

# 一种降低 FBMC-OQAM 系统 PAPR 的算法

吴建霞 杨永立

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081)

**摘要** 滤波器组多载波(Filter Bank Multi-Carrier, FBMC)与偏移正交振幅调制(Offset Quadrature Amplitude Modulation, OQAM)相结合的 FBMC-OQAM 技术在无线通信系统中具有频谱效率高和无需同步等特点。然而, FBMC-OQAM 系统较高的峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)容易导致信号失真、频谱扩展、系统性能下降。鉴于此,文中提出一种载波预留(Tone Reservation, TR)和  $\mu$ -律压扩联合的新方法(TR- $\mu$ Law)来降低 FBMC-OQAM 系统的 PAPR。TR 方法具有无失真特性,而  $\mu$ -律压扩法虽然给 FBMC-OQAM 系统带来了一定失真,但是能显著降低 PAPR。TR- $\mu$ Law 方法将二者结合,实现了两种方法的利弊互补。仿真结果表明,TR- $\mu$ Law 方法在降低 PAPR 方面的性能优于  $\mu$ -律压扩法和 TR 方法,在  $\mu=3$  和 Iterations=8 时 TR- $\mu$ Law 方法的 PAPR 较后两者分别降低约 1.0 dB 和 3.4 dB,且 BER 性能优于  $\mu$ -律压扩法。

**关键词** 基于滤波器组的多载波通信系统,峰均功率比,载波预留,非线性压扩变换,联合法

**中图分类号** TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.06.015

## Algorithm for Reducing PAPR of FBMC-OQAM System

WU Jian-xia YANG Yong-li

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract** FBMC-OQAM technique combining filter bank multi-carrier (FBMC) and offset quadrature amplitude modulation (OQAM) shows the characteristics such as high spectrum efficiency and without synchronization in wireless communication system. However, the higher peak-to-average power ratio (PAPR) in FBMC-OQAM systems can easily lead to signal distortion, spectrum extension and system performance degradation. Therefore, this paper proposed a method to reduce the PAPR by applying a new expansion hybrid method for FBMC-OQAM systems. The new method called TR- $\mu$ Law combines Tone Reservation (TR) and  $\mu$ -law companding scheme. The TR method has no distortion characteristic and the  $\mu$ -law companding method causes the distortion to FBMC-OQAM system, but it has obvious effects of reducing PAPR. Therefore, TR- $\mu$ Law hybrid method realizes the complementary advantages of the two methods. The simulation results show that the performance of reducing PAPR is better than that of both  $\mu$ -law and TR methods which reduce about 1.0 dB and 3.4 dB at  $\mu=3$  and Iterations=8, respectively, and the BER performance of the TR- $\mu$ Law method is better than that of  $\mu$ -law method.

**Keywords** FBMC-OQAM, Peak-to-average power ratio, Tone reservation, Nonlinear compressing and expanding transform, Hybrid method

## 1 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)由于使用循环前缀等缺点,已无法在 5G 场景下满足多载波多址传输技术的要求,因此研究人员开始寻求其他多载波实现方案<sup>[1]</sup>。基于滤波器组并采用交错正交幅度调制的多载波通信系统(Filter Bank Multicarrier with Offset Orthogonal Amplitude Modulation, FBMC-OQAM)被我国学

者最早应用于国家 863 计划后 3G 实验系统中<sup>[2]</sup>,由于其能够增加频谱效率,提高光谱整形,降低带外泄露等,得到了越来越多研究者的关注<sup>[3]</sup>。同时,FBMC-OQAM 是一种多载波技术,有较高的峰均功率比(PAPR),会降低高功率放大器(High Power Amplifier, HPA)的工作效率,导致信号失真、频谱扩展、系统性能下降<sup>[4]</sup>。因此,FBMC-OQAM 信号的 PAPR 减小技术是通信领域亟需解决的课题。

FBMC-OQAM 系统由于其信号的重叠特性无法直接运

到稿日期:2017-03-30 返修日期:2017-06-18

吴建霞(1989—),女,硕士生,主要研究方向为无线通信,E-mail:1169474032@qq.com;杨永立(1971—),男,教授,主要研究方向为无线通信、网络化自动控制理论和应用等,E-mail:553116411@qq.com(通信作者)。

用于 OFDM 中来降低 PAPR,如参数盲估计方法<sup>[5]</sup>。文献[6]讨论了脉冲幅度调制符号的 FBMC-OQAM 系统降低 PAPR 的方案,但是这仅限于 PAM 符号且 BER 性能较差。目前,多模块联合优化技术<sup>[7]</sup>和滑动窗口语音预留技术<sup>[8]</sup>也被应用于 FBMC-OQAM 系统,以降低 PAPR,但不足之处是系统的误码性能没有被进一步研究且系统具有较高的复杂性。文献[9]提出了一种预编码算法,能有效降低 PAPR,但编码与解码过程较为复杂。文献[10]提出了一种低复杂度双层 PTS 搜索算法(D-PTS),虽然相比于传统 PTS 算法,其计算复杂度有所降低,但依然较高。文献[11]提出了一种色散选择性映射(Dispersion Selective Mapping, DSLM)方法,考虑了 FBMC-OQAM 的时间色散性,但是计算复杂度较高。文献[12]指出将 OFDM 系统信道估计方法应用到 FBMC-OQAM 系统中,但是其估计性能有待提高。

本文提出一种“联合”的思想,将 TR 方法和  $\mu$ -law 压扩法相结合形成一种新的方法,称为 TR- $\mu$ Law 联合法。TR- $\mu$ Law 联合法结合了 TR 和  $\mu$ -law 的优势,能够在有效降低 FBMC-OQAM 系统的 PAPR 的同时具有较好的误码率(Bit Error Rate, BER)性能。

## 2 FBMC-OQAM 系统

### 2.1 滤波器设计及偏移正交幅度调制

目前,FBMC 滤波器组有扩展快速傅里叶变换和多相滤波网络两种较常见的等效实现方案<sup>[13]</sup>。

本文采用 PHYDYAS 原型滤波器,运用频谱抽样技术。设计原型滤波器时需要减小其带外干扰,本文通过增加抽头系数来解决这个问题。文中用  $H_k$  表示滤波器组的抽头系数,其满足如下关系: $H_0 = 1, H_1 = 0.971960, H_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}, H_3 = 0.235147, H_k = 0, 4 < k < L_h - 1$ 。

滤波器的脉冲响应为:

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{A}} [1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k H_k \cos(\frac{2\pi kt}{KT})], & t \in [0, KT] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $L_h$  为滤波器长度,  $K$  为过采样因子,  $T$  为符号周期, 标准化常量  $A = KT [1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} H_k^2]$ 。

偏移正交幅度调制(Offset Quadrature Amplitude Modulation, OQAM)是将正交振幅调制符号的实部或虚部做  $1/2$  符号周期的时间偏移。首先将输入的复杂符号从复数表现形式转换为实部和虚部两部分,使采样率变成原来的 2 倍;然后将这些符号与给定序列进行相乘处理。

OQAM 符号间隔是  $T/2$ , 子载波间隔是  $1/T$ , 相邻子载波间是有重叠的,其实虚交替的传输可以去除相邻时频方向上的符号干扰。

FBMC 与 OQAM 调制相结合能够提高数据的传输速度和频谱利用率。

### 2.2 FBMC-OQAM 信号结构

FBMC-OQAM 系统发送端的结构模型如图 1 所示。

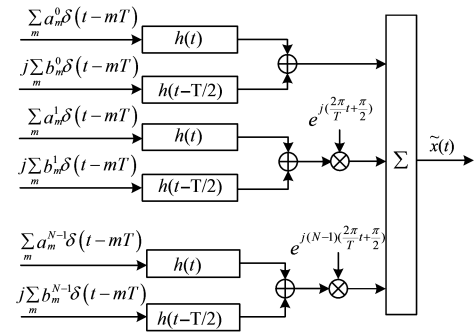


图 1 FBMC-OQAM 系统发送端模型

Fig. 1 Transmitting terminal model of FBMC-OQAM system

对于含有  $M$  个复杂输入信号、 $N$  个子载波的 FBMC-OQAM 系统,其发射端可以表示为:

$$x_m^n = a_m^n + j \times b_m^n \quad (2)$$

其中,  $n \in [0, N-1], m \in [0, M-1], a_m^n$  和  $b_m^n$  分别为第  $n$  个子载波上传输的第  $m$  个数据块的实部和虚部。

FBMC-OQAM 信号的实部和虚部在时域上相差  $T/2$ ,在对信号进行过采样时,采样周期为  $T_0$ ,过采样因子为  $K$ 。文献[14]指出,过采样因子  $K \geq 4$  时,采样后信号的 PAPR 值与连续信号的 PAPR 值能最大程度地接近,故本文中  $K$  取 4。

然后对信号进行滤波,信号通过原型滤波器  $h(t)$  和  $N$  个子载波调制得到:

$$x_m^n(t) = [a_m^n h(t - mT) + j b_m^n h(t - \frac{T}{2} - mT)] e^{j k (\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{2})} \quad (3)$$

最后,将  $M$  个数据块叠加在一起,得出 FBMC-OQAM 的最终信号  $X(t)$ :

$$X(t) = \sum_{m=0}^{M-1} X_m(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} [a_m^n h(t - mT) + j b_m^n h(t - mT - \frac{T}{2})] e^{j n (\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{2})} \quad (4)$$

FBMC-OQAM 信号的功率分布如下:

$$P_{avg} [X(t)] = |X(t)|^2 \quad (5)$$

图 2 为 FBMC-OQAM 信号的功率分布图。其中参数设定为:  $M=16, N=64, K=4, T=64$ 。

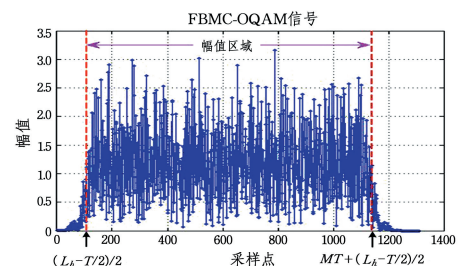


图 2 FBMC-OQAM 信号的功率波形图

Fig. 2 Power waveform of FBMC-OQAM signal

基于原型滤波器的特点和 FBMC-OQAM 信号实部与虚部之间  $T/2$  的时延,可知其功率峰值主要集中在  $[(L_h - T/2)$

2)/2, MT+(L<sub>h</sub>-T/2)/2]之间,区间宽度为 MT,如图 2 所示。从图中还可以看出各相邻数据块间相互重叠。

### 2.3 PAPR 的定义

通常地,将一段时间内信号峰值功率与平均功率的比值定义为峰均功率比。

给定一个由  $N$  个互相独立正交且带宽相等的子载波组成的 OFDM 系统。假设输入信号为  $X$ ,则连续的 OFDM 传输信号可表示为:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kt/T} \quad (6)$$

其中,  $t \in [0, T]$ 。对于 OFDM 系统,连续时间基带信号为  $x(t)$  的 PAPR 表达式为:

$$PAPR_{x(t)} = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2}{\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt} \quad (7)$$

使用过采样技术对连续信号  $x(t)$  进行采样。采样间隔为  $\frac{T}{N}$ ,则离散 OFDM 符号可表示为:

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi nk/N} \quad (8)$$

其中,  $n=0, 1, \dots, N-1$ 。则基带调制离散时间信号  $x[n]$  的 PAPR 定义为:

$$PAPR(x[n])_{dB} = 10 \log \left( \frac{\max\{|x[n]|^2\}}{E\{|x[n]|^2\}} \right) \quad (9)$$

互补累计分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)是一种衡量和计算多载波 PAPR 的常用方法。OFDM 信号  $x[n]$  的 PAPR 的 CCDF 定义为第  $m$  个调制符号的 PAPR 超过给定阈值的概率:

$$CCDF[PAPR(x_n)] = \Pr(PAPR(x_n) > \gamma) \quad (10)$$

下文中,均用 CCDF 来对 FBMC-OQAM 信号的 PAPR 进行分析。

## 3 语音预留和 $\mu$ -律压扩联合法

### 3.1 TR 方法在 FBMC-OQAM 系统中的应用

语音预留(Tone Reservation, TR)的基本思路是:把  $N$  个音频分割成为数据音频和峰值减小音频(Peak Reduction Tone, PRT),通过选择最优 PRT 使时域的 OFDM 信号具有较小的 PAPR,接收机和发射机通常已知 PRT 的位置。

FBMC-OQAM 信号的第  $m$  个数据块的时间连续信号的表达式为:

$$X_m(t) = \sum X_m^n \quad (11)$$

其中,  $mT \leq t \leq (m+K+\frac{1}{2})T$ ,  $X_m(t)$  为  $n$  个子载波信号的叠加,由于原型滤波器的特性,一个数据块信号在时域跨越的时间为  $(K+1/2)T$ 。

传统 TR 方法把一部分子载波预留出来作为峰值消除载波(Peak Reduction Tone, PRT),预留子载波的有序集合可表示为:

$$\mathcal{R} = \{r_0, r_1, \dots, r_{Z-1}\} \quad (12)$$

其中,  $Z$  为预留子载波的数目,  $r_z$  为第  $z$  个预留载波编号。

FBMC-OQAM 信号的第  $m$  个数据块  $X_m$  由未预留的子载波上的有效数据信号  $\hat{X}_m^n$  和峰值消除载波上的峰值消除信号  $D_m^n$  两部分组成。第  $m$  个数据块在第  $n$  个子载波上的信号可以表示为:

$$X_m^n = D_m^n + \hat{X}_m^n = \begin{cases} D_m^n, & n \in \mathcal{R} \\ \hat{X}_m^n, & n \in \mathcal{R}^c \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\mathcal{R}^c$  为  $\mathcal{R}$  的补集,  $D_m^n$  和  $\hat{X}_m^n$  满足:

$$\begin{cases} D_m^n = 0, & n \in \mathcal{R}^c \\ \hat{X}_m^n = 0, & n \in \mathcal{R} \end{cases} \quad (14)$$

即在预留载波上传输峰值消除信号,在非预留载波上传输有效信号。

通过合理选择  $D_m$  可以有效降低信号 PAPR,其中  $D_m = [D_m^0, D_m^1, \dots, D_m^{N-1}]$ 。

FBMC-OQAM 系统中相邻数据块的信号相互重叠,如果将传统 TR 方法直接应用到 FBMC-OQAM 系统,由于受到多个相邻数据块的影响,在某个时间间隔内,信号的 PAPR 可能并没有降低。

因此,FBMC-OQAM 系统直接应用传统 TR 方法的效果比 OFDM 系统差。但由于 TR 方法为无失真方法,在对信号误码率有一定要求时,其依然有一定的应用价值。

### 3.2 $\mu$ -law 法在 FBMC-OQAM 系统的应用

非线性压缩变换是对数压扩特性的一种折线近似法,其基本思路是:在发射端将传输的信号进行有效地压缩后再继续传输,在接收端对信号做扩展处理。主要方法有 A-律压扩(A-law)和  $\mu$ -律压扩( $\mu$ -law)。由文献[15]可知,  $\mu$ -law 比 A-law 性能更好。

对于一个给定输入信号  $X$ ,  $\mu$ -law 的非线性变换函数可以表示为:

$$F(X) = \text{sgn}(X) \frac{\ln(1+\mu|X|)}{\ln(1+\mu)} \quad (15)$$

其中,  $\mu$  为  $\mu$ -law 系数,  $-1 \leq |X| \leq 1$ 。然而由图 2 可知, FBMC-OQAM 信号的幅值在大部分采样点都大于 1,因此将  $\mu$ -law 应用于 FBMC-OQAM 系统时,需要对式(15)进行改进。如果将输入信号的功率与其平均功率相除记为  $|X|$  并将其代入公式,将平均功率作为系数与改进后的公式相乘,那么将在一定程度上满足  $|X|$  的约束条件。本文将新的输入信号记作  $X_{\mu\text{-law}}$ ,则改进后的公式如下:

$$F(X) = \text{sgn}(X) P_{\text{mean}} \frac{\ln(1+\mu|X_{\mu\text{-law}}|)}{\ln(1+\mu)} \quad (16)$$

其中,  $P_{\text{mean}}$  为 FBMC-OQAM 信号  $X$  的平均功率,且  $X_{\mu\text{-law}} = X \cdot P_{\text{mean}}^{-1}$ 。

由分析可知,  $\mu$ -律压扩法虽然能够很好地降低 FBMC-OQAM 信号的 PAPR,但同时也给系统带来了一定的失真。

### 3.3 TR 与 $\mu$ -law 联合方法

基于 TR 方法和  $\mu$ -law 方法各自的利弊,本文提出一种“联合”思想,将 TR 方法与  $\mu$ -law 方法联合使用来降低 FB-

MC-OQAM系统的 PAPR, 实现利弊互补, 从而在降低 FBMC-OQAM 系统 PAPR 的同时, 减少信号的失真。由于提出的新方法将 TR 与  $\mu$ -law 相结合, 因此提出的新方法被称为 TR- $\mu$ Law 联合方法。

由于 TR 方法需要选择合适的第  $m$  个数据块中第  $n$  个子载波上的峰值消除信号  $D_m$ , 因此 TR- $\mu$ Law 联合方法的基本思路是: 先对 FBMC-OQAM 信号运用 TR 方法, 然后对得到的信号运用  $\mu$ -律压扩法。

TR- $\mu$ Law 方法的流程如图 3 所示。

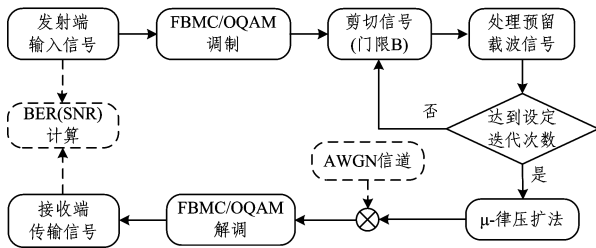


图 3 TR- $\mu$ Law 方法的流程图

Fig. 3 Flowchart of TR- $\mu$ Law method

下面给出 TR- $\mu$ Law 方法的实现步骤。

步骤 1 初始化。选取 PRT 序列集合  $\mathcal{R}$ , 实际应用由计算机随机选取; 可根据具体性能要求和应用场合, 选定最大迭代次数  $Iterations$  和  $\mu$ -law 压扩系数  $\mu$ 。

初始化有  $N$  个子载波、 $M$  个数据块的 FBMC-OQAM 原始输入信号, 表示为:

$$X = [X[0], X[1], \dots, X[N-1]]^T \quad (17)$$

其中,  $X[n] = [x_0^n, x_1^n, \dots, x_{M-1}^n]$ ,  $n \in [0, N-1]$ ,  $m \in [0, M-1]$ 。

根据 PRT 序列集合, 将信号  $X[n]$  的预留载波信号置零, 从而可以得到包含峰值消除载波的信号  $\hat{X}[n]$ , 表示为:

$$\hat{X}[n] = \begin{cases} X[n], & n \in \mathcal{R}^c \\ 0, & n \in \mathcal{R} \end{cases} \quad (18)$$

步骤 2 调制。对  $\hat{X}[n]$  进行 QAM 和 FBMC 多载波调制, 可得到 FBMC-OQAM 信号  $\hat{X}(t)$ 。

步骤 3 剪切信号。这一步与传统 TR 方法类似, 按照一定的门限阈值对 FBMC-OQAM 信号进行剪切。此处将门限阈值记为  $B$ , 在 TR 方法中通过式(19)计算得到门限阈值  $B$ :

$$R = \frac{B}{\sqrt{E[|\hat{X}(t)|^2]}} \quad (19)$$

其中,  $\hat{X}(t)$  为包含峰值消除载波的信号,  $R$  为剪切比例。剪切后的信号可表示为:

$$\hat{X}_c(t) = \begin{cases} \hat{X}(t), & |\hat{X}(t)| < B \\ Be^{j\angle X(t)}, & |\hat{X}(t)| \geq B \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $\angle \hat{X}(t)$  为信号  $\hat{X}(t)$  的相位角。运用复变函数公式  $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$  ( $\theta = \angle \hat{X}(t)$ ), 结合门限阈值和信号相位角, 对信

号进行剪切操作。式(20)对应的剪切信号理想值为:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & |\hat{X}(t)| < B \\ (B - |\hat{X}(t)|)e^{j\angle X(t)}, & |\hat{X}(t)| \geq B \end{cases} \quad (21)$$

理想状态下或者迭代次数足够大时,  $f(t)$  可以将信号的峰均功率降低到本文中设定的门限, 剪切后的信号表示为  $\hat{X}_c(t)$ 。

步骤 4 处理 PRT 集合  $\mathcal{R}$  对应的信号。对步骤 3 得到的信号  $\hat{X}_c(t)$  进行解调, 得到输出信号, 并取出预留载波上的信号; 然后对取出的预留载波上的信号进行调制, 可以得到峰值抵消信号  $X^{PRT}(t)$ ; 将  $X^{PRT}(t)$  叠加到原始信号, 可得到峰值降低信号  $X'(t)$  为:

$$X'(t) = \hat{X}_c(t) + X^{PRT}(t) \quad (22)$$

此处需要进行多次迭代计算, 即按照设定的迭代次数, 重复步骤 3 和步骤 4。当迭代次数达到设定的迭代次数  $Iterations$  时, 停止迭代。迭代操作完成后, 即可得到经过 TR 方法处理的 FBMC-OQAM 信号, 用  $X^{TR}$  表示。

步骤 5 运用  $\mu$ -律压扩方法。经过前面 4 个步骤的处理, FBMC-OQAM 信号峰值得到了有效降低, 然后在此基础上运用  $\mu$ -律压扩法。

对步骤 4 得到的经过 TR 方法处理的 FBMC-OQAM 信号  $X^{TR}$  采用  $\mu$ -law 方法, 根据步骤 1 设定的  $\mu$  值, 将各参数代入式(16), 对信号进行  $\mu$ -law 处理, 可得到最终信号  $X^{TR-\mu}$ :

$$X^{TR-\mu} = \text{sgn}(X^{TR}) P_{\text{mean}} \frac{\ln(1+\mu |P_{\text{mean}}^{-1} \cdot X^{TR}|)}{\ln(1+\mu)} \quad (23)$$

其中,  $P_{\text{mean}}$  为信号  $X^{TR}$  的平均功率。

由于 TR 方法通过预留载波来削弱信号峰值, 因此对 FBMC-OQAM 信号运用 TR- $\mu$ Law 联合方法时,  $\mu$ -律压扩方法需要在 TR 方法后, 即信号经过 TR 方法处理后, 再运用  $\mu$ -law 压扩法进行进一步处理。将最终信号通过 AWGN 信道, 并将接收端信号与发射端信号进行对比, 可以计算信号的信噪比。

经过以上 5 个步骤即可得到运用 TR- $\mu$ Law 方法后的 FBMC-OQAM 最终信号, 它的峰值和 PAPR 已得到了有效降低。

## 4 仿真实验和结果分析

为了验证理论分析的正确性和 TR- $\mu$ Law 方法的优越性, 本文在 PC 电脑上的 Win7 系统环境下使用 Matlab 仿真平台进行仿真实验。

### 4.1 仿真实验的参数设定与实施

为了使仿真实验真实、科学、公平, 选取 FBMC 和 OFDM 信号的符号数均为  $10^5$ , 子载波数和数据块数分别为 64 和 16, 记为  $S=10^5$ ,  $N=64$ ,  $M=16$ 。

FBMC-OQAM 信号采用 4QAM 调制, 信号周期为 64, 记为  $T=64$ 。过采样因子  $K$  为 4, 采样周期  $T_0$  取  $4T$ , 进而原型滤波器  $h(k)$  的长度  $L_h$  为  $4T-1$ , 这里将  $L_h$  近似看作  $4T$ 。

由文献[16]可知,剪切比例  $R$  取 1.9 时,TR 方法降低 PAPR 的性能最佳,因此本文仿真中  $R$  取 1.9,门限阈值  $B$  根据式(19)计算得到。由文献[17]可知,预留载波的编号随机选取时,PAPR 性能更佳,因此仿真过程中运用随机函数生成预留载波编号。

在仿真过程中通过进行  $S=10^5$  次仿真来模拟  $10^5$  个 FBMC-OQAM 符号数。每次仿真过程如下:首先根据原型滤波器的设计和 FBMC-OQAM 信号的原理生成 FBMC-OQAM 信号,其中 FBMC 原始信号和预留载波编号运用随机函数生成,QAM 调制运用“qammod”函数实现。其次分别运用各种降低 PAPR 的方法对信号进行处理,得到最终信号。然后计算分布在  $[(L_h - T/2)/2, MT + (L_h - T/2)/2]$  区间的各个周期内信号的 PAPR,运用 CCDF 函数统计 PAPR 数据,表示如下:

$$CCDF[PAPR > PAPR_0] = \frac{1}{SM} \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M g_{m,s} \quad (24)$$

其中,  $g_{m,s}$  为:

$$g_{m,s} = \begin{cases} 1, & \text{第 } s \text{ 次仿真中第 } m \text{ 个周期内信号} \\ & \text{的 } PAPR > PAPR_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

在本文仿真中  $PAPR_0 = 0.25:12$ 。最后根据 CCDF 统计数据绘制 CCDF 曲线,得到仿真结果。将最终信号通过 AWGN 信道并解调得到接收端信号,并将其与输入端信号进行对比,通过信噪比计算函数得到信号的 BER 性能曲线。

本实验主要对 FBMC-OQAM 信号进行 3 个方面的仿真:1)在  $\mu$  和  $Iterations$  取不同值时运用 TR 和  $\mu$ -律压扩法;2)在  $\mu$  和  $Iterations$  取相同值时运用 TR 和  $\mu$ -律压扩法,并与 OFDM 信号进行对比;3)运用 TR- $\mu$ Law 方法,并将其与其他方法进行对比。

#### 4.2 仿真结果分析

图 4 为分别取不同  $\mu$  和  $Iterations$  时对 FBMC-OQAM 信号运用 TR 和  $\mu$ -law 方法的仿真曲线。从图中可以看出,当  $CCDF=0.001$  这一数量级上时,两种方法的 PAPR 性能相比原始信号均有较大提升, $\mu=3$  和  $Iterations=8$  时分别提升了 4.9 dB 和 2.6 dB。

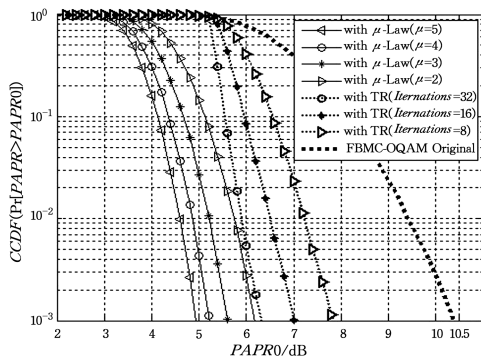


图 4 对 FBMC-OQAM 信号运用 TR 和  $\mu$ -law 方法的 PAPR 性能对比

Fig. 4 PAPR performance comparison between TR method and  $\mu$ -law method for FBMC-OQAM

基于图 4 的仿真结果,本文选取  $Iterations=8$  和  $\mu=3$ ,对 FBMC-OQAM 与 OFDM 运用 TR 和  $\mu$ -law 压扩法进行对比仿真。图 5 给出了 FBMC-OQAM 与 OFDM 信号运用 TR 和  $\mu$ -law 压扩法后在  $CCDF=0.001$  这一数量级上的 PAPR 值。其中,OFDM 分别为 10.2 dB,6.3 dB,4.6 dB;FBMC-OQAM 分别为 10.4 dB,7.8 dB,5.4 dB。分析数据可知,FBMC-OQAM 信号运用 TR 和  $\mu$ -law 压扩法后的 PAPR 性能相比原始信号分别提升了 2.6 dB 和 5.0 dB,而 OFDM 信号运用这两种方法分别提升了 3.9 dB 和 5.6 dB。

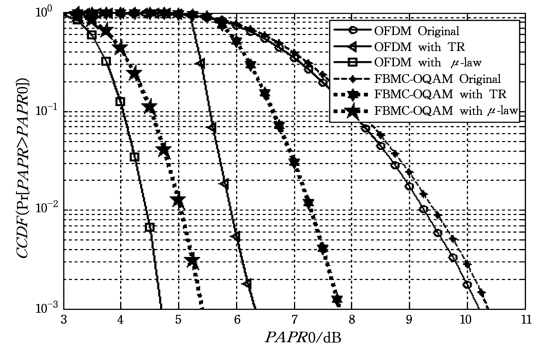


图 5 对 FBMC-OQAM 与 OFDM 运用 TR 和  $\mu$ -law 方法的 PAPR 对比

Fig. 5 PAPR performance comparison between FBMC-QAM and OFDM when using TR method and  $\mu$ -law method

因此,FBMC-OQAM 系统运用传统 TR 方法和  $\mu$ -law 压扩法可以降低系统的 PAPR 性能,但是降低效果并没有 OFDM 系统好。

下面,本文对 FBMC-OQAM 系统运用 TR- $\mu$ Law 方法进行仿真,并将其 PAPR 性能与 PTS-TR, DTR, SLM-TR 方法进行对比,结果如图 6 所示。

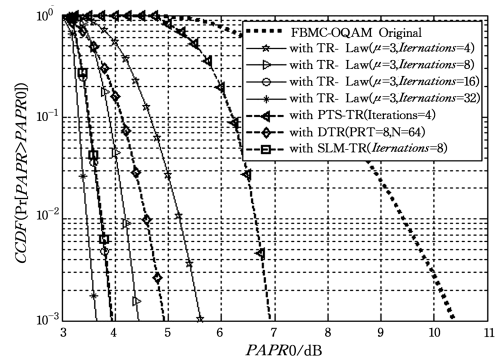


图 6 对 FBMC-OQAM 运用 TR- $\mu$ Law, PTS-TR, DTR, SLM-TR 方法的 PAPR 性能对比

Fig. 6 PAPR performance comparison between TR- $\mu$ Law, PTS-TR, DTR and SLM-TR methods for FBMC-OQAM

从图 6 可以看出,在  $CCDF=0.001$  这一数量级上,原始 FBMC-OQAM 信号的 PAPR 值为 10.4 dB,运用 TR- $\mu$ Law 方法后, $\mu=3$ ,  $Iterations=4, 8, 16, 32$  时的 PAPR 值分别为 5.6 dB, 4.4 dB, 3.9 dB 和 3.6 dB。对比图 5 可知,在  $Iterations=8$  且  $\mu=3$  时,相比于 TR 和  $\mu$ -law 压扩法,TR- $\mu$ Law 方法的 PAPR 分别降低了 3.4 dB 和 1.0 dB。这说明 TR- $\mu$ Law 方法

相比于传统 TR 和  $\mu$ -law 方法均有较大提升,且随着迭代次数增加,其性能得到了进一步提升。

从图 6 还可以看出,在  $\mu=3$ ,  $Iterations=4$  时,FBMC-OQAM 信号运用 TR- $\mu$ Law 方法的 PAPR 性能比 PTS-TR 提升了 1.3 dB;在  $Iterations=8,16$  或 32 时,PAPR 性能都优于 DTR 方法。SLM-TR 方法在  $Iterations=8$  时与 TR- $\mu$ Law 方法在  $Iterations=16$  时的 PAPR 性能相近。

因此可以得出结论:TR 方法与  $\mu$ -law 压扩法结合后,新的联合方法能够有效降低 FBMC-OQAM 系统的 PAPR,且相比于传统 TR 和  $\mu$ -law 压扩法均有所提升。当迭代次数较大时,相比于其他改进的 TR 方法(DTR)和 TR 联合方法(PTS-TR, SLM-TR),TR- $\mu$ Law 联合方法降低 PAPR 的性能更优。

最后,本文对 FBMC-OQAM 系统运用 TR, $\mu$ -law 和 TR- $\mu$ Law 方法前后的 BER 性能进行对比,仿真结果如图 7 所示。由图可知,FBMC-OQAM 系统在运用 TR 方法后,BER 性能几乎与原始系统相同,运用  $\mu$ -law 方法后有一定降低,运用 TR- $\mu$ Law 方法后 BER 性能虽然相比原始系统和 TR 方法有所降低,但是相比  $\mu$ -law 方法,其仍有一定提升。

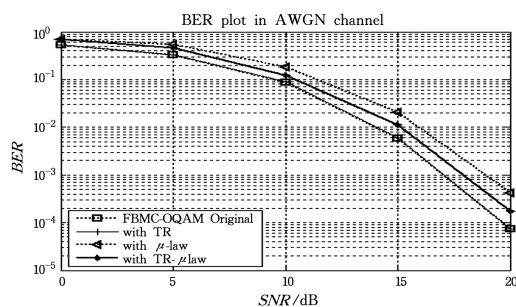


图 7 对 FBMC-OQAM 运用 TR, $\mu$ -law 和 TR- $\mu$ Law 方法的 BER 性能对比

Fig. 7 BER performance comparison between TR, $\mu$ -law and TR- $\mu$ Law methods for FBMC-OQAM

因此,可以得出结论:TR 方法具有无失真特性,而  $\mu$ -law 压扩法给 FBMC-OQAM 系统带来了一定失真,但 TR- $\mu$ Law 方法将 TR 与  $\mu$ -law 方法相结合,其 BER 性能在  $\mu$ -law 压扩法的基础上有一定提升。

综上所述仿真可得出:本文提出的 TR- $\mu$ Law 方法结合了 TR 方法和  $\mu$ -law 压扩法的优点,弥补了各自的缺点。即在 TR- $\mu$ Law 方法中,TR 方法的无失真性弥补了  $\mu$ -law 压扩法的失真性, $\mu$ -law 压扩法的有效抑制 PAPR 的特性弥补了 TR 方法不能很好降低 PAPR 性能的不足,且与其他改进的 TR 方法和 TR 联合方法性能相近。因此,TR- $\mu$ Law 方法既能有效降低 FBMC-OQAM 系统的 PAPR,同时也能改善系统的 BER 性能,减小信号失真。

**结束语** 本文提出了一种 TR 和  $\mu$ -law 压扩法联合的 TR- $\mu$ Law 方法。通过对仿真结果的对比分析可以得出,TR- $\mu$ Law 方法在降低 FBMC-OQAM 系统 PAPR 性能上均优于 TR 方法和  $\mu$ -law 压扩法,且 BER 性能相比  $\mu$ -law 方法有所提升。与其他改进的 TR 方法和 TR 联合方法相比,TR-

$\mu$ Law 方法降低 PAPR 的性能优于 DTR 方法和 PTS-TR 方法,与 SLM-TR 方法相近。因此,TR- $\mu$ Law 联合方法实现了 TR 方法和  $\mu$ -law 压扩法的利弊互补,在降低 PAPR 的同时兼顾了系统的 BER 性能。

FBMC-OQAM 系统的结构框图还有其他表示形式,本文给出的其系统发送端的结构框图只是其中常用的一种方式,今后可以研究 FBMC-OQAM 系统的不同结构,从而研究出有效抑制信号的 PAPR 的算法。

## 参考文献

- [1] MICHAÏLOW N, GASPARI I, KRONE S, et al. Generalized frequency division multiplexing: Analysis of an alternative multi-carrier technique for next generation cellular systems[C]// Proceedings of International Symposium. Paris: Wireless Communication Systems, 2012: 171-175.
- [2] YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. Development trend and some key technologies of 5G mobile communication[J]. Information Science, 2014, 44(5): 551-563. (in Chinese)  
尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.
- [3] WUNDER G, KASPARICK M, TEN BRINK S T, et al. 5G NOW: Challenging the LTE Design Paradigms of Orthogonality and Synchronicity[J]. Open Access Journal, 2012, 14(6): 1-5.
- [4] IHALAINEN T, STITZ T H, RINNE M, et al. Channel Equalization in Filter Bank Based Multicarrier Modulation for Wireless Communications[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007, 2007(1): 1-18.
- [5] ZHANG H C, LEI Y K. Blind Estimation Method for OFDM Parameter Based on Symbol Kurtosis[J]. Computer Science, 2017, 44(4): 207-212. (in Chinese)  
张海川, 雷迎科. 基于符号峰态的 OFDM 信号参数盲估计方法[J]. 计算机科学, 2017, 44(4): 207-212.
- [6] MISHMY T S, SHEEBA V S. Peak to Average Power Ratio Reduction in Filter Bank Based Multicarrier System[C]// Third International Conference on Advances. Beijing: Computing & Communications, 2013: 377-381.
- [7] QU D, LU S, JIANG T. Multi-Block Joint Optimization for the Peak-to-Average Power Ratio Reduction of FBMC-OQAM Signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(7): 1605-1613.
- [8] LU S, QU D, HE Y. Sliding Window Tone Reservation Technique for the Peak-to-Average Power Ratio Reduction of FBMC-OQAM Signals[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(4): 268-271.
- [9] WANG Q, HUANG J J, WU L. A pre-coding algorithm for reducing the PAPR of FBMC-OQAM[J]. Microcomputer & Its Applications, 2017, 36(3): 67-70. (in Chinese)  
王琼, 黄静静, 吴垒. 一种降低 FBMC-OQAM 系统 PAPR 的预编码算法[J]. 微型机与应用, 2017, 36(3): 67-70.

- [10] WU L, XIE X Z, ZHANG M, et al. A Low Complexity PTS Algorithm with Dual Layered Phase Sequencing to Reduce PAPR of the FBMC-OQAM Signal[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(17): 62-70. (in Chinese)  
吴垒, 谢显中, 张苗, 等. 一种低复杂度降低 FBMC-OQAM 峰均值的 PTS 双层搜索算法[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(17): 62-70.
- [11] KRISHNA C B S S, SHAIK H, ROVIRAS D, et al. Reduction of PAPR for FBMC-OQAM systems using dispersive SLM technique[C]// *Proceedings of International Symposium, Barcelona: Wireless Communications Systems*, 2014: 568-572.
- [12] LIANG Y, QIN M Y, ZHANG H W, et al. Survey of pilot-aided channel estimation in FBMC/OQAM[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2015, 27(4): 477-483. (in Chinese)  
梁燕, 秦梦瑶, 张贺伟, 等. FBMC/OQAM 系统导频辅助信道估计方法概述[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2015, 27(4): 477-483.
- [13] ZHAO J C, HUANG F Y, KONG F S. Wireless Broadband Multicarrier Transmission Techniques Oriented to 5G[J]. *Mobile Communications*, 2015, 39(9): 14-18. (in Chinese)  
赵锦程, 黄斐一, 孔繁盛. 面向 5G 的无线宽带多载波传输技术[J]. *移动通信*, 2015, 39(9): 14-18.
- [14] ZHOU Y, PALANKI R, MONTJO J, et al. Peak-to-average ratio reduction scheme for multi-carrier systems with block-based channel estimation[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(5): 275-276.
- [15] VARGHESE N, CHUNKATH J, SHEEBA V S. Peak-to-Average Power Ratio Reduction in FBMC-OQAM System [C]// *Fourth International Conference on Advances. Tunisia: Computing & Communications*, 2014: 286-290.
- [16] LU S X. Non-signal Distortion Methods for the PAPR Reduction of the FBMC-OQAM Signals[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)  
芦世先. 降低 FBMC-OQAM 信号峰均功率比的无失真方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [17] BULUSU S S K C, SHAIK H, ROVIRAS D. Reduction of PAPR of FBMC-OQAM systems by dispersive tone reservation technique[C]// *International Symposium on Wireless Communication Systems*. 2015: 561-565.
- (上接第 71 页)
- [5] GUO X H, LI R Z, ZHANG Q, et al. Application research on distributed Zabbix network monitoring system[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(Z2): 95-98. (in Chinese)  
郭晓慧, 李润知, 张茜, 等. 基于 Zabbix 的分布式服务器监控应用研究[J]. *通信学报*, 2013, 34(Z2): 95-98.
- [6] YU G F, WANG Y C, ZHUANG L Y, et al. Response Delay Predictive and Load Scheduling Control for the Cluster Server [J]. *Computer Systems Applications*, 2007, 30(7): 26-29. (in Chinese)  
于国防, 王耀才, 庄立运, 等. 集群服务器响应延时预测及其负载调度控制[J]. *计算机系统应用*, 2007, 30(7): 26-29.
- [7] XU G, YU W, CHEN Z. A Cloud Computing Based System for Cyber Security Management[J]. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed System*, 2016, 30(1): 29-45.
- [8] ARAVINTH S S, BEGAM A H, SHANMUGAPRIYAA S, et al. An Efficient Hadoop Frameworks SQOOP and Ambari for Big Data Processing [J]. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2015, 1(10): 252-255.
- [9] ZAHARIA M, BORTHAKUR D, SARMA J S, et al. Job Scheduling for Multi-User MapReduce Cluster: Technical Report No. UCB/EECS-2009-55[R]. 2009.
- [10] WANG X T, SHEN D R, NIE T Z, et al. Batch-Job Scheduling in Shared MapReduce Environment[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(Suppl.): 332-341. (in Chinese)  
王习特, 申德荣, 聂铁铮, 等. 共享的 MapReduce 环境下批量作业的调度算法研究[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(Suppl.): 332-341.
- [11] LI Q M, ZHANG S X, LU L, et al. A Job Scheduling Algorithm and Hybrid Scheduling Method on Hadoop Platform[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(Suppl.): 361-368. (in Chinese)  
李千目, 张晟骁, 陆路, 等. 一种 Hadoop 平台下的调度算法及混合调度策略[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(Suppl.): 361-368.
- [12] LI B F, ZHU Y Z, WEI R H. Implementation of Load Balancing Technology on Heterogeneous Beowulf System[J]. *Computer Technology And Development*, 2008, 18(7): 61-65. (in Chinese)  
李丙锋, 祝永志, 魏榕晖. 异构 Beowulf 系统负载均衡技术的研究与实现[J]. *计算机技术与发展*, 2008, 18(7): 61-65.
- [13] TANG S, LEE B. DynamincMR: A Dynamic Slot Allocation Optimization Framework for MapReduce Clusters[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2014, 2(3): 333-346.
- [14] TIAN G Z, XIAO C B, XU Z S, et al. Hybrid Scheduling Strategy for Multiple DAGS Workflow in Heterogeneous System[J]. *Journal of Software*, 2012, 23(10): 2720-2734. (in Chinese)  
田国忠, 肖创柏, 徐竹胜, 等. 异构分布式环境下多 DAG 工作流的混合调度策略[J]. *软件学报*, 2012, 23(10): 2720-2734.
- [15] ZAHARIA M, KONWINSKI A, JOSEPH A D, et al. Improving mapreduce performance in heterogeneous environments[C]// *Usenix Conference on Operating Systems Design & Implementation*. 2008: 29-42.
- [16] XU C, LIU H, TAN L. New Mechanism of Monitoring on Hadoop Cloud Platform[J]. *Computer Science*, 2013, 40(1): 112-117. (in Chinese)  
许丞, 刘洪, 谭良. Hadoop 云平台的一种新的任务调度和监控机制[J]. *计算机科学*, 2013, 40(1): 112-117.