

OFDM 系统 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制算法研究^①

王 浩^② 刘凯明^③

(北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

摘要 正交频分复用(OFDM)技术具有频谱效率高和抗多径衰落能力强的优点,但存在高峰值平均功率比(PAPR)和高带外(OOB)辐射的固有缺点。部分 PAPR 抑制算法会导致 OOB 辐射升高,因此需要一种联合抑制 OFDM 系统的 PAPR 和 OOB 辐射的算法。本文提出了一种新的结合线性压扩和简化限幅滤波的混合式 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制算法,该算法采用连续分段线性压扩(CPLC)算法抑制信号 PAPR,并对压扩后的信号进行频域滤波;然后采用简化限幅滤波(SCF)算法降低频域滤波导致的峰值再生,保证信号的 OOB 辐射不再升高。接收端采用迭代接收算法提高系统的误码率性能。仿真结果表明,与 CPLC、SCF 方案相比,所提算法可以达到更好的 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制性能,同时通过迭代接收算法获得与原始信号相近的误码率(BER)性能。

关键词 正交频分复用(OFDM); 峰值平均功率比(PAPR); 带外(OOB)辐射; 线性压扩; 限幅滤波(CF)

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术具有频谱利用率高、抗多径衰落能力强的优点,被广泛应用于各种无线通信标准和通信系统^[1]。然而 OFDM 系统存在高峰值平均功率比(peak-to-average power ratio, PAPR)和过高带外(out-of-band, OOB)辐射 2 个固有缺点。高 PAPR 的信号经过线性范围有限的功率放大器时会产生信号的非线性畸变,导致带内信号失真,OOB 辐射升高,系统可靠性降低,极大地限制了 OFDM 的实际应用^[2-3]。

OFDM 系统的 PAPR 抑制方法大致可以分为概率类技术、信号编码技术和信号预畸变技术,其中信号预畸变技术的 PAPR 抑制性能出色,得到广泛关注。信号预畸变技术主要包括限幅滤波技术(clipping and filtering, CF)和压扩技术^[4]。限幅滤波技术的优点是时间复杂度低,可以联合抑制 PAPR 和 OOB 辐射,但滤波会导致峰值再生,需要多次迭代。

简化的限幅滤波技术^[5](simplified clipping and filtering, SCF),通过对一次限幅滤波产生的限幅噪声进行缩放,模拟多次迭代的效果,大幅降低了时间复杂度。文献[6]提出了一种基于改进的艾里压缩函数来抑制限幅噪声的方法,降低了系统的误码率(bit error rate, BER)。文献[7]提出的连续分段线性压扩(continuous piecewise linear companding, CPLC)算法的 PAPR 抑制性能、误码率性能良好,可以灵活调参。由于信号预畸变技术改变了信号波形,导致 OOB 辐射升高,误码率(bit error rate, BER)性能下降。

常用的抑制 OFDM 系统 OOB 辐射的方案中,最简单的方案是通过频域滤波直接滤除带外部分,其缺点是会导致 PAPR 升高。时域加窗技术^[8]通过对时域 OFDM 符号加窗,令符号周期边缘的幅值逐渐过渡到 0,使带外部分下降得更快,实现简单,但降低了系统的频谱效率。抑制 OOB 辐射的消除子载

① 国家自然科学基金创新研究群体(61821001)资助项目。

② 男,1999 年生,硕士生;研究方向:无线通信;E-mail:1742120929@qq.com。

③ 通信作者,E-mail: kmliu@bupt.edu.cn。

(收稿日期:2023-07-18)

波插入技术^[9]使用了不携带任何数据信息的保留子载波,缺点是降低了数据传输速率。

目前对于 OFDM 系统的 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制算法的研究较少,文献[10]利用循环前缀提供的时间自由度产生抑制信号,联合抑制 PAPR 和 OOB 辐射。文献[11]在文献[10]的基础上进行了优化,利用时域和频域的自由度得到效果更佳的抑制信号。这 2 种方案都需要解决松弛凸优化问题,计算复杂度非常高,不适合实际使用。文献[12]提出一种利用深度学习降低正交预编码 OFDM 信号的 PAPR 的方法,将抑制 PAPR 的自动编码器引入抑制 OOB 辐射的正交预编码中,实现 PAPR 和 OOB 辐射的联合抑制,缺点是复杂度较高、且会影响系统的 BER 性能。上述联合抑制算法均有复杂度较高的缺陷,不适合实际使用,因此迫切需要一种复杂度较低的算法来联合抑制 OFDM 系统的 PAPR 和 OOB 辐射。

本文提出了一种新的结合线性压扩和简化限幅滤波的混合式 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制算法,将压扩技术和限幅滤波技术结合。新算法采用 CPLC 算法抑制信号的 PAPR,并对压扩后的信号进行频域滤波;然后采用 SCF 算法降低频域滤波导致的峰值再生,保证信号的 OOB 辐射不再升高,实现了 PAPR 和 OOB 辐射的联合抑制;在接收端采用迭代接收算法提高系统的误码率性能。

1 OFDM 系统模型

在一个具有 N 个子载波的 OFDM 系统中,时域上过采样 OFDM 信号的第 n 个离散样本 x_n 可以表示为

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{LN}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi \frac{kn}{LN}}, n = 0, 1, \dots, LN - 1 \quad (1)$$

其中, $X_k (k = 0, 1, \dots, N - 1)$ 是第 k 个子载波上经过正交振幅调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 调制的信号; L 是过采样因子,通常情况下 $L \geq 4$, 使用过采样是为了准确估计 OFDM 符号的峰值功率,可以通过在频域补零实现。

假设不同子载波上的传输信号是统计独立的,根据中心极限定理,当 N 足够大 (如 $N \geq 64$) 时, OFDM 时域信号 x_n 可近似为一个复高斯过程,且 x_n 的幅值服从瑞利分布,其概率密度函数为

$$f_{|x_n|}(x) = \frac{2x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right), x \geq 0 \quad (2)$$

其中, x 为信号的幅度, σ^2 为 $|x_n|$ 的方差,所以 $|x_n|$ 的累积分布函数可以表示为

$$F_{|x_n|}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right), x \geq 0 \quad (3)$$

OFDM 信号的 PAPR 被定义为最大瞬时功率与平均功率的比值,当子载波数较多时,同相位的信号叠加会产生大峰值功率,导致 PAPR 过高。对于离散时间的 OFDM 信号, PAPR 可以定义为

$$PAPR = \frac{\max_{n \in \{0, 1, \dots, LN-1\}} (|x_n|^2)}{E[|x_n|^2]} \quad (4)$$

PAPR 性能可以通过互补累积分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF) 评估, PAPR 性能的 CCDF 是 PAPR 值超过某一阈值的概率:

$$CCDF_{PAPR}(\gamma) = 1 - (1 - e^{-\gamma})^{\varepsilon N} \quad (5)$$

其中, ε 是用于评估具有 N 个子载波的过采样 OFDM 信号的 PAPR 分布的指数修正因子,通常取值为 2.8。

2 混合式联合抑制算法设计

本文提出了一种新的结合线性压扩和简化限幅滤波的混合式 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制算法,该算法具体设计如下。

2.1 连续分段线性压扩技术

文献[7]中提出的 CPLC 算法是一种广义的连续分段线性压扩算法,其压扩和解压扩函数均由许多连续线性片段组成,分段数要大于等于 4,其连续性可以帮助降低 OOB 辐射,压扩函数表达式如式(6)所示。

$$y = \begin{cases} x & 0 \leq x \leq a_i \\ \frac{b_{i-1} - b_i}{a_{i-1} - a_i} (x - a_i) + b_i & a_i < x \leq a_{i-1}, \\ A_c & i = 1, \dots, W - 2 \\ & x > a_{W-1} \end{cases} \quad (6)$$

其中, x 是原始 OFDM 信号的幅度, y 是压扩后的信号幅度, $\{a_1, \dots, a_{w-1}\}$ 是不同段分界点的横坐标, $\{b_1, \dots, b_{w-1}\}$ 是对应的纵坐标。通过解决基于压扩前后信号平均功率不变限制的最优化问题求解压扩函数中的参数, 并且可以根据实际应用中对 BER、OOB 辐射的不同要求来选择不同的最优化方案。

CPLC 算法可以有效降低 OFDM 信号的 PAPR, 在接收端通过迭代接收算法可以获得比原始 OFDM 信号更低的 BER, 缺点是会导致 OFDM 系统的 OOB 辐射升高。

2.2 简化限幅滤波技术

文献[13]中的迭代限幅滤波(iterative clipping and filtering, ICF)算法是一种有效的抑制 OFDM 系统 PAPR 的方案, 可以通过频域滤波将带外部分置零, 在不增加 OOB 辐射的情况下降低 OFDM 信号的 PAPR。但滤波会导致 OFDM 信号峰值再生, 并且改变了信号波形, 导致 BER 性能恶化, 所以通常需要进行多次迭代才能达到预期性能, 为实际实现带来一些不便。

文献[5]的 SCF 算法是在 ICF 算法的基础上提出的一种简化方案。通过对每个限幅脉冲进行抛物线近似对限幅滤波技术进行了分析, 发现经过多次限幅滤波迭代后产生的限幅噪声和第 1 次限幅滤波后产生的限幅噪声是成比例的。对第 1 次迭代中产生的噪声进行缩放, 模拟经过多次迭代的效果, 在不损失性能的前提下大幅降低了复杂度。

2.3 联合抑制算法设计

CPLC 算法可以有效降低 OFDM 信号的 PAPR, 但会导致 OOB 辐射升高。为了实现 PAPR 和 OOB

辐射的联合抑制, 本文提出了一种结合线性压扩和简化限幅滤波的混合式 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制算法。该算法首先采用 CPLC 算法抑制信号的 PAPR, 并对压扩后的信号进行频域滤波, 得到 CPLC 结合滤波算法(continuous piecewise linear companding and filtering, CPLCF); 然后采用 SCF 算法降低频域滤波导致的峰值再生, 同时保证信号的 OOB 辐射不再升高; 最终得到 CPLCF + SCF 算法。由于 CPLC 处理后的信号的 PAPR 相比于原始 OFDM 信号的 PAPR 低, 因此 SCF 对信号波形的改变较小, 算法可以在联合抑制 PAPR 和 OOB 辐射的同时保证良好的 BER 性能。图 1 是采用联合抑制算法的 OFDM 系统框图。从图 1 可以看出, 将输入的数据流进行调制、串并变换及快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)后得到了原始 OFDM 信号, 并进行 PAPR 和 OOB 辐射的联合抑制。首先对 OFDM 信号进行 CPLC 压扩, 降低 PAPR; 其次进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)变换, 将时域信号变换为频域信号进行频域滤波; 然后经过 IFFT 再变换到时域; 最后使用 SCF 算法处理时域信号, 降低频域滤波导致的峰值再生, 并且保证信号的 OOB 辐射不会升高。将 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制后的信号经过串并转换和功率放大器后送入信道。在接收端进行串并转换后进行解压扩, 之后再经过 FFT 变换、迭代接收、串并转换和解调, 最终得到数据流。需要注意的是, 在经过 CPLC 压扩后必须要进行一次频域滤波, 消除 CPLC 压扩导致的 OOB 辐射。因为 SCF 算法中用于计算限幅噪声的初始信号不能有额外的 OOB 辐射, 否则计算出的限幅噪

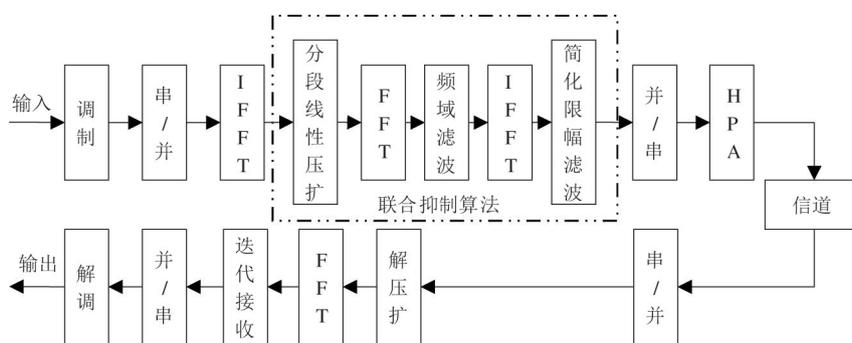


图 1 采用联合抑制算法的 OFDM 系统框图

声也会包含带外部分,引入额外的带外辐射。

在求解 CPLC 算法的未知参数 $\{b_2, \dots, b_{W-2}\}$ 时,构造了约束最优化问题,约束是压扩前后 OFDM 信号的平均功率保持不变,即满足:

$$\int_0^\infty h^2(x) \cdot f_{|x_n|}(x) dx = \int_0^\infty x^2 \cdot f_{|x_n|}(x) dx = \sigma^2 \quad (7)$$

本文所提出的算法在 CPLC 算法处理后进行了频域滤波,因此在计算 CPLC 压扩函数的未知参数时不需要考虑最小化压扩畸变来降低 OOB 辐射,只需要解决最小化解压扩噪声的最优化问题,以获得更优的 BER 性能。从 CPLC 压扩函数表达式可知,当给定 A_c, a_1, W, a_{w-1} 时,未知参数 $\{b_2, \dots, b_{W-2}\}$ 的选择不会改变压扩函数第 1 部分和硬削峰段对压扩噪声的影响。经过加性白高斯噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 信道接收到的信号 r_n 可以表示为

$$r_n = y_n + \omega_n, n = 0, 1, \dots, LN - 1 \quad (8)$$

其中, y_n 为压扩后的信号, ω_n 为信道中的噪声,方差计算为 $\sigma_\omega^2 = E[|\omega_n|^2]$ 。接收信号 r_n 在接收端被解压扩,噪声的功率也因此改变。由于解压扩过程只对信号幅度进行变换,解压扩后的噪声难以得到精确的表达式,所以利用一个近似的计算来简单评估解压扩后的噪声功率。这里只考虑参数选择对多折线段的噪声的影响,幅度落在第 i 段区间的信号,经解压扩后的噪声,可近似计算为

$$\tilde{\omega}_n = \frac{\omega_n}{\rho_i}, b_i < |r_n| < b_{i+1}, i = 1, \dots, W - 2 \quad (9)$$

其中, $\rho_i = (b_{i+1} - b_i)/(a_{i+1} - a_i)$ 是中间多折线段第 i 段的斜率,纳入考虑的解压扩噪声功率为

$$\tilde{P}_{\text{Noise}} = E[|\tilde{\omega}_n|^2] = \sigma_\omega^2 \cdot \sum_{i=1}^{W-2} \frac{p_i}{\rho_i^2} \quad (10)$$

其中 p_i 是 $|r_n| \in (b_i, b_{i+1})$ 的概率,可以被近似计算为 $|x_n| \in (a_i, a_{i+1})$ 的概率,其表达式为

$$p_i \approx \int_{a_i}^{a_{i+1}} f_{|x_n|}(x) dx = e^{-a_{i+1}^2} - e^{-a_i^2} \quad (11)$$

因此噪声影响因子可以被计算为

$$\eta_{NI} = \frac{\tilde{P}_{\text{Noise}}}{\sigma_\omega^2} = \frac{\sum_{i=1}^{W-2} (e^{-a_{i+1}^2} - e^{-a_i^2})}{\rho_i^2} \quad (12)$$

结合上述分析,最小化解压扩噪声影响的约束最优化问题可以表示为

$$\arg \underset{\{b_2, \dots, b_{W-2}\}}{\text{Min}} \eta_{NI},$$

$$\text{服从: } \int_0^\infty h^2(x) \cdot f_{|x_n|}(x) dx = \sigma^2 \quad (13)$$

这里的最优化问题是约束多变量非线性规划问题,可以采用内点法、序贯二次规划等典型的方法进行求解。通过解决最小化解压扩噪声的最优化问题求解未知参数 $\{b_2, \dots, b_{W-2}\}$,可以减小噪声影响,降低 BER,并且这些参数可以提前计算,计算过程不会导致系统复杂度升高。

为了进一步优化系统的 BER 性能,在接收端进行频域迭代接收,消除压扩噪声,根据巴斯冈定理^[14-15],压扩信号可以分解为衰减信号分量与与信号不相关的失真分量 2 部分。通过在频域进行迭代接收,估算出限幅噪声,并从原始信号中去除限幅噪声的影响,从而显著提升系统的 BER 性能,最终实现 OFDM 系统的 PAPR 和 OOB 辐射的联合抑制,同时获得良好的 BER 性能。

2.4 算法复杂度分析

复杂度分析的是传输 1 个 OFDM 符号样本所需的必要的计算,假设所有的常数参数,如 $\{b_1, \dots, b_{W-1}\}$ 、信号样点的幅度都已经提前计算好了,并且此处没有用到过采样。计算运算次数时使用的是 CPLCF 结合 2 次迭代的 ICF (CPLCF + 2 次 ICF)、3 次迭代的 ICF, CPLC 算法中的总段数设置为 7, OFDM 系统的子载波数设为 256,在接收端采用 2 次迭代接收,各种算法在发送端和接收端需要的乘法、加法和比较次数如表 1 和表 2 所示。

从表 1 可以看出,在发送端 CPLCF 结合 SCF 算法的复杂度要高于 SCF 算法和 CPLC 算法,主要是

表 1 发送端所需的运算次数

算法	乘法	加法	比较
CPLCF + SCF	37 632	56 064	976
CPLCF + 2 次 ICF	55 552	110 848	1 232
CPLC	256	256	720
3 次 ICF	55 296	82 944	768
SCF	18 944	37 376	256

表 2 接收端所需的运算次数

算法	乘法	加法	比较
CPLCF + SCF	39 680	58 112	2 156
CPLCF + 2 次 ICF	39 680	58 112	2 156
CPLC	39 680	58 112	1 440
3 次 ICF	38 912	57 344	512
SCF	38 912	57 344	512

因为需要进行 FFT 和 IFFT 运算,但要低于 3 次迭代 ICF 和 CPLCF 结合 2 次迭代 ICF 算法的复杂度。

从表 2 可以看出,在接收端经过 2 次迭代接收,CPLCF 结合 SCF 算法的复杂度和 CPLC 算法的复杂度相同,高于 p 次 ICF 和 SCF 算法的复杂度。

3 仿真分析

本节将对提出的结合线性压扩和简化限幅滤波的混合式 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制算法的性能进行仿真验证,并将该算法与 CPLC、SCF、ICF、CPLC 算法结合 ICF 算法进行性能比较。OFDM 系统的子载波数设置为 256,调制方式选择 64 QAM,过采样系数为 4,信道采用 AWGN 和衰落信道。子载波数越多、调制阶数越高,OFDM 系统的 PAPR 越高,但联合抑制算法的 PAPR 抑制性能只与算法参数的选取有关,与 OFDM 系统的子载波数和调制阶数没有直接关系。

对于 CPLC 算法,根据文献[7],将 a_1 设置为 0.6σ , a_{w-1} 设置为 2.2σ ,其中 σ^2 是信号的平均功率;将压扩函数的总段数 W 设置为 7,足以达到期望的 BER 性能,若再增大 W ,会导致算法的复杂度升高,而性能不会有明显提升;将最优化权衡因子 β 设置为 1,表示使 BER 性能最优,是因为 CPLC 处理后经过了一次频域滤波,无需考虑最优化功率谱密度(power spectral density, PSD)性能;预设的 PAPR 设置为 5 dB, PAPR 每降低 3 ~ 4 dB,功率放大器的效率一般会增加 5% ~ 10%,如果将目标 PAPR 预设得太低,那么对信号造成的畸变会很大,导致 BER 性能恶化,也会导致 OOB 辐射升高。

为了评估提出算法的综合性能,采用固态功率

放大器(solid state power amplifier, SSPA)模拟信号经过功率放大器之后的输入输出特性。调制方式采用 64 QAM 时,SSPA 的输入回退(input backoff, IBO)设置为 7 dB,平滑度系数 P 设定为 2。

3.1 PAPR 抑制性能

图 2 是预设 PAPR 为 5 dB 情况下不同算法的 PAPR 的 CCDF 结果。首先 CPLC 算法的 PAPR 抑制效果最好,其 CCDF 曲线在 5 dB 处完全截止。总体来看,CPLC 结合 SCF 和 CPLC 结合 2 次 ICF 算法的 PAPR 抑制性能大致相同,并且均优于 SCF 和 3 次 ICF 算法的 PAPR 抑制性能。在 $CCDF = 10^{-3}$ 时,CPLC 结合 SCF 和 CPLC 结合 2 次 ICF 的 PAPR 抑制水平基本相同,与 SCF 和 3 次 ICF 算法相比,优势约为 0.2 dB。

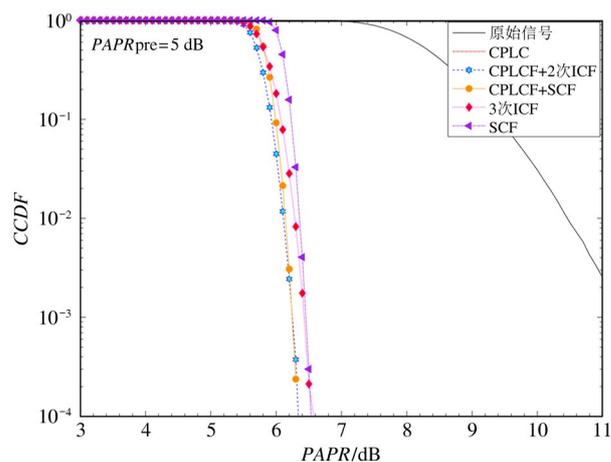


图 2 预设 PAPR 为 5 dB 时,不同算法的 PAPR 仿真图

3.2 BER 性能

下面对算法的 BER 性能进行仿真,这里仿真的是算法在特定比特能量-噪声密度比(bit energy-to-noise density ratios, E_b/N_0 s)下的 BER 性能。

图 3 是不同压扩算法的 OFDM 信号经过 SSPA 和 AWGN 信道后,在接收端经过迭代接收的 BER 结果,并且给出了原始 OFDM 信号的 BER 结果作为参考。首先 CPLC 经过一次迭代接收后的 BER 性能是最好的,要优于原始信号的 BER 性能,这是因为 CPLC 算法本身的 BER 性能良好,并且没有结合其他信号预畸变算法,经过迭代接收后进一步消除了压扩噪声。

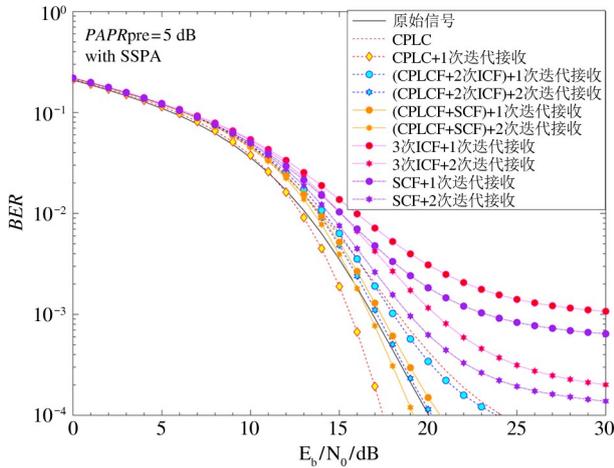


图3 不同算法的信号经过 AWGN 信道的 BER 仿真图

总体上看,CPLC 结合 SCF 的 BER 性能要优于 CPLC 结合 2 次 ICF、3 次 ICF 和 SCF 算法的 BER 性能。在 $BER = 10^{-4}$ 时,经过 2 次迭代接收后,CPLC 结合 SCF 算法所需的 E_b/N_0 比 CPLC 结合 2 次 ICF 算法所需的 E_b/N_0 约低 1 dB,比 3 次 ICF 和 SCF 算法所需的 E_b/N_0 要低超过 10 dB,并且此时 BER 性能优于原始信号。

图 4 是不同压扩算法的 OFDM 信号经过 SSPA 和衰落信道后,在接收端经过迭代接收的 BER 结果,并且给出了原始 OFDM 信号的 BER 结果作为参考。这里使用的衰落信道为 3 径衰落信道^[16-17];最大多普勒频移为 100 Hz;各径归一化的功率值分别为 0 dB、-4 dB、-8 dB;相邻两径之间的时延分别是 1.5 μ s 和 4.0 μ s。

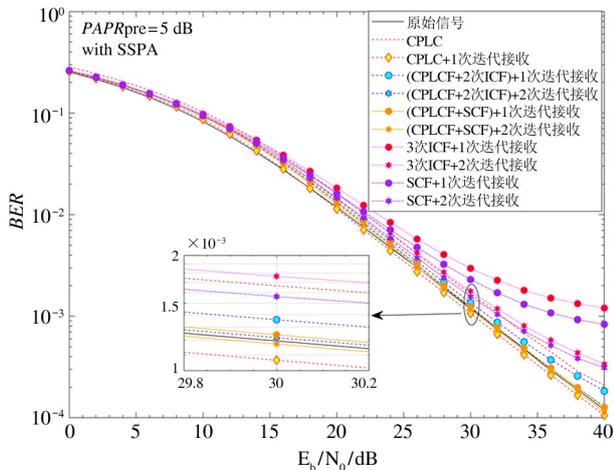


图4 不同算法的信号经过衰落信道的 BER 仿真图

在衰落信道环境中,CPLC 经过一次迭代接收后的 BER 性能仍然是最好的,仍然优于原始信号的 BER 性能。总体上看,CPLC 结合 SCF 算法的 BER 性能要优于 CPLC 结合 2 次 ICF、3 次 ICF 和 SCF 算法。具体来说,经过一次迭代接收的 CPLC 结合 SCF 算法与经过 2 次迭代接收后的 CPLC 结合 2 次 ICF 算法其原始信号的 BER 性能大致相同。在 $BER = 10^{-3}$ 时,经过一次迭代接收的 CPLC 结合 SCF 算法所需的 E_b/N_0 比经过一次迭代接收的 CPLC 结合 2 次 ICF 算法所需的 E_b/N_0 约低 0.5 dB,比经过 2 次迭代接收后的 3 次 ICF 和 SCF 算法所需的 E_b/N_0 分别要低约 1.5 dB 和 2.0 dB。

3.3 OOB 辐射抑制性能

图 5 是不同压扩算法经过 SSPA 后的 PSD 结果比较,可以发现 CPLC 算法的 OOB 辐射较高,而 ICF、SCF、CPLC 结合 ICF 以及提出的 CPLC 结合 SCF 算法都有效抑制了 OOB 辐射。在归一化频率为 ± 0.5 时,经过 OOB 辐射抑制的算法的 PSD 结果要比原始信号和 CPLC 压扩后的信号的 PSD 结果分别低约 1 dB 和 5 dB。因此使用新提出的算法可以有效降低 OFDM 系统的 OOB 辐射,降低对相邻用户的干扰,提升了系统的稳定性。在归一化频率为 ± 1.0 时,经过 OOB 辐射抑制的算法的 PSD 结果要与原始信号的 PSD 结果相同,比 CPLC 压扩后的信号的 PSD 结果分别低约 1 dB。

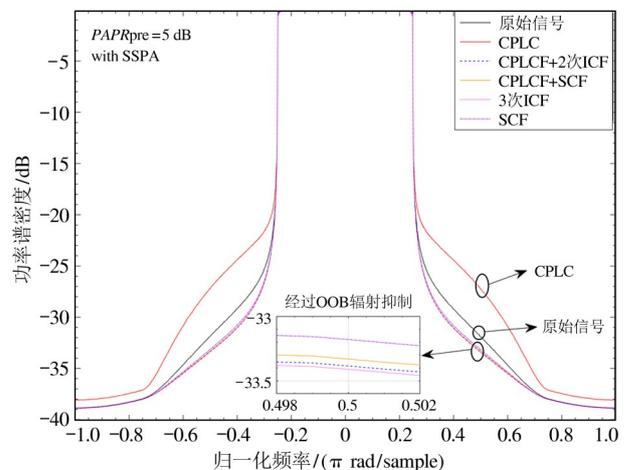


图5 不同算法的信号经过 SSPA 的 PSD 仿真图

4 结论

本文提出了一种新的结合线性压扩和简化限幅滤波的混合式 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制算法,该算法将分段线性压扩算法与简化限幅滤波算法结合。仿真结果表明,与其他典型算法相比,该算法达到了更好的 PAPR 和 OOB 辐射联合抑制效果,在 AWGN 信道和衰落信道环境中,接收端经过一次迭代接收后可以获得与原始信号相近的 BER 性能。同时算法的复杂度较低,更适合实际使用。本文也为压扩算法和限幅滤波算法结合、实现 OFDM 系统的 PAPR 和 OOB 辐射抑制提供了指导。

参考文献

- [1] WU Y, ZOU W Y. Orthogonal frequency division multiplexing: a multi-carrier modulation scheme [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1995, 41 (3) : 392-399.
- [2] WEINSTEIN S B. The history of orthogonal frequency-division multiplexing [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47 (11) : 26-35.
- [3] WANG J, JIN A, SHI D, et al. Spectral efficiency improvement with 5G technologies: results from field tests [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35 (8) : 1867-1875.
- [4] 崔筱琰. OFDM 系统基于线性压扩的 PAPR 抑制技术研究 [D]. 北京:北京邮电大学, 2022.
- [5] WANG L, TELLAMBURA C. A simplified clipping and filtering technique for PAR reduction in OFDM systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12 (6) : 453-456.
- [6] 丁亚青, 吕建鸿, 王中鹏. 一种降低 OFDM 系统 PAPR 的改进限幅噪声压缩方法 [J]. 电讯技术, 2022, 62 (11) : 1691-1696.
- [7] LIU K M, CUI X Y, XING Z T. Generalized continuous piecewise linear companding transform design for PAPR reduction in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2022, 68 (3) : 780-796.
- [8] 于云昊, 穆晓敏, 杨守义, 等. 一种有效抑制 OFDM 系统带外功率辐射方案 [J]. 微计算机信息, 2008, 24 (21) : 162-163.
- [9] BRANDES S, COSOVIC I, SCHNELL M. Reduction of out-of-band radiation in OFDM systems by insertion of cancellation carriers [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10 (6) : 420-422.
- [10] TOM A, AHIN A, ARSLAN H. Suppressing alignment: joint PAPR and out-of-band power leakage reduction for OFDM-based systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64 (3) : 1100-1109.
- [11] ESAT A Z, ALPHAN Ş, HÜSEYİN A. Joint time-frequency alignment for PAPR and OOB suppression of OFDM-based waveforms [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21 (12) : 2586-2589.
- [12] REIYA K, MASAYA O. PAPR and OOB suppression of OFDM signal using deep learning [C] // 2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics. Kobe, Japan: IEEE, 2020: 905-906.
- [13] ARMSTRONG J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering [J]. Electronics Letters, 2002, 38 (5) : 246-247.
- [14] BUSSGANG J J. Crosscorrelation functions of amplitude-distorted Gaussian signals: TR 216 [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1952.
- [15] OCHIAI H, IMAI H. Performance analysis of deliberately clipped OFDM signals [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50 (1) : 89-101.
- [16] ERCEG V, HARI K V S, SMITH M S, et al. Channel models for fixed wireless application: IEEE 802.16a-03/01 [R]. IEEE Broadband Wireless Access Working Group, 2003.
- [17] ERCEG V, GREENSTEIN L J, TJANDRA S Y, et al. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17 (7) : 1205-1211.

Research on the joint suppression algorithm of PAPR and OOB radiation in OFDM systems

WANG Hao, LIU Kaiming

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology has the advantages of high spectral efficiency and strong resistance to multipath fading, but it has inherent disadvantages of peaking average power ratio (PAPR) and high out-of-band (OOB) radiation. Some PAPR suppression algorithms can lead to increased OOB radiation, so an algorithm that jointly inhibits PAPR and OOB radiation in OFDM systems is needed. In this paper, a new hybrid PAPR and OOB radiation suppression algorithm combining linear compression and simplified clipping filter is proposed. The algorithm adopts continuous piecewise linear compression (CPLC) algorithm to suppress signal PAPR, and filters the signal after compression in the frequency domain, and then adopts the simplified clipping filter (SCF) algorithm to reduce the peak regeneration caused by frequency domain filtering. At the same time, the OOB radiation of the signal is not increased. The iterative receiving algorithm is used to improve the bit error rate performance of the system. The simulation results show that compared with CPLC and SCF schemes, the proposed algorithm can achieve better combined suppression performance of PAPR and OOB radiation, and the bit error rate (BER) performance is similar to the original signal through the iterative receiving algorithm.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), peak average power ratio (PAPR), out-of-band (OOB) radiation, linear compression and expansion, clipping and filtering (CF)