - N^{*}(n)$$
(13)

由以上算法可见,中频削峰也有一定的缺点,主 要表现在:

1)增加了系统的复杂度和运算量。因为在基带信
 号升采样到中频信号时,需要增加防混叠滤波器,同
 时降采样是也要增加去除镜像频率的滤波器。

2)中频滤波器一旦确定,则其载波带宽和相应的 载波数也随之确定,因此不能灵活应用于不同带宽的 情况。

## 3. 仿真结果及分析

仿真结果如下所示:

由仿真结果可以看到,中频噪声成形算法与硬限 幅法相比能够更好的降低系统 PAPR 的性能,并且随 着限幅门限 A 的降低,削峰性能越来越好。然而由表 1 数据可以看到,当门限值减小时,信号的 EVM 增大, 由此可见,降低限幅门限会增加信号的畸变程度,从



Figure 8. Intermediate frequency peak clipping method CCDF

graph 图 8. 中频削峰法的 CCDF 曲线图

Table 1. Threshold and EVM data

#### 表 1. 门限值与 EVM 数据

门 限 值	4	5	6	7	8	9	10	11	12

EVM 0.7912 0.7487 0.7062 0.6637 0.6213 0.5788 0.5363 0.4939 0.4514



而降低系统的解调性能,提高了误码率。但是同上面的限幅法对比,中频噪声成形算法在权衡各方面因素的情况下,保证了系统的解调性能,有效的降低了 OFDM 信号的 PAPR,具有较好的削峰效果。

# 4. 结束语

本文对比了基带削峰的算法,着重介绍了中频削 峰算法及其优缺点,提出一种基于中频削峰的中频噪 声成型的算法,经过仿真证明其在降低 OFDM 信号的 峰均比的基础上,能有效的减少由于基带信号合成而 产生的中频峰值再生的问题。这种既保证系统 PAPR 性能又有效防止了中频峰值再生的方法在实际应用中 具有重要的意义。

## 致谢

本论文是我在研究生阶段学习的部分总结,在此 我衷心的感谢给予我帮助的良师益友。尤其感谢我的 导师曾召华副教授的精心指导。同时我还要感谢赵谦 老师和王辉师兄在课题研究中给予的帮助。

最后要感谢我的家人以及周围帮助我的同学和朋友。我的课题研究离不开你们的支持和帮助,让我顺利完成本论文,在此献上我最诚挚的敬意和深深的感谢!

# References (参考文献)

Wang Hui. Research on Reducing PAPR of TDD LTE System
 [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2004.
 3-21.
 王辉.基于 TDD LTE 系统的降低峰均比方法研究[D]. 西安科

土砗-基于 IDD LIE 系统的碎似哞均比方法研究[D]. 四女科 技大学,2009

- [2] Tang Liping. Research on Reducing PAPR in 3GPP LTE System
   [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008
   唐利平. 3GPP LTE 中降低峰均比的研究[D]. 电子科技大学, 2008
- [3] Wang Zhiyong, Pang Weizheng. An improved tone reservation method for PAPR reduction in OFDM system [J]. Applied Science and Technology. 2008,(09). 王志勇,庞伟正. 一种改进的降低 OFDM 峰均比的载波预留法 [J]应用科技, 2008.(09).
- [4] Zhou Guoqiang. The Research on PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) Reduction Techniques in OFDM Systems[D]Xidian University,2008.
   周强国. OFDM 系统中降低 PAPR 技术的研究[D]西安电子科技大学,2008.
- [5] Shen Jia. 3GPP LTE core technologies and standardized progress
  [J] Mobile communication, 2006,(04).
  沈嘉. 3GPP LTE 核心技术及标准化进展[J]移动通信, 2006,(04).
- [6] M. Friese. On the degradation of OFDM-signals due to peak-clipping in optimally predistorted power amplifiers. IEEE Global TelecommunicationsConference, 1998, 2:939 ~ 944.
- [7] Armstrong J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering. Electronics letters,2002,35 (5):769 ~ 773.
- [8] 3GPP TS 36 .211 V8.4.0 .2008.9