

文章编号:1674-2974(2016)02-0124-06

一种改进的喷泉多选择序列峰均比降低算法^{*}

朱文杰¹, 易本顺^{1,2†}

(1. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079)

摘要:针对非连续正交频分复用(NC_OFDM)系统具有边带功率(Sidelobe power)大及峰均比(PAPR)高等问题,提出一种基于喷泉编码(Fountain code)的改进算法,同时考虑认知无线电环境下 NC_OFDM 系统旁瓣干扰及峰均联合优化.采用喷泉多选择序列算法,通过喷泉编码及序列映射的思想,降低边带功率及系统 PAPR.仿真表明,喷泉编码改进算法能有效减少 NC_OFDM 系统中感知用户对于授权用户(licensed user)的干扰,通过喷泉编码设定目标 PAPR 将 NC_OFDM 系统 PAPR 控制在合理范围内,从而有效解决 NC_OFDM 信号放大失真问题,提升系统整体误比特率性能.

关键词:正交频分复用;认知无线电;边带功率;喷泉多选择序列;峰均比;误比特率

中图分类号:TN92

文献标识码:A

An Improved Fountain Multi-choice Sequence Algorithm for Peak-to-Average Power Ratio Reduction

ZHU Wen-jie¹, YI Ben-shun^{1,2†}

(1. School of Electronic Information, Wuhan Univ, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: Non-continuous orthogonal frequency division multiplexing (NC_OFDM) has large sidelobe power and high peak-to-average power ratio (PAPR). In this paper, an improved algorithm with Fountain coding was proposed, in which the sidelobe interference in NC-OFDM system and high peak to average ratio were both taken into consideration in the joint optimization algorithm under the circumstance of cognitive radio system. Fountain multi-choice sequence algorithm, by the ideal of Fountain coding and sequence mapping, was adopted for sidelobe suppression and PAPR reduction. The simulation results show that the improved algorithm can significantly reduce the band interference to licensed user (LUs) and make the system PAPR less than target PAPR, so as to solve the problem of NC_OFDM signal distortion caused by power amplifier and eventually enhance the performance of the bit error rate effectively.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; cognitive radio; sidelobe power; fountain multi-choice sequence; PAPR; bit error rate

基于频谱池思想的非连续正交频分复用技术 (Non-Contiguous OFDM, NC_OFDM) 把分散于

* 收稿日期:2014-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371125), National Natural Science Foundation of China(61371125)

作者简介:朱文杰(1984-),男,湖北武汉人,武汉大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: yibs@whu.edu.cn

多个子载波的用户频带资源集中管理,按照通信需求进行分配,次用户可以使用主用户未使用的频带进行数据传输^[1].非连续正交频分复用以动态方式分配频带资源,实现感知用户(Cognitive User, CUs)和授权用户(Licensed User, LUs)之间的频谱共享,有效地适应动态变化的频谱环境,因此它非常适合作为认知无线电(Cognitive Radio, CR)环境下的数据传输体制^[2-5].然而 NC_OFDM 系统由于 CUs 与 LUs 处于相同频谱池中,NC_OFDM 系统中 CUs 对 LUs 的干扰来源于各物理位置分离的子载波的带外辐射^[6],所以为了避免对 LUs 的干扰,非连续正交频分复用不仅要减小带外辐射,还要控制 OFDM 频带内子载波带外辐射(In Band out of Subband radiation, IBOSBR)^[7].在控制频带内子载波带外辐射时,由于已有的子载波带外辐射抑制算法对于整个频带进行相同的处理,所以不适用.同 OFDM 系统一样,在 NC_OFDM 系统中,当有相同或者相近相位的信号叠加时就会产生非常大的峰均比(peak-to-average power ratio, PAPR).

到目前为止,前人已经提出很多降低 PAPR 的算法,比如限幅、峰值抵消、交织、PTS 和 SLM 等算法^[8-10],这些算法未考虑认知用户对于授权用户的干扰,不适用于认知无线电环境.

本文提出的改进算法同时考虑认知无线电环境下 NC_OFDM 系统旁瓣干扰及峰均比过高问题,通过喷泉编码及喷泉序列映射算法优化思想整体提升系统性能.

1 NC_OFDM 系统模型及 PAPR 定义

NC_OFDM 作为 CR 主要的数据传输方案,是基于 OFDM 频谱池技术,即感知用户 CUs 使用授权用户 LUs 空闲的频谱资源,通过外界频谱信息来分配子载波,在可用频带的子载波上分配调制数据,形成 NC_OFDM 的发射机部分.假设 NC_OFDM 系统总的子载波数目为 N ,可用子载波数目为 N' ($N' \leq N$), $X_k = [X_0, X_2, X_3, \dots, X_{N-1}]^T$ 表示待传输的频域符号, $[\cdot]^T$ 为符号转置,通过动态频谱感知和信道估计技术,NC_OFDM 发射机激活授权用户占用频带之外的子载波用来传输数据 X_k .则 NC_OFDM 系统时域基带符号 $x(t)$ 可以表达为:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp j(2\pi kt/T), t \in [0, T]. \quad (1)$$

式中: N 为子载波总数, $1/\sqrt{N}$ 为功率归一化因子;

T 是未包含符号前缀 CP 的 NC_OFDM 符号周期; X_k 为频域数据符号.实际应用中采用逆离散傅里叶变换 IFFT 计算 $x(n)$:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp j(2\pi kt/JN), n \in [0, 1, 2, \dots, JN - 1]. \quad (2)$$

根据傅立叶变换抽样性可知,在逆傅立叶变换之后的非连续正交频分复用信号可能漏掉峰值点,根据式(2)可知,这种情况不能准确计算出信号峰均比值.为了更加准确地估计信号的峰均比值,可以采用过采样的方法减少漏掉信号峰值的概率,从文献[11]可知,当过采样因子为 4 时,漏掉峰值点的概率就会很低,经过逆傅立叶变换后的信号可以得到非常准确的峰均比值, J 即为式(2)中过采样因子.

此时 NC_OFDM 信号峰均比 PAPR 的数学定义式为:

$$\text{PAPR} = \frac{\text{Power}_{\text{peak}}}{\text{Power}_{\text{average}}} = 10 \log_{10} \frac{\max\{|x(n)|^2\}}{E\{|x(n)|^2\}}. \quad (3)$$

2 传统的喷泉编码降低 PAPR 算法

当 OFDM 的子载波数足够大时,其数据符号 $x(n)$ 的实部和虚部均服从高斯分布,根据中心极限定理可知, $x(n)$ 的功率谱服从自由度为 2 的中心 χ^2 分布,其概率密度函数为 $P_{\text{power}}(y) = e^{-y}$.设正交频分复用的子载波数为 N ,则其峰均比的概率密度分布为:

$$P\{\text{PAPR} > z\} = 1 - (1 - e^{-z})^N. \quad (4)$$

式(4)就是表征信号峰均比分布的互补累计分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF),它表明信号峰均比超过某一门限的概率.

例如当 N 为 512 并且目标 PAPR 门限值 PAPR_0 取 8.0 dB 时,通过式(4)可以算出一个 OFDM 符号的 PAPR 值超过目标门限值 PAPR_0 的概率为 $P=0.61$,连续两个 OFDM 符号的 PAPR 值超过目标门限值 PAPR_0 的概率为 P^2 ,依次类推连续 n 个 OFDM 符号的 PAPR 值超过目标门限值 PAPR_0 的概率为 P^n ,由此看出连续多个 OFDM 符号 PAPR 值超过目标门限 PAPR_0 的概率非常低,趋近于 0.

根据以上分析,传统喷泉编码降低 OFDM 中峰均比的算法^[10]思想就是在发送端利用喷泉码对 OFDM 符号进行编码,然后对每个 OFDM 符号的 PAPR 值进行检测,若 PAPR 值小于目标门限值 PAPR_0 ,则发送此 OFDM 符号,否则丢弃此 OFDM

符号;利用喷泉码作为一种无码率编码特点,在发送端源源不断地发送 OFDM 符号,接收端只要接收到足够数量的 OFDM 符号后便能完整地恢复出发端数据包.可以看出该算法的主要思路是接收端选择性地接收小于目标门限值 PAPR₀ 的 OFDM 符号从而达到降低峰均比的目的.

3 改进的喷泉编码算法

传统喷泉编码算法未考虑 NC_OFDM 系统中感知用户 CUs 子载波干扰,不适用于认知无线电环境.本文提出的改进喷泉算法考虑 NC_OFDM 中感知用户 CUs 子载波旁瓣功率辐射对于授权用户 LUs 频带范围内功率辐射的影响(如图 1 所示),尽量将这种干扰控制在一定范围内,在此基础上,利用喷泉编码接收端只需要收到略多于原始数据分组的发送端数据就可以成功恢复原始数据性质,将喷泉码用于认知无线电环境中 NC_OFDM 应用层数据包编码,降低 NC_OFDM 系统的 PAPR.

3.1 喷泉多选择序列算法

结合喷泉算法降低 PAPR 的优点,本文构造喷泉多选择序列算法来降低 NC_OFDM 中感知用户 CUs 子载波的旁瓣干扰.其基本思想是在发射端将经过喷泉编码的数据序列变换成为多组数据序列,分别计算各组数据序列的旁瓣功率,不同的数据序列有不同的旁瓣功率,然后选择其中旁瓣功率最低的序列进行传输以达到降低子载波旁瓣干扰的目的.

喷泉多选择序列将经过喷泉编码的 OFDM 符号序列 $X = [X_0, X_2, X_3, \dots, X_{N-1}]^T$ 映射成 P 个序列集 $X^{(p)} = [X_0^{(p)}, X_2^{(p)}, X_3^{(p)}, \dots, X_{N-1}^{(p)}]^T, p = 1, 2,$

$3, \dots, P$, 计算每个序列 $X^{(p)}, p = 1, 2, 3, \dots, P$ 在指定待计算频谱范围内的平均旁瓣功率 $A^{(p)}$:

$$A^{(p)} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \left| \sum_{n=0}^{N-1} X_n^{(p)} S_n(y_k - x_n) \right|^2, \quad p = 1, 2, 3, \dots, P. \quad (5)$$

式中: $S_n(f)$ 为第 n 个子载波的频谱; x_n 是归一化子载波频率; y_k 是指定待计算平均旁瓣功率频率范围内的归一化频率. $S_n(f)$ 是由所用的传输窗函数决定的,若使用矩形窗,则 $S_n(f)$ 为:

$$S_n(f) = \frac{\sin(\pi f)}{\pi f}. \quad (6)$$

将具有最大旁瓣抑制的序列索引 p' 定义为: $p' = \arg \min_{1 \leq p \leq P} A^{(p)}, p = 1, 2, 3, \dots, P.$ (7)

$X^{(p')}$ 即为通过喷泉多选择序列算法的输出序列, p' 要通过比特编码,发送到接收端.

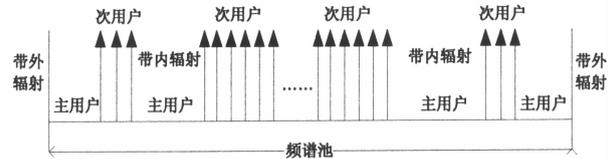


图 1 NC_OFDM 中的带内子带外辐射 IBOSBR
Fig. 1 IBOSBR in NC-OFDM spectrum pool

3.2 改进的喷泉算法步骤

改进的喷泉算法结合传统喷泉算法优点,考虑认知无线电环境下 NC_OFDM 系统感知用户 CUs 子载波带内干扰及峰均比过高问题,在这两个指标上面进行联合优化,完整流程如图 2 所示.图 2 中发射机部分使用固态功率放大器(solid state power amplifier, SSPA)作为 NC_OFDM 前端信号放大器,其 AM/AM 放大器的数学模型为:

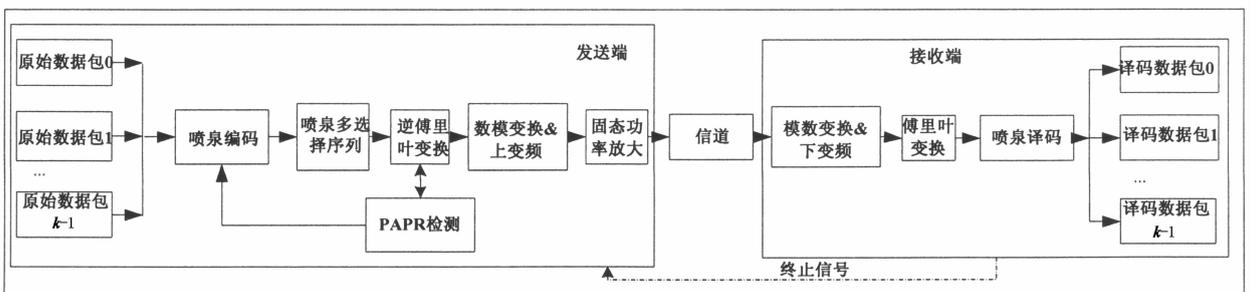


图 2 改进的喷泉算法流程图
Fig. 2 Flow chart of improved fountain algorithm

$$x'(t) = \frac{hx(t)}{\left[1 + \left(\frac{hx(t)}{x_{SAT}}\right)^{2r}\right]^{1/2r}}. \quad (8)$$

式中: $x'(t)$ 为放大后的 NC_OFDM 信号; x_{SAT} 为

输入饱和点;放大饱和功率 P_{SAT} 定义为 $P_{SAT} = x_{SAT}$;参数 r 控制输出信号的平滑度; h 为放大器信号增益;SSPA 放大器功率回退 (Input Back Off,

IBO)系数与放大器饱和功率 P_{SAT} 的关系定义为:

$$\text{IBO}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{SAT}}}{E[|x(t)|^2]} \quad (9)$$

改进算法具体步骤为:

1)对待发送的数据包进行喷泉编码:数据包喷泉编码过程如图 3 所示,将待发送数据以 IFFT 长度 N 进行分组成为 k 个数据包,每个数据包长度为 N ,设分组之后的数据包为: $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{N-1})$, $(b_0, b_1, b_2, \dots, b_{N-1})$, $(c_0, c_1, c_2, \dots, c_{N-1})$, \dots , $(k_0, k_1, k_2, \dots, k_{N-1})$;对原始数据包进行重新交织分组为 $(a_0, b_0, c_0, \dots, k_0)$, $(a_1, b_1, c_1, \dots, k_1)$, $(a_2, b_2, c_2, \dots, k_2)$, \dots , $(a_{N-1}, b_{N-1}, c_{N-1}, \dots, k_{N-1})$. 将新交织分组进行喷泉编码得到 $(X_0^1, X_0^2, \dots, X_0^k)$, $(X_1^1, X_1^2, \dots, X_1^k)$, \dots , $(X_{N-1}^1, X_{N-1}^2, \dots, X_{N-1}^k)$ \dots , 然后取每个数据包一个编码后的数据共 N 个组成一个新的数据包进行相应数据处理,可以得到无限长喷泉编码数据包为: $(X_0^1, X_1^1, X_2^1, \dots, X_{N-1}^1)$, $(X_0^2, X_1^2, X_2^2, \dots, X_{N-1}^2)$, \dots , $(X_0^k, X_1^k, X_2^k, \dots, X_{N-1}^k)$ \dots

2)将经过喷泉编码后的数据 X_n^m ($1 \leq m \leq k$) 进行相位旋转,原始数据序列经过相位旋转后产生 P 个不同的旋转待选集序列:

$$X_n^p = X_n^m e^{j\theta_n^p}, \theta_n^p \in [0, \pi],$$

$$p = 1, 2, 3, \dots, P, 1 \leq m \leq k. \quad (10)$$

3)计算一个 NC_OFDM 符号中感知用户 CUs 对于授权用户 LUs 频带范围内的边带功率辐射平

均值:

$$A^{(p)} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \left| \sum_{n=0}^{N-1} X_n^{(p)} S_n(y_k - x_n) \right|^2,$$

$$p = 1, 2, 3, \dots, P. \quad (11)$$

4)对于计算后的边带功率辐射平均值 $A^{(p)}$ 进行排序,假设 $\text{rank}(p)$, $p = 1, 2, 3, \dots, P$ 为边带功率大小排序索引,则有:

$$A^{\text{rank}(1)} \leq A^{\text{rank}(2)} \leq A^{\text{rank}(3)} \leq \dots \leq A^{\text{rank}(P)}. \quad (12)$$

5)从 P 个待选集中选取 P' ($P' \leq P$) 个边带功率最小的集合 $X_n^{(1)}, X_n^{(2)}, \dots, X_n^{(P')}$.

6)对于选出的 P' 个序列 $X_n^{(1)}, X_n^{(2)}, \dots, X_n^{(P')}$ 进行 IFFT 计算:

$$x_n^{\text{rank}(p)} = \text{IFFT}(X_n^{\text{rank}(p)}). \quad (13)$$

7)从 $x_n^{\text{rank}(p)}$ 中选取 PAPR 最小的一个 c' :

$$c' = \arg \min_{1 \leq p \leq P'} \text{PAPR}[x_n^{\text{rank}(p)}]. \quad (14)$$

若 c' 序列所计算得出的 PAPR 小于等于系统设定的目标峰均比值 PAPR_0 , 则发送数据符号, 否则丢弃此符号, 返回第 1)步重新执行;

8)若接收端收到足够多的数据包使用喷泉解码能够恢复发送端的原始数据包, 则接收端会给发送端一个终止信号, 此时发送端停止发送原始数据包; 否则, 发送端一直不停地发送原始数据包.

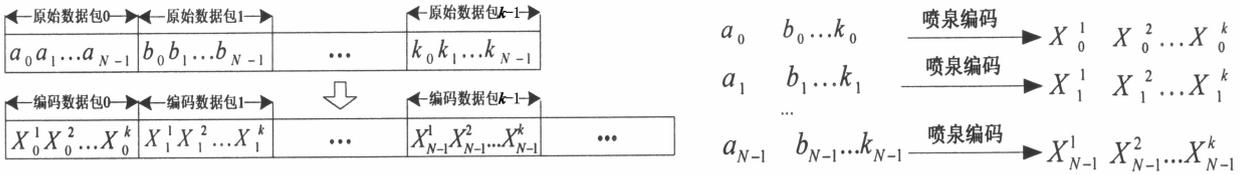


图 3 原始数据喷泉码编码过程

Fig. 3 Fountain coded processing of original data packet

4 仿真结果与分析

文中提出的改进算法使用 Matlab 仿真分析, 设定 NC_OFDM 总子载波数 $N = 512$, 授权用户 LUs 占用 64 子载波, 其所占用子载波的具体序号为:

$$X_{-31}, X_{-30}, \dots, X_{-1}, X_0, X_1, \dots, X_{28}, X_{29}, X_{30},$$

X_{31}, X_{32} , 感知用户 CUs 占用余下子载波进行数据传输; 喷泉码度分布参见文献[12], 其他仿真参数见表 1.

图 4 给出了使用改进算法与传统算法两种情况下, NC_OFDM 信号中感知用户边带功率分布的

CCDF 图, 仿真说明改进算法 90% 概率情况下使边带功率小于 -20 dB, 相对于传统算法平均边带功率减少 4~6 dB.

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	值	参数	值
总子载波数 N	512	旋转待选集 P 值	16
LUs 子载波数	64	最小功率集合 P'	8
CUs 子载波数	448	SSPA 参数 r	8
调制方式	QPSK	SSPA 参数 IBO	1, 3, 5

图 5 给出了不同功率回退值 IBO 所对应的 NC

NC_OFDM 系统边带辐射功率图, 仿真说明当 IBO 值较小(例如 IBO=1)时, 由于 IBO 较小导致 NC_OFDM 系统的 SSPA 饱和点较小, 所以 NC_OFDM 系统数据进入非线性区域放大失真导致带外辐射较大. 从图中可以看出当 IBO 逐渐从 1 增大至 5 时, NC_OFDM 系统带外辐射从 -52 dB 左右减小到 -68 dB 左右. 同时 NC_OFDM 系统频带内感知用户 CUs 对于授权用户 LUs 辐射功率也随着 IBO 值增大而减小, 从图中可以看出当 IBO 逐渐从 1 增大至 5 时, NC_OFDM 系统感知用户 CUs 对 LUs 带内辐射从 -46 dB 左右减小到 -61 dB 左右.

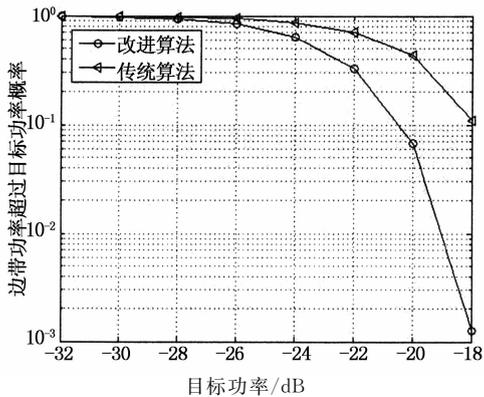


图 4 感知用户子载波平均边带功率

Fig. 4 Sidelobe power of CUs Subband radiation

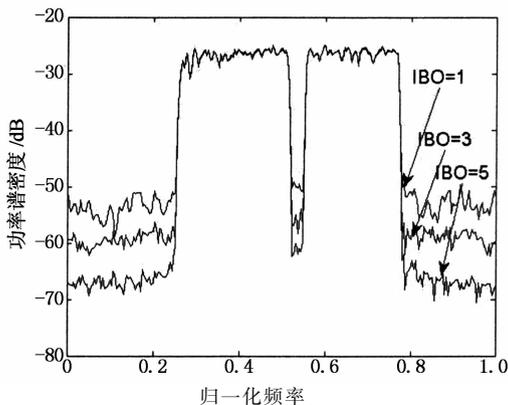


图 5 不同 IBO 值对应的 NC_OFDM 系统边带辐射

Fig. 5 Sidelobe power radiation of different IBO in NC_OFDM

图 6 给出了使用改进算法及传统算法两种情况下, 授权用户 LUs 频带范围内受到感知用户 CUs 干扰图. 仿真说明, 改进算法能降低感知用户 CUs 对于授权用户 LUs 频带干扰影响, 改进算法使 NC_OFDM 系统在授权用户 LUs 频带范围内的功率辐射降低 12 dB 左右.

图 7 给出了改进算法与文献[9]中经典 SLM 算法及原始信号 PAPR 仿真图. 仿真将目标 PAPR₀ 值设置为 7.5, 从图中可以看出由于改进算法目标值设置为

7.5 时, 相比 SLM 算法有 0.5 dB 的性能改进, 相对于原始 NC_OFDM 信号有 2.5 dB 性能改进.

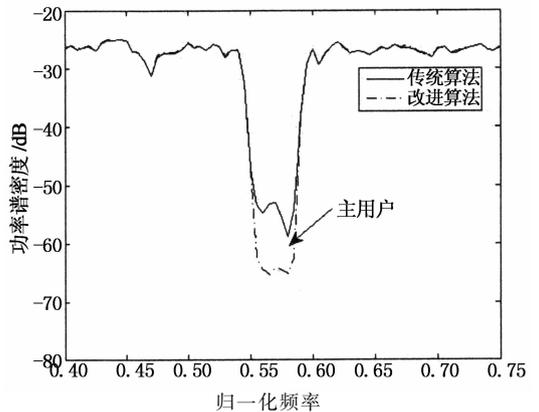


图 6 改进算法降低主用户频带功率辐射

Fig. 6 Reduction of sidelobe power radiation in LUs band in improved algorithm

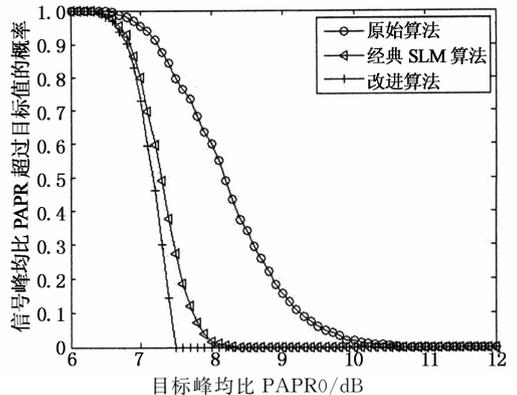


图 7 改进算法与 SLM 算法降低 PAPR 对比图

Fig. 7 Comparison of PAPR reduction in improved algorithm and SLM

图 8 给出了改进算法在不同目标 PAPR₀ 值情况下系统的峰均比 CCDF 图. 可以看出改进算法可使系统 PAPR 低于设定的可达目标值, 根据不同的 SSPA 放大器选择合适的目标 PAPR₀ 值可有效解决 NC_OFDM 信号放大失真问题. NC_OFDM 系统目标 PAPR₀ 值越小导致改进算法中发送机部分 PAPR 门限检测时丢弃的 NC_OFDM 符号越多, 发送机需要重新发送的符号越多, 计算复杂度越高.

图 9 给出了改进算法在 AWGN 信道环境下系统误比特率(Bit error rate, BER)性能仿真曲线. 改进算法在 SNR 为 18 dB 左右误比特率为 1×10^{-5} , 相对于未采用峰均比降低算法的传统 NC_OFDM 系统有 1~1.5 dB 的性能改进, 此时系统 IBO=5; 相对于未使用 PAPR 降低算法 NC_OFDM 系统有 1.5~2 dB 的性能改进, 设定此系统 SSPA 放大器的 IBO=3.

从图 9 可以看出, IBO=5 时 NC_OFDM 系统

的误码率性能优于 $IBO = 3$ 时误码率性能。因为 IBO 越小,SSPA 放大器的饱和点值就越低,如不采用 PAPR 降低算法,将导致 NC_OFDM 系统可能产生严重的放大失真导致系统性能下降, IBO 值越小,放大失真导致性能下降越严重。

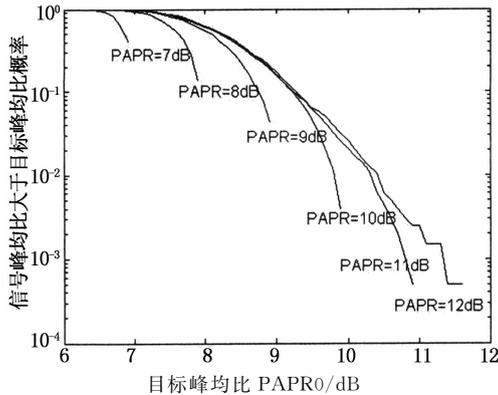


图 8 改进算法对应于不同的目标 PAPR₀ 门限时 CCDF

Fig. 8 The CCDF of different target PAPR₀ in improved algorithm

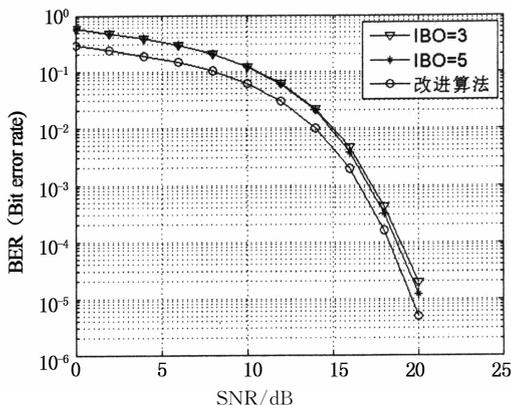


图 9 改进算法在 AWGN 信道中比特误码率性能

Fig. 9 The performance of BER with improved algorithm in AWGN

5 结论

本文改进算法在采用喷泉码编码控制系统 PAPR 同时,结合喷泉多序列边带抑制算法减少 NC_OFDM 系统中感知用户 CUs 对授权用户 LUs 干扰影响,在授权用户 LUs 频带干扰功率抑制及系统 PAPR 性能方面进行联合优化。仿真表明,相对于原始 NC_OFDM 系统,改进算法能够大幅减少感知用户 CUs 对于授权用户 LUs 频带干扰,使系统 PAPR 达到所设定目标可行值,从而有效解决 NC_OFDM 信号通过 SSPA 放大器造成失真问题,整体提升 NC_OFDM 系统误比特率性能。然而在本改进算法中,目标峰均比 PAPR₀ 设定越低,因不满足峰

均比值而被丢弃的 OFDM 符号越多,发送机需要重新发送的符号越多,算法复杂度越高。进一步研究不随目标峰均比改变的低复杂度算法是本文算法以后改进的方向。

参考文献

- [1] ZHU Chun-hua, YANG Shou-yi. The interference constrained pilot design for NC-OFDM systems in cognitive radios[C]// Proceedings of 2014 IEEE 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. New York: IEEE, 2012: 1-4.
- [2] 胡志刚, 汤海冰. 认知无线电系统的最优帧长设计[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(1): 98-102.
HU Zhi-gang, TANG Hai-bing. Optimal frame duration for cognitive radio system[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(1): 98-102. (In Chinese)
- [3] 申滨, 王舒, 黄琼. 认知无线电最优用户选择协作频谱感知[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(2): 32-37.
SHEN Bin, WANG Shu, HUANG Qiong. Optimal user selection algorithm based cooperative spectrum sensing for cognitive radio[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(2): 32-37. (In Chinese)
- [4] LIN You-en, LIU Kun-hsing, HSIEH Hung-yun. On using interference-aware spectrum sensing for dynamic spectrum access in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(3): 461-474.
- [5] HUANG Pei, LIU Chin-jung, YANG Xi, et al. Efficient broadcast on fragmented spectrum in cognitive radio networks [C]// Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Communications. New York: IEEE, 2015: 149-153.
- [6] KRYSZKIEWICZ P, BOGUCA H. Out-of-band power reduction in NC-OFDM with optimized cancellation carriers selection[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(10): 1901-1904.
- [7] KRYSZKIEWICZ P, KLIKS A, LOUET Y. Reduction of subcarriers spectrum sidelobes and intermodulation in NC_OFDM systems[C]// Proceedings of 2013 IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. New York: IEEE, 2013: 124-129.
- [8] AL-DALAKTA E, AL-DWEIK A, HAZMI A, et al. PAPR reduction scheme using maximum cross correlation[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 2032-2035.
- [9] MORE A P, SOMANI S B. The reduction of PAPR in OFDM systems using clipping and SLM method[C]// Proceedings of 2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems. New York: IEEE, 2013: 593-597.
- [10] JIANG Tao, LI Xiang-ming. Using fountain codes to control the peak-to-average power ratio of OFDM signals[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 3779-3785.
- [11] SHARMA A, SINGH A. PAPR improvement in cognitive radio using interleaved SC-FDMA[C]// Proceedings of 2015 International Conference on Advances in Computer Engineering and Applications. New York: IEEE, 2015: 861-865.
- [12] SHOKROLLAHI A. Raptor Codes[J]. IEEE Transactions on information Theory, 2006, 52(6): 2551-2567.