

引入深度限幅技术的 MIMO-OFDM 系统 PAPR 抑制优化算法^①

蒋 阳^② 袁 敏 韩飞飞 郎保才

(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

摘 要 针对多输入多输出正交频分复用(MIMO-OFDM)通信系统存在的峰值平均功率比(PAPR)较高的问题,将深度限幅技术和具有很好 PAPR 抑制性能的预留子载波保留(TR)算法进行了改进优化,提出了一种深度限幅优化的 TR 算法,并将该算法应用于 MIMO-OFDM 系统的 PAPR 抑制性能研究。该算法将系统中的一个天线深度限幅后的补充信号进行处理,然后再应用到其它天线上。通过理论分析与仿真结果表明,该算法不仅能有效抑制 MIMO-OFDM 系统的 PAPR,同时可减小算法的计算复杂度和降低系统误码率。

关键词 多输入多输出(MIMO), 正交频分复用(OFDM), 峰值平均功率比(PAPR), 预留子载波保留(TR), 深度限幅

0 引 言

在宽带频率选择性多径衰落信道中,将正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)与多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术相结合,可以大幅度地提高系统性能,实现高性能、高频谱效率的通信^[1]。由于 MIMO-OFDM 系统使用 OFDM 调制方式,它在继承 OFDM 调制的诸多优点的同时,也不可避免地继承了 OFDM 调制的较高峰值平均功率比(峰均比)(peak to average power ratio, PAPR)问题^[2]。较高的 PAPR 要求系统的功率放大器必须具有很大的动态范围,否则就会产生严重的非线性失真,导致信号畸变,产生子载波间的互调干扰和带外辐射,破坏子载波的正交性,从而严重影响 MIMO-OFDM 系统的性能^[3]。由于 MIMO-OFDM 系统的每一个天线支路都采用 OFDM 技术,因此每根天线上也都存在高 PAPR 问题^[4]。目前已有许多方法可用来降低 OFDM 系统的 PAPR,大致可分为以下三类:限幅类、编码类和概率类,限幅类是信号预畸变技术,即在信号发送之前,首先要对功率大于门限值的信号进行非线性畸变,然后在发送。如限幅(clipping)、峰值窗

(peak windowing)以及压缩扩展等方法;编码类技术主要避免使用那些会生成大峰值功率信号的编码图样,选择 PAPR 较低的码字进行传输,如循环编码、M 序列、分组编码等方法;概率类技术是利用不同的加扰序列对 OFDM 信号进行加扰处理,然后选择 PAPR 较小的码字来传输,如选择性映射(selective mapping, SLM)、部分传输序列(partial transmit sequences, PTS)、预编码^[5]等方法。然而与传统的单入单出正交频分复用(single-input single-output OFDM, SISO-OFDM)系统的 PAPR 问题相比, MIMO-OFDM 系统随着天线数量的增加, PAPR 问题变得更加复杂,将这些方法直接应用到多天线的系统时,大都将变得比较复杂。然而预留子载波保留(tone reservation, TR)算法则很容易拓展应用到 MIMO-OFDM 系统中去^[6],因为其保留子载波的位置对于所有发射机天线都是一致的,且对于发射机和接收机而言这些都是已知的,而每个发射机天线其 PAPR 各自独立地减少。为了降低不同天线的 PAPR,本文提出了一种改进的 TR 算法,并将其应用于降低多天线系统的 PAPR。与传统的 TR 方法相比,该算法不仅可以有效降低系统的 PAPR,对系统的误码率(BER)性能产生的影响也很小,且实现了计算量、误码率和降低 PAPR 三方面的折中。

① 国家科技重大专项(1010122720110046)资助项目。

② 男,1963 年生,博士,副教授;研究方向:现代通信技术与系统,无线传感器网络及其应用;联系人, E-mail: jy@cqu.edu.cn, cqjiangsun@126.com
(收稿日期:2012-03-14)

1 PAPR 的定义

假设在一个 MIMO-OFDM 系统中有 N_{tx} 个发射天线、 N_{rx} 个接收天线,每个天线支路上有 N 个子载波。在信号发射之前都会有一个高功率放大器 (HPA) 对信号进行放大,因此 HPA 的非线性也会对具有高峰值功率的信号造成影响^[7]。

令 $X_i = [X_{i,0}, X_{i,1}, \dots, X_{i,N-1}]$ 表示分配给第 i 根发射天线发送的数据序列,那么经过逆快速傅立叶变换 (IFFT) 后,在第 i 根天线上发射的时域信号可表示为^[8]

$$x_{i,n} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_{i,k} e^{j2\pi kn/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

则 MIMO-OFDM 系统中第 i 根天线上发射信号的峰值平均功率比定义为

$$\text{PAPR}(x_i) = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} [|x_{i,n}|^2]}{E[|x_{i,n}|^2]} \quad (2)$$

式中, $E[\cdot]$ 为求数学期望; n 为子载波序号; i 为发射天线的序号, $i \in (1, N_t)$; $x_{i,n}$ 为第 i 个发射天线上第 n 个子载波上的信号。

2 深度限幅和预留子载波算法

2.1 深度限幅原理

限幅类技术的基本原理是将 IFFT 后的时域信号通过一个限幅器,将输出信号的幅度限制在一个给定的门限值以下。限幅滤波算法是一种最直接和非常有效的降低 PAPR 的技术,传统的限幅滤波算法通常表示为^[9]

$$\hat{x}_n = \begin{cases} A, & |x_n| > A \\ x_n, & |x_n| \leq A \end{cases} \quad (3)$$

其中 A 是给定的幅度值,称为限幅幅度。

文献[10]提出的深度限幅滤波的算法是为了解决峰值再增长的问题。不同于传统的限幅函数将幅度限制在某一特定门限值内,深度限幅函数则是随着输入信号幅度的增加而变化,即叠加的信号要比原信号更大,因此限幅后的信号要比门限值更小,从而能够抑制峰值再增长。深度限幅函数的表达式为^[11]

$$\hat{x}_n = \begin{cases} x_n, & |x_n| \leq A \\ A - \alpha(x_n - A), & A < |x_n| \leq \frac{1+\alpha}{\alpha}A \\ 0, & |x_n| > \frac{1+\alpha}{\alpha}A \end{cases} \quad (4)$$

其中 α 为限幅深度向量。

图 1、图 2、图 3 分别给出了 OFDM 信号、传统限幅滤波后的信号和深度限幅滤波后的信号。从中可以看出,利用深度限幅滤波算法限幅后的信号要比门限值更小,从而抑制了峰值的再增长。

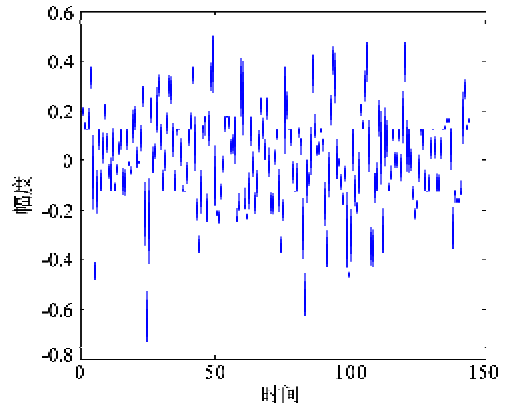


图 1 OFDM 信号

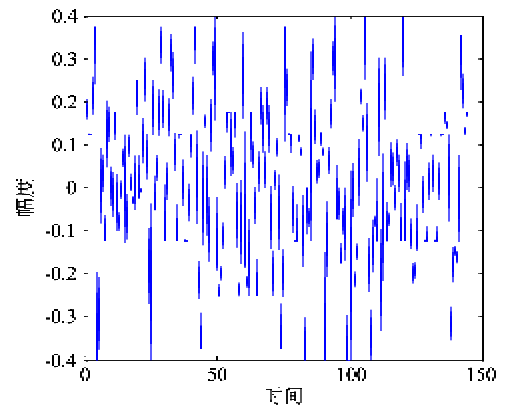


图 2 传统限幅滤波后的信号

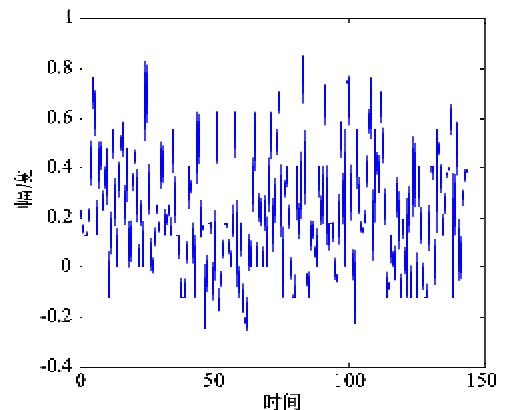


图 3 深度限幅滤波后的信号

2.2 预留子载波保留 (TR) 技术

在概率类技术中的 TR 算法很容易拓展到 MIMO-OFDM 系统中。为了在 MIMO-OFDM 系统中利用 TR 技术降低 PAPR,需要使预留子载波的位置对

于所有发射机天线而言都是一致的,并且对于发射机和接收机而言这些都是已知的^[12],而每个发射机天线其 PAPR 各自独立地减少。

具体实现方法是通过 TR 算法产生特殊结构的频域信号 $C = [C_0, C_1, \dots, C_{N-1}]^T$, 将其对应的时域信号 c 和时域信号 x 相叠加后得到新的时域信号 $\hat{x}_n = x + c = \text{IDFT}\{X + C\}$, 因为时域削峰信号 c 大幅度地抵消了时域信号 x 的峰值, 所以有效地降低了 OFDM 系统的 PAPR 特性^[13]。

根据 TR 算法, IFFT 前输入复数数据如下式^[14]所示:

$$A_n = X_n + C_n = \begin{cases} C_n, & n \in R \\ X_n, & n \in R^c \end{cases} \quad (5)$$

式中, R 用来表示传输数据的子载波在 N 个子载波中的位置, 其中 L 为预留载数, $N = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$, 且 $L < N, R^c = N - R$, 即 R^c 是 R 关于 N 的补集, 标志着预留子载波的位置。TR 算法的目的是找到合适的 C 来降低时域信号 $\hat{x}_n$ 的峰值, 优化码字 C 表示为

$$C^{(opt)} = \arg \min_C \max_n |\hat{x}_n| \quad (6)$$

用 TR 算法时, 预留子载波不被用来传输数据信息, 而是产生降低 PAPR 的信号, 在接收端直接去掉即可, 无需传送边带信息。

3 优化的 TR 算法

3.1 改进的深度限幅算法

虽然深度限幅算法能够有效抑制 PAPR 再增长, 但是直接用深度限幅算法同样会造成带内干扰和带外噪声, 同时还会影响系统误码率。因此本文将改进的深度限幅算法应用到 TR 算法中, 这样可避免造成带内干扰。

将深度限幅法引用到 TR 算法中来降低系统 PAPR 的算法是让多天线中的一个天线采用深度限幅产生补充信号, 再利用自适应 TR 算法计算出其它天线的补充信号。由于滤波信号被限制在预留子载波中, 所以不会影响系统误码率 (BER)^[15]。另外, 此算法利用自适应的 TR 算法计算出其它天线的补充信号, 这样就避免了对每个天线重复执行相同的运算过程, 明显降低了系统的计算复杂度。

3.2 自适应算法原理

深度限幅后, 滤波信号表示为

$$d_n = x_n - \hat{x}_n \quad (7)$$

在 TR 算法的限制条件下, 需要将 d_n 限制在预

留子载波中, 滤波结果表示为 $\hat{d}_n$, 假设经过限幅滤波的补充信号 c_n 可以近似表示为

$$c_n = -\beta \hat{d}_n \quad (8)$$

由于不同天线降低 PAPR 的参数不同, 本文提出用一种自适应的 TR 算法来计算出不同天线的补充信号参数 β , 则新的时域信号可以表示为

$$\hat{x}_n = x_n + c_n = x_n - \beta \hat{d}_n = A e^{j\theta_n} + d_n - \beta \hat{d}_n \quad (9)$$

运用 TR 算法后, PAPR 表示为

$$\text{PAPR}\{\hat{x}_n\} = \frac{\max |\hat{x}_n|^2}{E[|x_n|^2]} = \frac{\max |x_n + c_n|^2}{E[|x_n|^2]} \quad (10)$$

由 (10) 式看出, c_n 只包含在分子中, 所以 C_n 的选择必须是最小化时域信号的最高值, 最优 C_n 值表达式为

$$C_n^{(opt)} = \arg \min C_n \max |\hat{x}_n| \quad (11)$$

由于限幅滤波的脉冲是抛物线式的, 所以为了要降低限幅滤波的输出功率, 就是要降低限幅脉冲的峰值超过门限值范围的功率 P , 因此为了最小化 P 的输出范围, 就要使出现的可能性达到最小化, 其中:

$$P = \sum_{|\hat{x}_n| > A} (|\hat{x}_n| - A)^2 = \sum_{|\hat{x}_n| > A} (|x_n - \beta \hat{d}_n| - A)^2 \quad (12)$$

为了获得最优函数 $\min_{\beta} P$, 最优值 β 表示为

$$\beta^{(opt)} = \frac{\sum_{|\hat{x}_n| > A} ||x_n| - A|}{\sum_{|\hat{x}_n| > A} \hat{d}_n} \quad (13)$$

3.3 优化后的 TR 算法

本文提出的降低 MIMO-OFDM 系统 PAPR 的深度限幅优化的 TR 算法如图 4 所示:

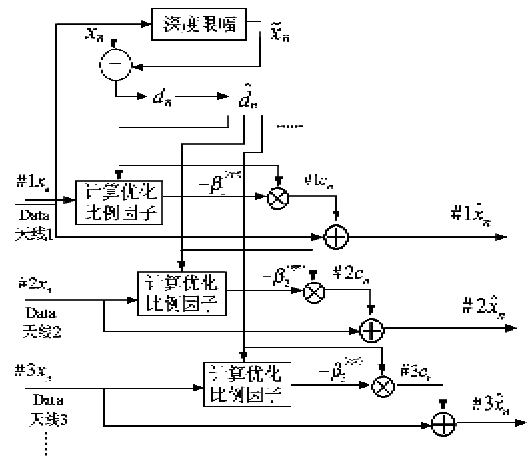


图4 优化的 TR 算法框图

算法实现过程如下:

(1) 设定 A 和最大迭代数 L 。

(2) 滤波 x_n 到 A 得到滤波噪声 d_n , 经过深度限幅后, 滤波噪声可以表示为 $d_n = x_n - \hat{x}_n$ 。

(3) 在 TR 算法的限制下, 滤掉 d_n 的同时得到峰值消减信号 c_n :

(a) 转变 d_n 到频域信号, 得到 $D_k = DFT\{d\}$, 其中 $d = [d_0, \dots, d_{JN-1}]$;

(b) 由 $D_k (k \in R)$ 得到滤波噪声 $\hat{D}$, 设置 D_k 其他值为 0;

(c) 转换 $\hat{D}$ 为时域信号, 得到 $\hat{d}_n = IDFT(\hat{D})$;

(d) 用公式(13)得到 $\beta^{(opt)}$;

(e) 峰值消减信号表示为 $c_n = -\beta^{(opt)} \hat{d}_n$ 。

(4) 计算出 OFDM 信号 $\hat{x}_n = x_n + c_n$ 的 PAPR 值, 如果 $PARR > A$, 并且迭代数目少于 L , 继续第(3)步, 其它情况, 传输 $\hat{x}_n$ 并结束算法。

3.4 算法复杂度分析

将本文提出的 TR 算法和传统的 TR 算法相对比来分析该算法的复杂度。迭代滤波算法是传统 TR 算法的代表, 图 5 为迭代算法的实现框图, 通常需要多次迭代后才能达到好的性能。迭代次数越多, TR 算法的性能越好, 而另一方面, TR 算法的迭代特性也增加了计算量^[16]。因此该算法的计算量主要取决于 IFFT/FFT 的次数。假设 TR 算法需要 K 次迭代来达到本文提出的算法相同的 PAPR 性能, 那么迭代算法中 K 对 IFFT/FFT 就决定了传统 TR 算法具有的高计算量。

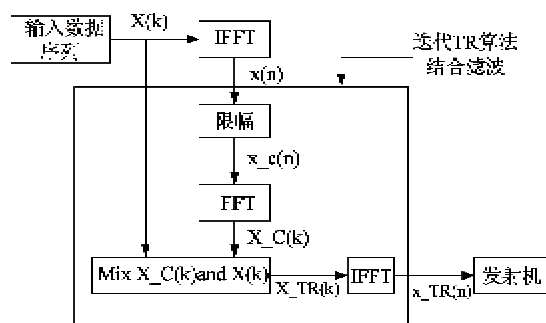


图 5 迭代滤波 TR 算法实现框图

然而, 本文算法在一个天线中利用深度限幅产生补充信号, 只需要一对 IFFT/FFT。由于 IFFT/FFT 是系统计算复杂度的重要组成部分, 所以优化算法不仅避免了多次 IFFT/FFT, 另外自适应的 TR 算法在计算不同天线的补充信号参数时也避免了在每个天线都重复执行相同运算的过程, 这样就明显

降低了系统的计算复杂度。

4 仿真结果分析

为了比较传统算法和本文算法抑制 PAPR 的性能, 在仿真时设置参数如下: 系统含有 512 个子载波, 使用 16QAM 调制, 4 倍过采样, 10000 OFDM 符号。具体的仿真参数如表 1 所示, 发射天线个数分别为 2 和 6, 接收天线的个数也相应为 2 和 6, 预留子载波个数分别为 20、40。通过仿真得到的传统 TR 算法与文中提出的深度限幅改进 TR 算法的互补累计分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF) 曲线对比如图 6 - 图 9 所示。

表 1 仿真参数设置

子载波数目 N	512
调制方式	16-QAM
过采样因数	$L = 4$
发送天线数目 M_t	2, 6
接收天线数目 M_r	2, 6
预留子载波	20/40

假设发送天线和接收天线的个数都为 2, 预留子载波个数分别为 20、40, 通过仿真将单独的深度限幅算法、传统 TR 算法和优化的 TR 算法的性能进行对比如图 6 所示。从图 6 可以看出, 预留子载波个数为 20 的优化 TR 算法相对于原信号的 PAPR 降低了约 2.8dB, 而单独的深度限幅算法相对于原信号降低了 1.9dB, 传统的 TR 算法仅降低了 1.3dB。另一方面, 算法对应的误码率比较如图 7 所示, 可以

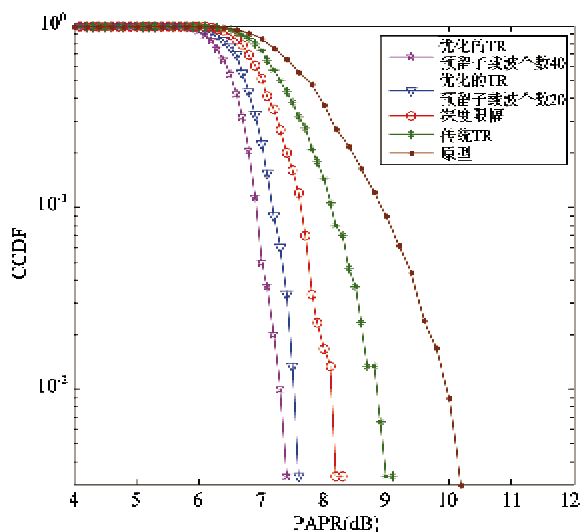
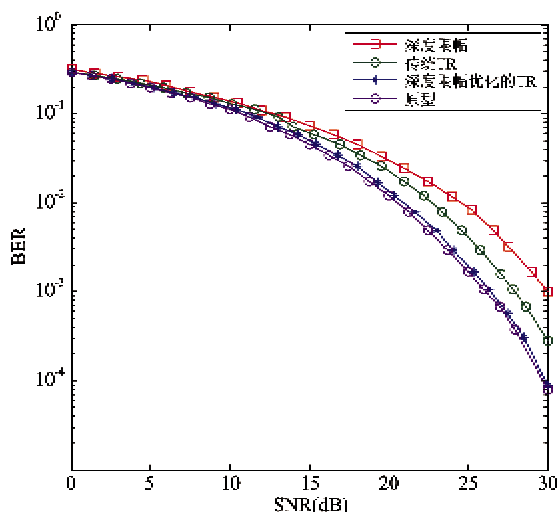
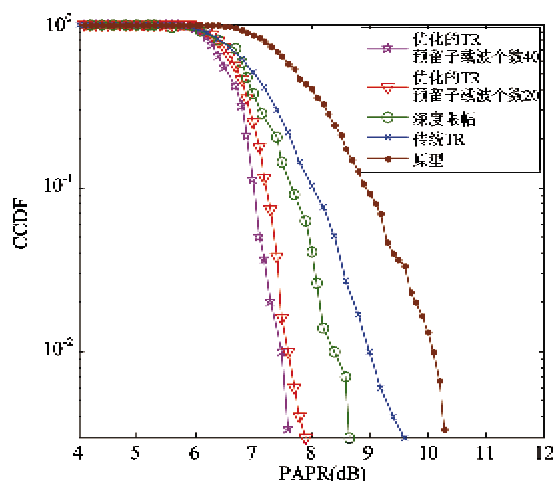
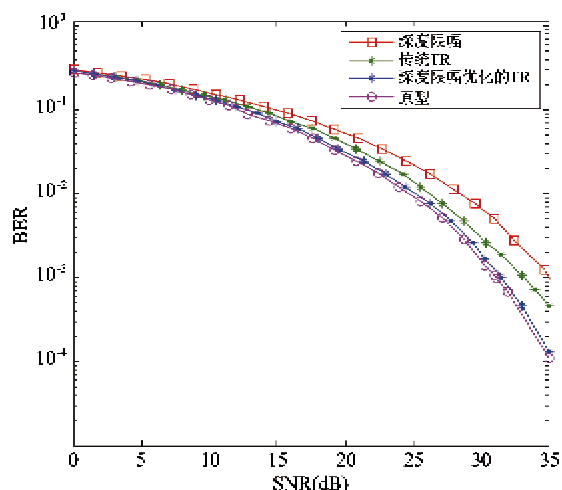


图 6 $M_t = M_r = 2$ 时, 采用不同算法时的 PAPR 比较

图7 $M_t = M_r = 2$ 时,采用不同算法时的 BER 性能比较

看出,在相同的信噪比(SNR)条件下,优化 TR 算法和传统的 TR 算法的 BER 性能相似,同原始 OFDM 系统的误码率相比稍差一些,在 BER 为 10^{-4} 时有 0.2dB 的性能损失,但相对于 2.8dB 的 PAPR 性能改善来说,BER 性能的轻微降低是可以接受的。而相同情况下单独的深度限幅算法在 BER 为 10^{-4} 时则有 3dB 的性能损失。

增加发送天线和接收天线个数为 6,仿真结果如图 8,相对于原信号的 PAPR,传统 TR 算法降低了 1.2dB,单独的深度限幅算法降低了 2dB,而优化的 TR 算法则降低了 2.9dB。同样地,算法对应的误码率如图 9 所示,当天线数目增加到 6 时,在相同的信噪比条件下,相对于深度限幅算法,优化 TR 算法和传统的 TR 算法的 BER 性能相似,同原始 OFDM 系统的误码率相比略差一些,但相对于 2.9dB 的 PAPR 改善来说,BER 性能的轻微降低是可以接受的。

图8 $M_t = M_r = 6$ 时,采用不同算法时的 PAPR 比较图9 $M_t = M_r = 6$ 时,采用不同算法时的 BER 性能比较

以上仿真分析的是预留载波数为 20 的情况,如果预留载波数是 40,可以预测降低 PAPR 的效果会更好,图 6 和图 8 都显示了使用 40 个子载波时的情况。但从图 6 和图 8 中预留子载波为 20 和 40 的对比可以看出,当预留载波数提高一倍到 40 时,尽管性能有所提高,但提高的效果不是很明显,所以建议预留子载波采用 20 个即可。

为了说明本文提出的 TR 算法的复杂度,下面将优化的 TR 算法和传统的迭代滤波算法相对比。图 10 给出了传统 TR 算法性能随迭代次数的 CCDF 变化曲线,仿真中迭代次数分别为 1 到 5,预留子载波数为 20 个,发送天线和接收天线 $M_t = M_r = 2$ 。由图可见,迭代次数越大,降低 PAPR 的效果越好,同图 6 对比可知,当迭代次数为 5 时,可以使 PAPR 降低约 2.8dB,与本文提出的 TR 算法效果相同。

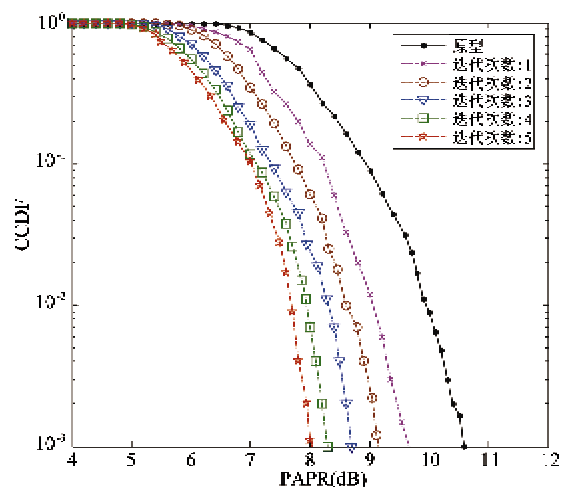


图10 迭代滤波 TR 算法的 CCDF 变化曲线

虽然迭代次数越多,TR 算法的性能越好,但是

另一方面,由于该算法的计算量主要取决于 IFFT/FFT 的次数,所以 TR 算法的迭代特性也增加了计算量。由图 6 和图 10 的仿真结果可以看出,迭代 TR 算法需要 5 次迭代来达到本文提出的优化 TR 算法的相同 PAPR 性能,这样迭代算法中 IFFT/FFT 的次数毫无疑问决定了传统 TR 算法具有高的计算量。而本文提出的优化后的 TR 算法由于利用深度限幅直接产生补充信号,只需用一对 IFFT/FFT,因此该算法具有较低的计算复杂度。

本文提出的降低 PAPR 的算法主要考虑了对系统误码率和算法复杂度两个方面的影响,从图 4 可以看出,该算法为了达到较好地抑制 PAPR 的效果,在发送端通过深度限幅和预留子载波算法进行了处理,由于预留子载波算法中发送端的部分功率是用来传输预留子载波,所以需要增大发送端的发送功率来保证算法的性能。而为了达到等效的发送效果,发送端的功率必须大于原始信号所需要的功率,因此毫无疑问增加了原来信号发送端所需要发送的功率。

另一方面本文提出的算法在降低系统 PAPR 时,为了避免严重失真导致信道的误码率增加,通常的代价就是损失其信道容量。理论上多天线系统在不增加频谱资源的情况下,可以成倍地提高信道容量,随着天线数目的增加可以获得较大的信道容量,但是降低系统 PAPR 的算法,实际情况却是为了避免出现较高的误码率而损失了信道容量,并且系统的具体实现还要受到物理信道本身的限制。

5 结 论

本文提出的深度限幅优化的预留子载波降低 MIMO-OFDM 系统 PAPR 的算法,利用自适应 TR 算法计算出 MIMO 系统每个天线上的补充信号参数,并且引入深度限幅滤波产生的消减信号能够有效提高 TR 算法的性能。

该算法由于滤波噪声信号被限制在预留子载波中,所以对系统误码率(BER)的影响很小。另外,自适应的 TR 算法的利用直接计算出其它天线的补充信号,这样也避免了每个天线重复执行相同运算的过程,降低了系统的计算复杂度。从理论分析和仿真结果可知,将该优化的 TR 算法用于多天线的 MIMO-OFDM 系统,达到了计算复杂度、PAPR 改善与 BER 性能三者的折中。该算法可以在不损失误码率性能的前提下降低 PAPR,不仅能达到改善系

统 PAPR 性能的目的,还大大降低了系统复杂度,因此该算法具有较大的实用价值。

参考文献

- [1] 王文博,郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术. 第 2 版. 北京:人民邮电出版社,2007.1-251
- [2] 周恩,张兴. 下一代宽带无线通信 OFDM 与 MIMO 技术. 北京:人民邮电出版社,2008.1-177
- [3] Braz I, Guan L, Zhu A D, et al. Peak-to-average power ratio reduction of SFBC MIMO-OFDM signals using unused tones. In: IEEE International Microwave Workshop Series on RF Front-ends for Software Defined and Cognitive Radio Solutions (IMWS), Aveiro, Portugal, 2010. 1-4
- [4] Suyama S, Adachi H, Suzuki H, et al. PAPR reduction methods for eigenmode MIMO-OFDM transmission. In: Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2009), Barcelona, Spain, 2009.1-5
- [5] Iwasaki M, Higuchi K. Clipping and filtering-based PAPR reduction method for precoded OFDM-MIMO signals. In: Proceedings of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2010), Taipei, China, 2010.1-5
- [6] Jiang T, Wu Y. An overview: peak-to-average power ratio of OFDM signals. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2008, 54(2): 257-268
- [7] Wang L, Tellambura C. A simplified clipping and filtering technique for PAR reduction in OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(6):453-456
- [8] Kimura S, Nakamura T, Saito M, et al. PAR Reduction for OFDM signal based on deep clipping. In: Proceedings of the 3rd international Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP2008), St Julian's, Malta, 2008. 911-916
- [9] Wang L, Tellambura C. Analysis of clipping noise and tone reservation algorithms for peak reduction in OFDM system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1675-1694
- [10] Suppittux S, Tangkachavana S, Vinichhayakul T, et al. Enhancing PAPR reduction for tone reservation algorithms by deep clipping. In: 2010 the 7th International Conference on Electronics Computer Telecommunications and Information Technology, Chiang Mai, Thailand, 2010. 415-419
- [11] Yung L L, Young H Y, Won G J. Peak-to-average power ratio in MIMO-OFDM systems using selective mapping. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(12):575-577
- [12] Saeedi H, Sharif M, Marvasti F. Clipping noise cancella-

- tion in FDM systems using oversampled signal reconstruction. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(2): 73-75
- [13] Wang L, Tellambura C. A simplified clipping and filtering technique for PAR reduction in OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(6): 453-456
- [14] Maruyama T, Maruta K, Mashino J, et al. Control information transmission without resource consumption for PAPR reduction of OFDM signal. *Electronics Letters*, 2009, 45(8): 406-408
- [15] Jones B K. An active-set approach for OFDM PAR reduction via tone reservation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(2): 495-509
- [16] He X F, Jiang T, Zhu G X. A novel simplified tone reservation combined with cross antenna rotation and inversion to reduce PAPR for MIMO-OFDM system. *Wireless Communication and Mobile Computing*, 2010, 11(10): 1406-1414

Deep clipping introduced optimization of a PAPR reduction algorithm for MIMO-OFDM systems

Jiang Yang, Yuan Min, Han Feifei, Lang Baocai

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract

The deep clipping technique and a tone reservation (TR) algorithm with the good performance for reduction of high peak-to-average power ratio (PAPR) of multiple-input multiple-output (MIMO)-orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems were modified and optimized, and an improved TR algorithm was proposed to solve the high PAPR problem of MIMO-OFDM systems, and it was applied to the research on MIMO-OFDM systems' PAPR reduction. This algorithm generates a peak cancellation signal by using deep clipping at only one of the transmit antennas, which is then applied to other transmitters in MIMO systems. The system simulation and the theoretical analysis shows that the proposed algorithm can reduce systems' PAPR efficiently with the low calculation complexity and the low bit-error-ratio (BER).

Key words: multiple-input multiple-output (MIMO), orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), peak-to-average power ratio (PAPR), tone reservation (TR), deep clipping