



非线性功放条件下的恒包络 OFDM 系统性能

王清波

(中国铁建电气化局集团有限公司, 北京 100043)

摘要: 正交频分复用技术具有较高的频谱效率和好的抗频率选择性衰落性能,被广泛应用于无线通信系统中。但是 OFDM 信号具有较高的峰均比,当系统采用非线性功放时,OFDM 系统需要较大的输入功率回退以避免信号失真。为了研究非线性功放条件下的系统性能,分析了恒包络 OFDM 系统的实现方式,并以误码率为指标,在加性高斯白噪声信道和多径衰落信道场景下对比了恒包络 OFDM 系统与采用传统迭代限幅滤波 PAPR 抑制技术的 OFDM 系统的性能。

关键词: 非线性功放;恒包络 OFDM;峰均比

中图分类号: TP929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016213

Performance of constant envelope OFDM system with nonlinear power amplifier

WANG Qingbo

China Railway Construction Electrification Bureau Group Co.,Ltd., Beijing 100043, China

Abstract: Orthogonal frequency division multiplexing technology is widely used in wireless communication system due to its high spectral efficiency and good resistance ability to frequency selective fading. But it has high peak-to-average power ratio. Therefore, OFDM system needs large input power back-off to avoid signal distortion when using nonlinear power amplifier. In order to study the performance of the system under the condition of nonlinear power amplifier, the implementation of constant envelope OFDM was analyzed. Taking bit error rate as an index, the performance comparison between CE-OFDM system and OFDM system using traditional iterative limiting filter PAPR suppression technology were given under additive white Gaussian noise channel and multipath fading channel.

Key words: nonlinear power amplifier, constant envelope OFDM, PAPR

1 引言

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)是一种优秀的多载波传输技术,它在频域上将整个频段划分为若干个相互正交的子载波,并以子载波为基本单位进行信号的调制和传输,从而获得较高的频谱效率和良好的抗频率选择性衰落性能^[1]。OFDM 自提出以来逐渐

被广泛应用在多种无线通信系统中,如数字视频广播(digital video broadcasting,DVB)系统^[2]、无线局域网(wireless local area network,WLAN)^[3]、高清晰度电视(high definition television,HDTV)以及第四代移动通信技术 LTE(long time evolution)^[4]等。然而,由于 OFDM 信号是由多个子载波上传输的信号叠加得到的,因此可能具有较高的峰均比(peak-to-average power ratio,PAPR)。在实际系统中功率放

大器往往是非线性的,因此当 PAPR 较高的 OFDM 信号通过功率放大器时,需要较大的输入功率回退以避免非线性失真导致的信号畸变,防止系统性能的恶化。为此,研究人员提出了多种降低 OFDM 信号 PAPR 的技术,经典方法之一是迭代限幅滤波技术^[5],这些技术的代价是计算复杂度的提高或频谱效率的降低,但 PAPR 降低的程度仍是有限的。参考文献[6]提出了一种恒包络 OFDM (constant envelope OFDM, CE-OFDM) 技术,通过将 OFDM 信号调制到恒包络载波信号的相位中,从而获得 PAPR 为 0 dB 的信号。

为了更好地研究非线性功放条件下恒包络 OFDM 系统的性能,本文首先从理论上对 OFDM 系统的 PAPR 进行分析,并给出非线性功放的建模计算式,然后阐述了基于相位调制的 CE-OFDM 技术的相关理论,最后以误码率为指标,在加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 信道和多径衰落信道场景下对比了恒包络 OFDM 系统与基于迭代限幅滤波的 OFDM 系统的性能。

2 OFDM 系统 PAPR 分析

OFDM 信号可表示为:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k W_N^{nk} \quad (1)$$

其中, N 为子载波个数, X_k 为第 k 个子载波上的调制符号, $W_N = e^{j2\pi/N}$ 。由此可见,在 OFDM 系统中,一个 OFDM 符号是由多个独立的、承载调制符号的子载波叠加而成,当多个子载波具有相同的相位时会产生较高的峰值功率,从而导致较大的峰均比。峰均比可表示为:

$$PAPR = 10 \lg \frac{\max_n \{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}} \quad (2)$$

其中, $E\{\}$ 表示数学期望。由式(1)可以看出,当 N 足够大时, x_n 的虚部和实部服从复高斯分布,因此 x_n 的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 可表示为:

$$F(x) = P\{|x_n|^2 \leq x\} = \int_0^x \exp(-y) dy = 1 - \exp(-x) \quad (3)$$

通常采用互补累积分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF) 表示峰均比超过某一个门限 x 的概率,因此 OFDM 信号的 CCDF 可表示为:

$$P\{PAPR > x\} = 1 - P\{PAPR \leq x\} = 1 - (1 - \exp(-x))^N \quad (4)$$

为了克服 OFDM 系统 PAPR 过高的缺陷,需要采用较为理想的功放器件或较大的输入功率回退,这直接影响着整个系统的运行成本和效率。

3 非线性功放模型

为了评估 PAPR 对系统性能的影响,需要对功放模型进行定义。本节给出两种实际系统中常用的非线性功放模型,分别为固态功率放大器 (solid-state power amplifier, SSPA) 和行波管放大器 (traveling-wave tube amplifier, TWTA)。一般来说,直接对非线性功放进行建模的复杂度较高,通常假设功放是无记忆、非线性的,以简化建模过程。例如,功放输入端的信号可表示为:

$$s_{in}(t) = A(t) \exp[j\varphi(t)] \quad (5)$$

经过功放后,输出端的信号可表示为:

$$s_{out}(t) = G[A(t)] \exp[j\{\varphi(t) + \Phi[A(t)]\}] \quad (6)$$

其中, $G[\cdot]$ 及 $\Phi[\cdot]$ 分别为调幅/调幅 (amplitude modulation/amplitude modulation, AM/AM) 和调幅/调相 (amplitude modulation/phase modulation, AM/PM) 转换函数。SSPA 模型可表示为:

$$G[A(t)] = \frac{g_0 A(t)}{\{1 + [A(t)/A_{sat}]^{2p}\}^{1/2p}} \quad (7)$$

$$\Phi[A(t)] = 0 \quad (8)$$

其中, g_0 为放大器增益, A_{sat} 为输入饱和点, p 为 AM/AM 转换程度。由式(8)可见,SSPA 模型中不考虑 AM/PM 转换。TWTA 模型可表示为:

$$G[A(t)] = \frac{g_0 A(t)}{1 + [A(t)/A_{sat}]^2} \quad (9)$$

$$\Phi[A(t)] = \frac{\alpha_\varphi A^2(t)}{1 + \beta_\varphi A^2(t)} \quad (10)$$

其中, AM/PM 转换程度由非零常量 α_φ 和 β_φ 决定,可见 TWTA 的非线性程度高于 SSPA。对输入功率进行回退可以降低 OFDM 信号经过非线性功放后的畸变程度,输入功率回退 (input power back-off, IBO) 可表示为:

$$IBO = \frac{A_{sat}^2}{P_{in}} \quad (11)$$

其中, $P_{in} = E\{|s_{in}(t)|^2\} = E\{A^2(t)\}$ 为输入信号的平均功率。由以上分析可知,在研究非线性功放条件下的系统性能时,需要考虑 IBO 对误码率的影响。

4 CE-OFDM 系统

CE-OFDM 将传统恒包络调制技术与 OFDM 技术相结合,通过在恒包络载波信号的相位上调制 OFDM 信息,获得 PAPR 为 0 dB 的恒包络信号,是一种解决 OFDM 系统



高 PAPR 问题的有效方案。CE-OFDM 系统的收发端处理流程如图 1 所示,灰色部分为 CE-OFDM 相比 OFDM 增加的模块。

假设一共传输 N 个正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK) 符号,发送端在符号映射后得到频域符号序列 $X[k], k=1, 2, \dots, N$ 。由于 CE-OFDM 采用相位调制,离散傅里叶反变换 (inverse discrete Fourier transform, IDFT) 模块输出的信号为实序列,因此 IDFT 的输入应具有共轭对称结构。对 $X[k]$ 进行处理得到 $X'[k]$,共轭对称变换过程可表示为:

$$X'[k] = [0, X[1], X[2], \dots, X[N], 0, X^*[N], \dots, X^*[2], X^*[1]] \quad (12)$$

其中, $0_{1 \times N_l}$ 为长度为 N_l 的补零序列。由式(12)可见, IDFT 点数为 $N_{\text{idft}} = 2N + 2 + N_l$,过采样因子为 $C = N_{\text{idft}} / (N_{\text{idft}} - N_l)$ 。IDFT 后的信号可表示为:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N_{\text{idft}}-1} X'[k] \exp\left(\frac{j2\pi nk}{N_{\text{idft}}}\right) \quad (13)$$

其中, $n=0, 1, \dots, N_{\text{idft}}-1$ 。经过相位调制后的信号可表示为:

$$s[n] = A \exp(j2\pi h x[n]) \quad (14)$$

其中, A 为信号幅度, h 为调制指数。CE-OFDM 与 OFDM 的包络对比如图 2 所示,可见在相位调制后, CE-OFDM 信号具有恒包络特性, PAPR 始终为 0 dB。

为了抵抗多径信道引入的符号间干扰 (inter symbol interference, ISI),需要添加循环前缀 (cyclic prefix, CP),添加 CP 后的信号可表示为:

$$s[n] = \begin{cases} s[n+N_{\text{cp}}], n = -N_{\text{cp}}, \dots, -2, -1 \\ s[n], n = 0, 1, \dots, N_{\text{idft}}-1 \end{cases} \quad (15)$$

考虑两种信道环境:加性高斯白噪声信道和多径信道。接收端对经过 AWGN 信道后的信号进行处理,去除 CP 后可表示为:

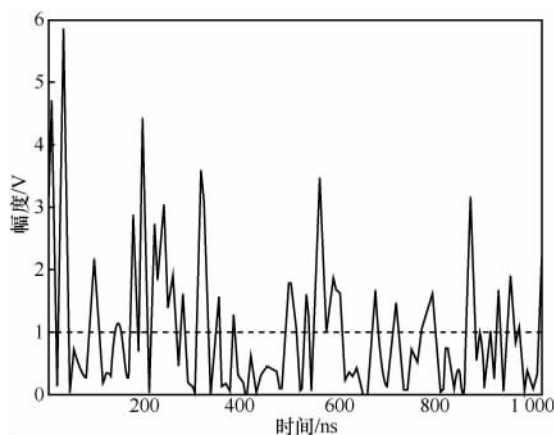


图 2 CE-OFDM 与 OFDM 系统包络对比示意

$$y[n] = s[n] + w[n], n=0, 1, \dots, N_{\text{idft}}-1 \quad (16)$$

其中, $w[n]$ 为复值噪声项,其功率谱密度为 N_0 。接收端对经过多径信道的信号进行处理,去除 CP 后可表示为:

$$\begin{aligned} y[n] &= h[n] * s[n] + w[n], n=0, 1, \dots, N_{\text{idft}}-1 \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} h[n_l] * s[n-n_l] + w[n] \\ &= \text{IDFT}(H[k]S[k]) + w[n] \end{aligned} \quad (17)$$

其中, L 为多径总数, n_l 为第 l 个径对应的时延, $H[k]$ 与 $S[k]$ 分别为 $h[n]$ 与 $s[n]$ 的傅里叶变换。由式(17)可见,经过多径信道后需要在频域做均衡以补偿多径信道造成的衰减,CE-OFDM 系统频域均衡以及接收端其余处理的详细过程可参见参考文献[6]中的内容,在此不做具体介绍。

5 仿真分析

本节以误码率为性能指标,评估 CE-OFDM 技术和参考文献[5]中迭代限幅滤波技术在非线性功放条件下的性能。仿真参数假设见表 1,OFDM 采用和 CE-OFDM 相同的调制方式和 IDFT 点数,以保证仿真对比的公平性。ITU-PA 信道模型参数^[7]见表 2。

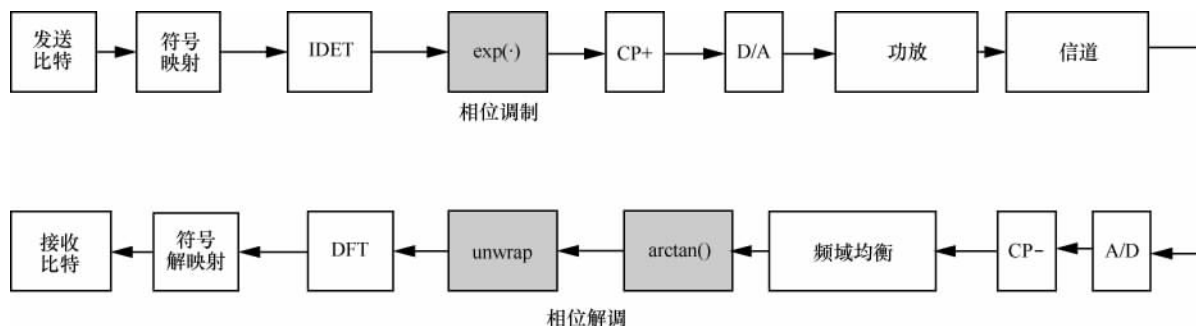


图 1 CE-OFDM 系统收发端处理流程

表 1 仿真参数假设

类别	参数名称	符号	参数值
功放参数	功放增益	g_0	1
	功放饱和点/dB	A_{sat}	0
	SSPA(AM/AM 参数)	p	2
	TWTA(AM/PM 参数)	α_p, β_p	$\frac{\pi}{12}, \frac{1}{4}$
CE-OFDM 系统参数	调制类型	QPSK	QPSK
	信号幅度	A	1
	调制指数	h	0.3、0.5、0.7
	调制符号数	N	31
	符号长度(不包含前缀)/ μs	T_B	64
	IDFT 点数	N_{idft}	1 024
	采样频率/MHz	F_{sa}	16
	循环前缀	N_{cp}	16
	过采样因子	C_{os}	16
OFDM 系统参数	目标 PAPR	T_{PAPR}	3.5
	迭代次数	迭代次数	16

表 2 ITU-PA 信道模型参数

多径序号	时延/ns	平均功率/dB
1	0	0
2	110	-9.7
3	190	-19.2
4	410	-22.8

图 3 给出了 CE-OFDM 与 OFDM 系统在 AWGN 和 ITU-PA 信道条件下采用 SSPA 功放的性能对比,假设接收端已知信道状态信息并采用频域均衡技术。由于在信噪比较低时,采用相位解调模块的 CE-OFDM 会出现门限效应,因此 OFDM 的误码率性能优于 CE-OFDM,而当信噪比增大时,CE-OFDM 的误码率性能会逐渐优于 OFDM。此外,当迭代滤波限幅 OFDM 系统的目标 PAPR 过低时,会引起较大的信号畸变,导致误码率的提高。

图 4 给出了 CE-OFDM 与 OFDM 系统在 AWGN 信道和 ITU-PA 信道条件下采用 TWTA 功放的性能对比。由于 TWTA 功放的非线性程度要高于 SSPA,OFDM 的信号畸变程度增大,而 CE-OFDM 由于具有恒包络特性,不受功放非线性的影响。

由 SSPA 及 TWTA 功放条件下的仿真结果可见,CE-OFDM 系统不受功放非线性影响。在低信噪比情况下受限于相位解调产生的门限效应,CE-OFDM 的误码率性能要劣于迭代限幅滤波 OFDM,但随着信噪比的上升,

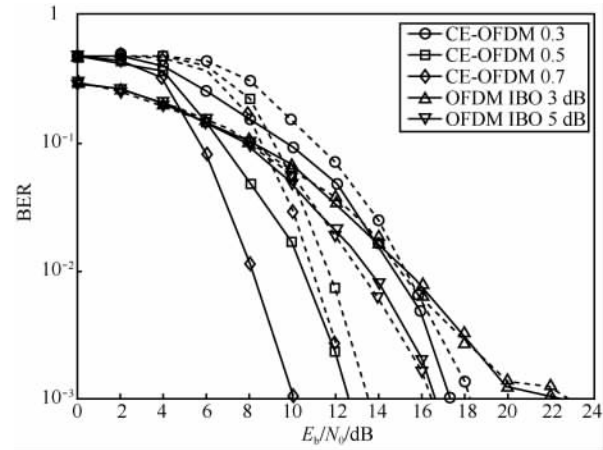


图 3 SSPA 功放条件下 CE-OFDM 与 OFDM 系统性能对比

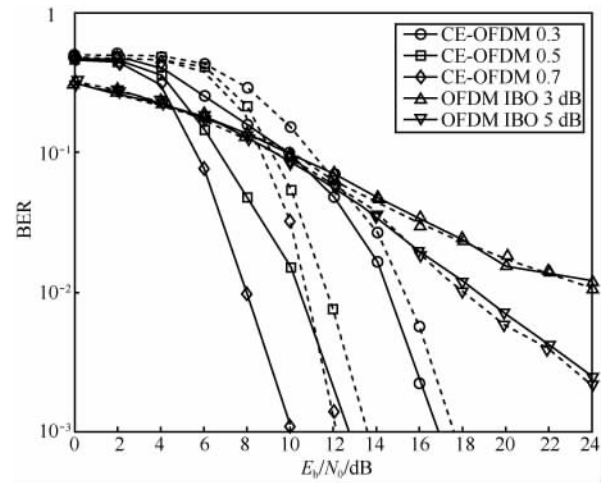


图 4 TWTA 功放条件下 CE-OFDM 与 OFDM 系统性能对比

CE-OFDM 的误码率性能要优于迭代限幅滤波 OFDM。此外在接收端采用频域均衡时,CE-OFDM 在多径衰落信道下的性能损失要高于迭代限幅滤波 OFDM 系统,需要研究更有效的抗多径衰落技术。

6 结束语

本文首先对 OFDM 系统的 PAPR 进行了分析,并介绍了两种常用的非线性功放模型;其次分析了 CE-OFDM 系统发送端的实现流程,并比较了 CE-OFDM 与 OFDM 的 PAPR 性能;最后在 AWGN 信道和多径衰落信道条件下仿真分析了 CE-OFDM 系统与迭代限幅滤波 OFDM 系统的误码率性能。仿真结果表明,CE-OFDM 在信噪比较高时具有更好的性能,但对抗多径衰落的能力有待提高,为 CE-OFDM 技术在实际通信场景中的应用提供了理论支持。



参考文献:

- [1] CIMINI L J. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing [J]. IEEE Transactions on Communications, 1985, 33(7): 665-675.
- [2] BINGHAM J. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come [J]. IEEE Communications Magazine, 1990, 28(5): 5-14.
- [3] CLASSON B, BLANKENSHIP K, DESAI V. Channel coding for 4G systems with adaptive modulation and coding [J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(2): 8-13.
- [4] GHOSH A, RATASUK R, MONDAL B, et al. LTE-Advanced: next generation wireless broadband technology [J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3): 10-22.
- [5] ARMSTRONG J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering [J]. Electronics Letters, 2002, 38(5): 246-247.
- [6] THOMPSON S C, AHMED A U, PROAKIS J G, et al. Constant envelope OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(8): 1300-1312.

[作者简介]



王清波(1962-),男,中国铁建电气化局集团有限公司高级工程师,主要研究方向为轨道交通系统有线通信技术及 GSM-R 系统的应用。