

OFDM 系统中基于限幅和压缩感知的 非线性失真补偿算法

杨 霖^{1,2}, 何向东¹, 丁长文¹

(1. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川成都 611731;

2. 中国电子科技集团公司第五十四所通信网信息传输与分发技术重点实验室, 河北石家庄 050081)

摘 要: 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)信号具有较高的峰均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR), 不仅影响功率放大器(High Power Amplifier, HPA)的工作效率, 而且 HPA 使得 OFDM 信号产生严重的非线性失真, 导致系统的误比特率(Bite Error Rate, BER)增大. 本文基于限幅和压缩感知(Compressive Sensing, CS)提出了改进的补偿算法, 发送端采用限幅降低信号的 PAPR, 接收端首先采用改进的逆模型方式减小 HPA 引入的非线性失真, 再采用 CS 抵消由限幅引入的信号失真. 仿真表明, 所提方法不仅明显降低了 OFDM 信号的 PAPR, 而且有效提高了系统的 BER 性能.

关键词: 正交频分复用; 峰均比; 限幅; 非线性失真补偿; 压缩感知

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)09-2051-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.004

Compensation Method for Nonlinear Distortion Based on Clipping and Compressive Sensing in OFDM System

YANG Lin^{1,2}, HE Xiang-dong¹, DING Chang-wen¹

(1. Key Laboratory of National Communication Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. Science and Technology on Information Transmission and Dissemination in Communication Networks Laboratory, The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: The high peak to average power rate (PAPR) of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal reduced the efficiency of the high power amplifier (HPA), and led the OFDM signal suffered from nonlinear distortion caused by HPA and the bite error rate (BER) of the system became worse. This paper proposes a nonlinear distortion compensation method based on clipping and compressive sensing. The transmitter uses a clipping method to reduce the PAPR of OFDM signal; the receiver utilizes a modified method based on the inverse model of HPA to reduce the nonlinear distortion caused by the HPA, and applies compressive sensing (CS) on counteracting the distortion caused by clipping. Simulations show that the proposed method can not only reduce the PAPR of the OFDM signal significantly, but also improve the BER performance of the system promisingly.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); peak to average power ratio (PAPR); clipping; nonlinear distortion compensation; compressive sensing (CS)

1 引言

正交频率复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术以其高效的频谱利用率和抗衰落能力被广泛应用于无线通信系统中. 然而, OFDM 信号

具有较高的峰均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)的缺点, 导致经过功率放大器(High Power Amplifier, HPA)会产生带内噪声, 同时会降低 HPA 的工作效率, 带内噪声会使得信号产生严重的非线性失真, 恶化系统的误比特率(Bite Error Rate, BER)性能. 为了提

高 HPA 的工作效率,降低信号的非线性失真,发送端的 PAPR 抑制技术和接收端的非线性失真补偿技术均是研究的热点.

发送端的 PAPR 抑制技术^[1,2]大致可以分为三种:限幅类、编码类和概率类^[3,4].其中,限幅^[5,6]技术是最简单直接的,然而,限幅方式本身会额外地引入信号失真^[7],恶化系统的 BER 性能,为了抵消限幅噪声干扰,接收端的压缩感知(Compressive Sensing, CS)算法被提出.文献[8,9]中提出了预留空子载波的 CS 算法,该算法需要预先保留空子载波用来作为观测向量,降低了数据传输效率.文献[10]提出了改进的 CS 算法,从数据子载波中选出受噪声影响较小的部分作为观测向量,利用 CS 算法对限幅噪声信号进行重建,该算法不需要预留空子载波,不会降低数据传输效率.但是该文仅仅考虑对限幅方法的非线性失真进行有效补偿,并没有考虑 HPA 带来的失真影响.另一方面,接收端的补偿技术能有效地降低 HPA 引入的非线性失真,文献[11]中提出了基于 HPA 逆模型的非线性失真补偿算法,虽然该方法能有效地改善了系统的 BER 性能,但是该算法需要通过多次仿真来选择合适的补偿门限,给硬件实现带来不便;且发送端并未降低 OFDM 信号的 PAPR,HPA 所需的动态范围较大,工作效率不高.为了克服上述问题,本文结合限幅、HPA 逆模型补偿和 CS 算法,提出了改进的失真补偿算法.在发送端,采用限幅降低 OFDM 信号的 PAPR,提高 HPA 的工作效率;在接收端,根据限幅门限唯一确定 HPA 逆模型补偿器的门限,不需要通过多次仿真来选择门限值,在补偿 HPA 引入的非线性失真后,通过 CS 抵消限幅引入的信号失真.

2 OFDM 系统简介

2.1 功率放大器的影响

OFDM 信号具有高峰均比的缺点,发送端的功率放大器会使 OFDM 信号产生严重的非线性失真,影响系统的 BER 性能.固态功率放大器^[12](Solid State Power Amplifier, SSPA)是常用的放大器之一,Rapp 模型常被用来模拟 SSPA 放大器的非线性特征,在该模型中,输入信号 x ,输出信号 y 的采样点表示为:

$$y(n) = A(|x(n)|)e^{j[P(x(n)) + F(|x(n)|)]} \quad (1)$$

其中, $|\cdot|$ 表示求幅度, $P(\cdot)$ 表示求相位, $A(\cdot)$ 表示幅度响应, $F(\cdot)$ 表示相位响应. HPA 的非线性特征为:

$$\begin{cases} A(|x(n)|) = |x(n)| \left(1 + (|x(n)|/A_0)^{2p}\right)^{-\frac{1}{2p}} \\ F(|x(n)|) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

p 是平滑因子, A_0 是由输入饱和 A_{sat} 确定的最大输出, A_{sat} 由输入回馈(Input Back-Off, IBO)决定,即:

$$\text{IBO} = 10 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{sat}}^2}{P_{\text{in}}} \right) \quad (3)$$

其中, p_{in} 表示放大器输入端信号的平均功率.

2.2 限幅和压缩感知技术

原始时域 OFDM 信号经过限幅后的时域信号 x_1 采样点可表示为:

$$x_1(n) = \begin{cases} x(n), & |x(n)| \leq A \\ Ae^{j|P(x(n))|}, & |x(n)| > A \end{cases} \quad (4)$$

其中, A 表示由限幅率 γ 决定的限幅门限,即:

$$A = \gamma * E\{|x(n)|\} \quad (5)$$

由式(4)可知,限幅后的信号 x_1 可以表示为原始 OFDM 信号 x 和限幅失真信号 c 之和,即:

$$x_1(n) = x(n) + c(n), (0 \leq n \leq N-1) \quad (6)$$

若需利用 CS 技术重建限幅失真信号,失真信号必须满足稀疏性特点,由文献[10]可知,限幅率 γ 越低,限幅失真信号 c 中非零元素个数就越多,稀疏水平就越低,用稀疏度 K 来衡量稀疏水平,与 γ 的关系为:

$$K = E\{|c|_0\} = N * e^{-\gamma^2} \quad (7)$$

接收端引入 CS 技术重建限幅失真信号,可以有效降低限幅失真对 BER 性能的影响.目前,已有很多 CS 算法^[13]被提出,匹配追踪算法(Matching Pursuit, MP)较好地平衡了压缩感知算法效率和重构质量,正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)算法^[14]作为 MP 算法中最典型的一种.

3 非线性失真补偿算法

3.1 原始 HPA 逆模型补偿算法

由于 OFDM 信号经过 HPA 会产生严重的非线性失真,导致系统的 BER 性能下降,为了降低 OFDM 信号的非线性失真,文献[11]中的 HPA 逆模型的补偿技术有效提高了系统的 BER 性能.补偿器的特征表达式如下:

$$f(r(n)) = \min[S, |r(n)|] \left[1 - \left(\frac{\min[S, |r(n)|]}{A_0} \right)^{2p} \right]^{-\frac{1}{2p}} * e^{j\{P(r(n))\}} \quad (8)$$

其中, A_0 表示放大器的饱和输出点, S 表示由边缘值 margin 决定的最佳补偿门限,需通过多次仿真获得.

$$\text{margin} = 10 \log \left(\frac{A_0}{S} \right) \quad (9)$$

3.2 改进算法

原始的 HPA 逆模型补偿算法存在如下缺点:一是该算法只关注接收端,并未降低发送端 OFDM 信号的 PAPR,较高的 PAPR 信号需要 HPA 具有较大的动态范围,降低了 HPA 的工作效率;二是该算法中,对于不同的仿真参数,例如子载波数、放大器的平滑因子,需要多次仿真寻找最合适的补偿门限值 S ,不利于硬件的实现.为了克服以上缺点,本文提出了一种基于

限幅和 CS 的非线性失真补偿算法,原理框图如图 1 所示:

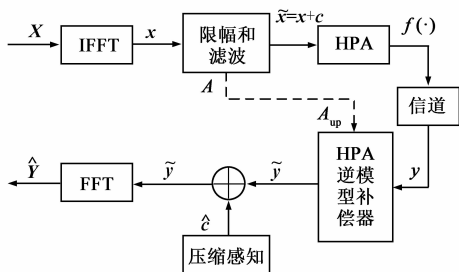


图1 改进的非线性补偿技术原理框图

3.2.1 发送端处理

由于 PAPR 较高的 OFDM 信号一方面要求 HPA 具有较大的动态范围,导致 HPA 的工作效率降低,另一方面 HPA 也会使信号产生严重的非线性失真,导致系统的 BER 性能下降. 为了提高 HPA 的工作效率,降低 OFDM 信号的非线性失真,本文提出的算法在发送端对原始信号进行限幅处理,降低 OFDM 信号的 PAPR,若原始频域信号为 X ,限幅率为 γ ,具体步骤如下:

步骤 1 原始频域 X 经过 IFFT 变换后获得原始 OFDM 信号 x ,即:

$$x = \mathbf{W}X \quad (10)$$

其中, \mathbf{W} 表示 IFFT 变换矩阵.

步骤 2 根据式(6)可知,限幅后的时域信号 x_1 可表示为:

$$x_1 = x + c \quad (11)$$

步骤 3 限幅后的信号 x_1 经过 HPA 后,HPA 输出信号为 x_2 可表示为:

$$x_2 = f_{\text{HPA}}(x_1) \quad (12)$$

其中, $f_{\text{HPA}}(\cdot)$ 表示 HPA 的非线性函数.

3.2.2 接收端处理

HPA 输出信号 x_2 经过时域信道模型后,接收信号为 y ,即:

$$y = \mathbf{Q}x_2 + z \quad (13)$$

其中, z 表示高斯白噪声,时域信道的冲击响应矩阵 $\mathbf{Q} = \mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{W}^H$, $\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{H})$, \mathbf{H} 表示频域信道响应. 若已知冲击响应矩阵 \mathbf{Q} ,去除信道影响后的信号 y_{re} 为:

$$y_{\text{re}} = \mathbf{Q}^{-1}y \quad (14)$$

由于限幅后的信号经过 HPA 仍会产生非线性失真,因此首先采用 HPA 逆模型补偿器对信号进行补偿,减少 HPA 的非线性影响,进而使用 CS 补偿限幅失真. 本文采用改进的 HPA 逆模型,利用发送端的限幅门限获取唯一对应的 HPA 逆模型补偿器的上门限值,不需要通过仿真来选择,有利于硬件的实现,且为了降低补偿器的复杂度,增设了上门限值,其改进方法如下表所示:

表 1 文献[11]中原始补偿器和所提算法补偿器门限设计方法对比

名称	原始 HPA 逆模型补偿算法	改进 HPA 逆模型补偿算法
补偿器上门限	有(由多次仿真确定)	有(由限幅门限唯一确定)
补偿器下门限	无	有

改进后的 HPA 逆模型补偿器的特征为:

$$f_{\text{comp}}(r(n)) = \begin{cases} r(n), r(n) \leq A_{\text{down}} \\ \min[A_{\text{up}}, |r(n)|] \left[1 - \left(\frac{\min[A_{\text{up}}, |r(n)|]}{A_0} \right)^{2p} \right]^{\frac{-1}{2p}} * e^{j|P(r(n))|}, \\ r(n), r(n) > A_{\text{down}} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $A_{\text{down}} = E\{|r_n|\}$ 表示补偿器的下门限, A_{up} 表示补偿器的上门限值,由限幅门限 A 唯一确定,即:

$$A_{\text{up}} = A \left(1 + (A/A_0)^{2p} \right)^{-\frac{1}{2p}} \quad (16)$$

经过 HPA 逆模型补偿后的信号 y_1 为:

$$y_1 = f_{\text{comp}}(y_{\text{re}}) \quad (17)$$

在接收端采用补偿算法后,HPA 的非线性影响较小. 因此采用 CS 算法估计出限幅噪声信号 c_1 ,即可恢复出发送端的原始时域信号 y_2 ,即:

$$y_2 = y_1 + c_1 \quad (18)$$

由 2.2 可知,CS 技术的关键是寻找可靠的观测向量 \mathbf{Y}_s 和测量矩阵 \mathbf{F} ,为了不影数据效率,本文引用文献[10]中方法,具体步骤如下:

步骤 1 根据 Bussgang 理论,限幅后的频域信号 X_1 可表示为:

$$X_1(k) = \alpha X(k) + D(k) \quad (19)$$

其中, $X(k)$ 表示原始信号,且 $D(k)$ 表示与 $X(k)$ 不相关的限幅噪声; α 与限幅率 γ 有关. 且:

$$\alpha = 1 - e^{-\gamma^2} + \frac{\sqrt{\pi}\gamma}{2} \text{erfc}(\gamma) \quad (20)$$

$$\delta_D^2 = (1 - e^{-\gamma^2} - \alpha^2) E\{|X(k)|^2\} \quad (21)$$

步骤 2 利用最大似然准则估计原始频域信号 X_c ,即:

$$X_c(k) = \underset{s \in \beta}{\text{argmin}} |\alpha^{-1}M(k) - s| \quad (22)$$

其中, β 表示信号星座点集合, $\mathbf{M} = \mathbf{W}^H y_1$, \mathbf{W}^H 表示 FFT 变换矩阵.

步骤 3 由于限幅失真信号为: $\mathbf{C} = (\alpha - 1)\mathbf{X} + \mathbf{D}$,则:

$$E\{|\mathbf{C}(k)|^2\} = (2 - 2\alpha - e^{-\gamma^2}) E\{|X(k)|^2\} \quad (23)$$

步骤 4 根据如下式子可确定选择矩阵 \mathbf{S} :

$$\theta_1 \approx \frac{|\mathbf{H}^{-1}|^2 \delta^2}{|\mathbf{H}^{-1}|^2 \delta^2 + \delta_D^2} (\mathbf{M} - \alpha \mathbf{X}_c) \quad (24)$$

$$T = \{k: |\theta_1(k)|^2 < E\{|\mathbf{C}(k)|^2\}\} \quad (25)$$

其中, δ^2 表示高斯噪声信号的方差. 如果 T 的长度为 L , 那么从单位矩阵 I_N 中选择对应的 L 行组成选择矩阵 S .

步骤 5 由选择矩阵 S 可获得观测矩阵 Y_s 和测量矩阵 Φ :

$$Y_s = SW^H Y_1 - SX_s \quad (26)$$

$$F = SW^H \quad (27)$$

步骤 6 根据观测矩阵和测量矩阵, 运用 OMP 算法恢复原始信号, 如算法 1:

算法 1 OMP 算法

- 1 输入: (1) HPA 逆模型补偿器输出信号 y_1 ; (2) 观测矩阵 Y_s ; (3) 测量矩阵 F ; (4) 稀疏度: $K = N * e^{-\gamma^2}$.
- 2 输出: 原始频域信号的估计值 \hat{Y} .
- 3 处理过程
 - (1) 初始化: 残差向量 $r_0 = Y_s$, 索引 $\Delta_0 = []$, 迭代次数 $t = 1$;
 - (2) $\lambda_t = \arg \max_{1 \leq j \leq N} |\langle r_{t-1}, \psi_j \rangle|$, 即从测量矩阵 F 的所有列中寻找最匹配的原子索引;
 - (3) $\Delta_t = \Delta_{t-1} \cup \{\lambda_t\}$. 更新索引集;
 - (4) $r_t = Y_s - F_{\Delta_t} F_{\Delta_t}^+ * Y_s$, 其中 $F_{\Delta_t}^+$ 表示 F_{Δ_t} 的伪逆, 即 $F_{\Delta_t}^+ = (F_{\Delta_t}^H F_{\Delta_t})^{-1} F_{\Delta_t}^H$, $F_{\Delta_t}^H$ 表示 F_{Δ_t} 的共轭转置. 更新残差;
 - (5) 判断是否满足 $t < k$ 的条件, 若不满足, $t = t + 1$, 返回第二步; 否则, 输出 $c_1 = F_{\Delta_t}^+ * Y_s$;
 - (6) 估计限幅之前的时域信号: $y_2 = y_1 + c_1$;
 - (7) FFT 变换: $Y = W^H y_2$.

4 仿真结果与分析

一方面, 限幅率影响 PAPR 抑制性能; 另一方面, 由式(10)可知限幅率决定限幅噪声信号的稀疏度和补偿器的上门限值. 为了验证算法的有效性, 分析了在不同限幅率 γ 时算法的 PAPR 和 BER 性能, 参数如下

表 2 仿真参数表

名称	取值
调制方式	16-QAM
子载波数	512
IBO	3
p	3.286

由式(10)可知, 限幅信号的稀疏性水平 K 与限幅率 γ 相关, 为了保证限幅噪声信号的稀疏性最低要求, 限幅率应满足 $\gamma \geq 1.3$, HPA 的饱和点对应值为 $\gamma_{\text{HPA}} = 10^{(\text{IBO}/10)} = 1.9$. 考虑限幅率 γ 在 HPA 饱和点内、外两种情况, 本文选择限幅率 γ 分别为 1.5、1.7 和 2 分析了算法的 PAPR 抑制性能和 BER 性能.

4.1 PAPR 性能分析

由图 2 可知, 在三种限幅率情况下, OFDM 信号的

PAPR 相对于原始信号均有明显降低. 在 CCDF = 1% 时, 限幅率为 2、1.7 和 1.5 的限幅信号所对应的 PAPR₀ 分别为 5.1dB、4.1dB 和 3.3dB, 相对于原始信号分别降低了 5.1dB、6.1dB 和 6.9dB. 从仿真结果中可以发现, 随着限幅率的减小, PAPR 抑制能力越强, 所需 HPA 的动态范围也越小, HPA 的工作效率越高.

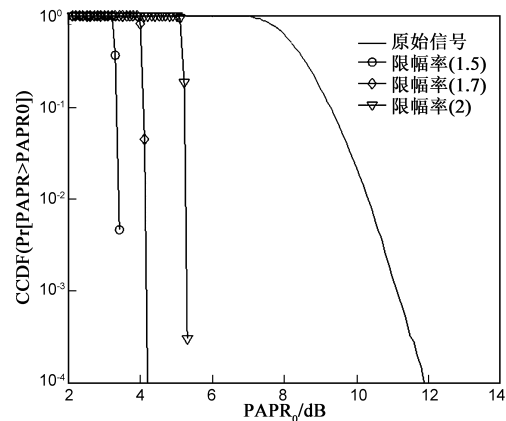


图 2 不同限幅率下 OFDM 信号的 PAPR 性能分析

4.2 BER 性能分析

在本文所提算法中, 发送端采用的限幅率直接影响限幅失真信号的稀疏度, 为了验证所提算法的有效性, 在不同的限幅率情况下 (即所需重建的限幅失真信号具有不同的稀疏度), 利用瑞利信道模型分析了所提算法的 BER 性能, 进而为所提算法选择合适的限幅门限.

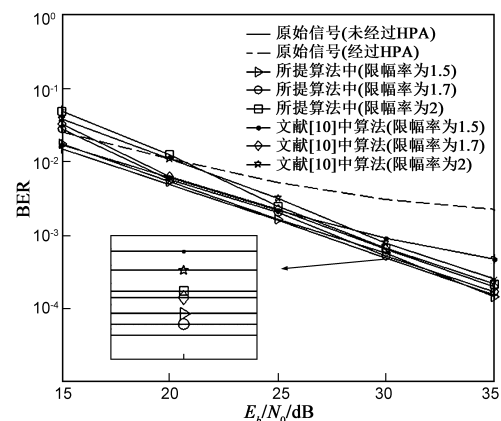


图 3 瑞利信道中不同限幅率下算法的 BER 性能

图 3 为不同限幅率下所提算法与文献 [10] 中算法的 BER 性能, 如图所示, 在瑞利信道中, 当限幅率较高时, 在低信噪比下, 本文提出的算法的 BER 性能稍差于文献 [10] 中算法, 这是由于限幅率较高时所需感知的限幅噪声信号较小, 低信噪比下噪声影响相对较大, 且对应选取的补偿上门限未能达到最佳值, 但随着信噪比大于 20dB 后, 由于噪声影响减小, 感知准确度提高,

本文所提算法的 BER 性能逐渐优于文献[10]中算法,当信噪比为 30dB 时,当发送端限幅门限分别为 2, 1.7 和 1.5 时,文献[10]中原始算法的 BER 分别为 7.69×10^{-4} , 6.30×10^{-4} 和 7.69×10^{-4} ; 而本文所提算法的 BER 分别为 6.59×10^{-4} , 5.17×10^{-4} 和 5.59×10^{-4} . 由此可知,在存在 HPA 影响的情况下,使用文献[10]中算法并不能获得较优的 BER 性能,相对于文献[10]中算法,本文所提算法在不同限幅率(2, 1.7 和 1.5)时,BER 分别降低了 1.10×10^{-4} , 1.13×10^{-4} 和 2.10×10^{-4} . 此外,可以看出,不同的限幅率下所提算法的 BER 性能具有明显差异,当限幅率为 1.7 时,所提算法的 BER 性能较优.

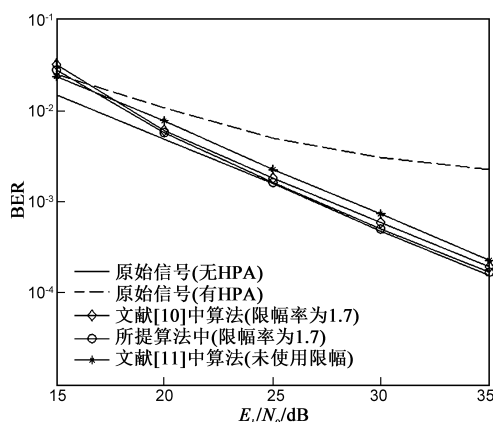


图4 瑞利信道中三种算法的BER性能

图4为文献[10],[11]中算法和所提算法的BER性能比较,如图4所示,当信噪比为 30dB 时,未使用限幅情况下采用 HPA 逆模型补偿方式^[11]的 BER 为 7.46×10^{-4} ,当限幅率为 1.7 时,文献[10]中算法对应的 BER 为 6.30×10^{-4} ,而本文所提算法对应的 BER 为 5.17×10^{-4} ,由此可知,与文献[11]中算法相比,所提算法的 BER 降低了 2.29×10^{-4} ,且由图 1 可知,所提算法降低了发送端信号的 PAPR,有效提高了 HPA 的工作效率.与文献[10]中的算法相比,所提算法的 BER 性能降低了 1.13×10^{-4} .

5 总结

原始 HPA 逆模型补偿算法需要通过多次仿真来选择合适的补偿门限,给实际应用带来不便,且该算法并未降低 OFDM 信号的 PAPR,发送端 HPA 所需的动态范围较高,工作效率较低.本文提出的算法在发送端通过限幅方式降低 OFDM 信号的 PAPR,接收端首先采用改进的补偿器补偿 HPA 引入的非线性失真后,再采用压缩感知算法抵消限幅噪声的影响.所提算法中补偿器的上门限是由发送端限幅门限唯一确定,不需要通过多次仿真获取,易于实现,且增设的下门限降低了补偿

器的计算复杂度.仿真结果表明,本文提出的算法一方面有效抑制了发送端信号的 PAPR,缩小了 HPA 所需的动态范围,提高了 HPA 的工作效率;另一方面良好地补偿了 OFDM 信号的非线性失真,提高了系统的 BER 性能.

参考文献

- [1] Rahmatallah B, Mohan S. Peak-to-average power ratio reduction in OFDM system; a survey and taxonomy[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(4): 1567 - 1592.
- [2] Kitaek B, Powers E J. Performance analysis of OFDM systems with selected mapping in the Presence of nonlinearity [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 2314 - 2322.
- [3] Zhang Shun, GeJian-hua, Gong Feng-kui. Partial transmit sequence using EVM optimization metric for BER reduction in OFDM systems [A]. IEEE Communications and Networking in China [C]. Guilin: Academic Press, 2013. 113 - 117.
- [4] Su Yan-yong, Xue Dong, Liu Mao-cai. Combined selective mapping and extended hamming codes for PAPR reduction in OFDM systems [A]. IEEE International Conference on Information Science and Technology [C]. Shenzhen: Academic Press, 2014. 582 - 585.
- [5] Zhu Xiao-dong, Pan Wen-sheng, Li Hong, et al. Simplified approach to optimized iterative clipping and filtering for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(5): 1891 - 1901.
- [6] Shiragapur B K, Wali U, Bidwai S. Novel technique to reduce PAPR in OFDM systems by clipping and filtering [A]. IEEE International Conference on Advances in Communication and Informatics [C]. Mysore: Academic Press, 2013. 1593 - 1597.
- [7] Sudha V, Balan S, Kumar D S. Performance analysis of PAPR reduction in OFDM system with distortion and distortion less methods [A]. IEEE International Conference on Computer Communication and Informatics [C]. Coimbatore: Academic Press, 2014. 1 - 4.
- [8] Ghassemi A, Ghasemnezad H, Gulliver T A. Compressive sensing based estimation of OFDM nonlinear distortion [A]. IEEE International Conference on Communications [C]. Sydney: Academic Press, 2014. 5055 - 5059.
- [9] Masoumian S H S, Shabani M, Tazehkand B M. A new PAPR reduction method based on clipping technique using compressive sensing [A]. IEEE International Symposium on Telecommunications [C]. Tehran: Academic Press, 2012. 6 - 8.
- [10] Kim K, Park H. Clipping noise cancelation for OFDM sys-

tems using reliable observation based on compressive Sensing[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61 (1): 111 - 118.

- [11] Zayani R, Guedria R, Bouallegue R. Compensation of the OFDM non-linear distortion by the inverse model method [A]. IEEE International Conference on Advanced Communication Technology [C]. Phoenix Park: Academic Press, 2006. 2009 - 2012.
- [12] Al-Dalakta E, Al-Dweik A, Hazmi C. PAPR reduction scheme using maximum cross correlation[J]. IEEE Communication Society, 2012, 16(12): 2032 - 2035.
- [13] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289 - 1306.
- [14] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655 - 4666.

作者简介



杨 霖(通信作者) 男, 1977 年生于四川宜宾, 现为电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室副教授, 主要研究方向为 OFDM 系统中多用户检测和功率控制, OFDM 系统的 PAPR 抑制技术等.

E-mail: eelyang@uestc.edu.cn



何向东 男, 1991 年生于重庆, 现为电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室硕士研究生. 主要研究方向为现代通信中的信号处理, OFDM 信号的峰均比抑制, 功率放大器的非线性抑制等.

E-mail: 984078297@qq.com