

抑制 OFDM 信号 PAPR 的改进脉冲整形

冯卓明, 刘卫忠, 陶雄飞, 罗白云

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种改进的 Nyquist 脉冲, 可以提高 OFDM 信号 PAPR 的抑制性能, 同时不降低系统的 BER, 频带利用率高。仿真结果表明, 其综合性能明显优于传统的升余弦和反转指数脉冲, 是一种低复杂度的有效解决方案。

关键词: 正交频分复用; 脉冲整形; 峰均比; 误比特率

中图分类号: TN919.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)12-0154-07

Improved pulse shaping for PAPR reduction of OFDM signal

FENG Zhuo-ming, LIU Wei-zhong, TAO Xiong-fei, LUO Bai-yun

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An improved Nyquist pulse was presented. The proposed pulse waveform can significantly reduce the PAPR and keep the system BER invariant at the same time, but at the expense of a little spectrum loss. Simulation results show that the proposed shaping pulse can get better performance of PAPR compared to traditional raised cosine pulse and flipped-exponential pulse. It is an effective method with low complexity to reduced the PAPR of OFDM signal by pulse shapping with the proposed nyquist pulse.

Key words: OFDM; pulse shaping; PAPR; BER

1 引言

OFDM 在频率选择性衰落环境下特性优异, 已成为现代宽带无线通信中一种极有吸引力的技术。OFDM 已经成为下一代无线通信以及 4G 的首选方案^[1]。高 PAPR 是 OFDM 的一个主要缺点, 目前 PAPR 抑制技术可分为 2 类: 频域技术和时域技术。频域技术是通过增加输入信号离散傅里叶逆变换的互相关性, 降低输出信号离散傅里叶逆变换的峰值, 或者增加输出信号的平均值来抑制 PAPR。此类方法有: 分组编码、选择映射(SLM)、部分传输序列(PTS)、脉冲整形和星座图扩展(ACE)等^[2-7]。时域技术抑制 PAPR 主要是在信号通过功率放大器之前使之畸变来减小高的峰值或增加附加信号来增大信号的平均功率, 如限幅、补偿调制、预失真

等^[8-10]。

脉冲整形技术属于频域类技术, 通过降低峰值信号出现的概率达到抑制信号峰均比的目的。PS 技术的思想是将原始输入序列和脉冲整形矩阵相乘产生新序列, 使多载波的各个子载波符号间产生一定的相关性, 从而改善 OFDM 信号的 PAPR 特性。PS 技术是一种非常有效的 PAPR 抑制方法, 实现简单, 与 PTS、SLM 相比无须迭代计算多个 IFFT 操作, 无须传送边带信息; 由于采用线性变换, 所以不会引起信号畸变; 通用性强, 可以通过调整滚降系数以适应任何子载波的通信系统。脉冲整形技术抑制 PAPR 是以降低系统的频谱利用率为代价的, 而且不同的脉冲整形波形会导致不同的误码率。这里提出一种改进 Nyquist 整形脉冲, 提高 OFDM 信号的 PAPR 抑制性能, 同时不影响系统的 BER 性能

收稿日期: 2011-06-27; 修回日期: 2011-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902006); 武汉市晨光计划基金资助项目(201050231051)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60902006); Chen Guang Project of Wuhan (201050231051)

以及相对提高频谱利用率。

2 PS-OFDM 原理

2.1 系统模型

基于 PS 技术的 OFDM 系统发射机部分原理如图 1 所示。

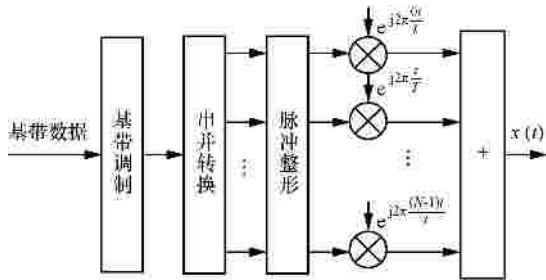


图 1 PS-OFDM 系统发射机原理

假设系统子载波数为 N ，首先对输入数据进行基带调制，符号率为 $1/T_s$ ，其中， T_s 为 Nyquist 采样时间间隔，满足 $T_s=T/N$ ， T 为 OFDM 符号周期；再将调制后的数据串并转换为 N 路并行数据，对每条支路单独用一个脉冲波形进行整形并在对应的子载波上进行传送。在 $0\sim T$ 内，OFDM 复信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) p_n(t) e^{j2\pi f_n t}, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

其中， $X(n)$ 表示子载波 n 上的调制数据， f_n 表示第 n 个子载波的频率 $f_n=n/T$ ， $p_n(t)$ 表示周期为 T 、作用于子载波 f_n 的整形脉冲，其带宽一般小于或等于 OFDM 信号的带宽^[6]。

采用 PS 技术抑制 OFDM 信号 PAPR 时，周期为 T 的整形脉冲 $p_n(t)(n=0,1,2,\dots,N-1)$ 必须要满足以下 4 个条件。

1) 等能量：
$$\int_0^T |p_n(t)|^2 dt = T ;$$

2) 时限：
$$P_n(t)=0, |t-T/2|>T/2 ;$$

3) 带限：
$$P_n(f-n/T=0), |f-B|>B(1+\epsilon) ,$$
 其中， $P_n(f)$ 为 $p_n(t)$ 的频率响应， T_s 为 Nyquist 采样时间间隔， $B=1/2T_s$ ；

4) 正交：

$$\int_0^T p_m(t) p_n^*(t) e^{j2\pi(f_m-f_n)t} dt = \begin{cases} 1, & m=n \\ 0, & m \neq n \end{cases} (m,n=0,1,2,\dots,N-1)。$$

2.2 PS-OFDM 系统 PAPR

OFDM 信号的 PAPR 定义为

$$PAPR = \frac{\max\{|x(t)|^2\}}{E\{|x(t)|^2\}} \quad (2)$$

对于 MPSK-OFDM 系统，假设 $E\{|x(t)|^2\}=1$ 且 OFDM 符号内各子载波调制符号相互独立，则发送信号的最大 PAPR 值可以表示为

$$PAPR_{\max} = \frac{1}{N} \max_t \left(\sum_{n=0}^{N-1} |p_n(t)| \right)^2 \quad (3)$$

由式(3)可以看出， $PAPR_{\max}$ 为各个子载波上所采用的整形脉冲时域波形 $p_n(t)$ 和子载波数 N 的函数，这表明恰当选取一组整形脉冲 $p_n(t)$ ，可使 $PAPR_{\max}$ 降低，从而改善信号的整个 PAPR 分布^[13]。

连续时间信号 $x(t)$ 的峰均比可以由 $x(t)$ 的 L 倍 Nyquist 速率采样信号的峰均比来近似，这样不仅增加与过采样倍数 L 成正比的计算量，而且对于 LN 个样本，当 $L>1$ 时，就不再是互相独立的变量，尽管他们依然符合瑞利分布，这使得从理论上得到样本最大值的概率分布比较困难。基于 $x(t)$ 的同相分量和正交分量为理想带限的高斯过程以及各峰值点统计独立的假设，Nee 以及 Ochiai 等提出了近似表示方法，分别适用于 N 较小和较大的应用场合。随着样本数的增加，参与整形计算的数据量也线性增加，为了折中过采样带来的计算复杂度影响，选择合适的过采样率显得尤为重要，一般 L 取值在 2~4。

OFDM 信号在时域内表现为 N 个正交的子载波信号的叠加，当这 N 个信号相位一致时，OFDM 信号将出现很大的峰值功率，导致很高的 PAPR。如果能够使子载波符号之间具有一定的相关性，就可以降低相位出现一致的概率，从而使 OFDM 信号的 PAPR 得到抑制。

考查采样值互相关函数

$$R_x(t_1, t_2) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} E[X(n)X^*(m)] p_n(t_1) p_m^*(t_2) e^{j2\pi(n t_1 - m t_2)/T} \quad (4)$$

由式(4)可以知道，OFDM 符号各采样值之间的互相关函数是子载波波形和基带数据的函数，故可以通过下面两条途径来引入采样值之间的相关性，第一，引入基带数据间的相关性，通过对输入数据进行编码来实现，当然编码方法会引入冗余信息，

使系统带宽效率降低,适合于子载波数量较小的系统。第二,利用不同子载波的时域波形,引入子载波之间的相关性,也就是使用整形脉冲对子载波进行整形,它可保持子载波之间正交,不需要额外的带外信息^[6];PS 技术就是通过引入子载波之间的相关性来抑制 OFDM 信号 PAPR 的。

2.3 Nyquist 脉冲整形

Slimane 等证明用相同的整形脉冲对不同子载波进行整形反而会增加传输信号的 PAPR,而只有采用不同的整形脉冲来整形 OFDM 信号的不同子载波,且保证脉冲峰值不在同一时刻出现,并满足带宽与 OFDM 符号相近的条件时,可以有效抑制 PAPR^[6]。因此只要是满足上面 4 个条件的整形脉冲,都可作为主脉冲来构造脉冲组,只需对主脉冲进行循环移位就可得到脉冲集合,而这些脉冲可保证 OFDM 信号的各个子载波峰值不出现在同一时刻,从而达到抑制 PAPR 的目的。为避免引入符号间干扰,每个子载波的整形脉冲必须满足

$$\begin{cases} p_n(t) = 0, |t - T/2| > T/2 (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \\ P_n(f - n/T) = 0, |f - 1/(2T_s)| > (1+b)/(2T_s) \end{cases} \quad (5)$$

这里 $P_n(f)$ 是时域脉冲 $p_n(t)$ 的傅立叶变换, $\beta(0 < \beta < 1)$ 是与子载波数量和发射带宽相关的系数。

由于具备无符号间干扰的特点, Nyquist 脉冲在 OFDM 系统中应用广泛,满足 $p(kT_s) = \begin{cases} 1, k = 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$ 。这时, PAPR 变成

$$\begin{aligned} PAPR_{\max} &= \frac{1}{N} \max_{0 \leq t < T} \left(\sum_{n=0}^{N-1} |p_n(t)| \right)^2 \\ \frac{1}{N} \left(\max_{0 \leq t < T} \sum_{n=0}^{N-1} |p_n(t)| \right)^2 &= N \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(5)可以知道,由 Nyquist 脉冲组形成的不同波形的最大振幅不会同时出现,同时仍然具有 Nyquist 脉冲的无符号间干扰的特性,所以用这一组 Nyquist 脉冲来整形不同子载波不会增加传输信号的最大振幅。所有按上述方式所构造的 Nyquist 脉冲集合都能用于抑制 OFDM 信号的 PAPR,并且在考虑衰变率的情况下,所得到的整形脉冲时域波形的旁瓣越小,其抑制 PAPR 的性能就越好。

考时域整形脉冲 $p(t)(n=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 为符号周期 T 内的时限信号,因此可用 Fourier 级数近似,即

$$p(t) \approx \sum_{k=-L}^{N+L-1} C_k e^{j2\pi \frac{k}{T} t}, 0 \leq t < T \quad (7)$$

其中, $L=[Na]/2$, N 为有效子载波数,同时 N 和 L 之间满足 $N+2L=2^m$ (令 $K=2^m$,则 K 称为总子载波数, K 是一个大于等于 N 并且与 N 之差最小的 2 的整数次幂的数), a 为滚降系数; C_k 为 $p(t)$ 的 Fourier 级数的系数

$$C_k = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) e^{-j2\pi \frac{k}{T} t} dt \quad (8)$$

使用主脉冲 $p(t)$, 可得子载波 n 的整形波形为

$$p_n(t) = \sum_{k=-L}^{N+L-1} C_k e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} e^{j2\pi \frac{k-n}{T} t} \quad (9)$$

将式(9)代入式(1)中可以得到

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} X(n) p_n(t) e^{j2\pi \frac{n}{T} t} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \sum_{k=-L}^{N+L-1} C_k e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} e^{j2\pi \frac{k-n}{T} t} e^{j2\pi \frac{n}{T} t} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \sum_{l=-L}^{N+L-1} C_k e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} e^{j2\pi \frac{k}{T} t} \\ &= \sum_{k=-L}^{N+L-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} X(n) C_k e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} \right) e^{j2\pi \frac{k}{T} t} \\ &= \sum_{k=-L}^{N+L-1} Y(k) e^{j2\pi \frac{k}{T} t} \\ &= IFFT(Y) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) C_k e^{-j2\pi \frac{nk}{N}}$, 为一个 $1 \times (N+2L)$

的向量,为进行脉冲整形变换后得到的新序列;令 $Y = \{Y(k), k=0, 1, \dots, N+2L-1\}$, $p_{n,k} = C_{nk} e^{-j2\pi nk/N}$, $n=0, 1, \dots, N-1, k=-L, -L+1, \dots, N+L-1$, 则 $P = \{p_{n,k}\}$ 为一个 $N \times (N+2L)$ 的正交矩阵,称为整形矩阵; $X = \{X(n), n=0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 为调制后得到的子载波信息序列。 Y 、 P 、 X 之间满足关系 $Y = X \cdot P$, 即经过脉冲整形之后,原来 $1 \times N$ 的向量变成了 $1 \times (N+2L)$ 的新向量,从而系统的带宽效率会下降 $2L/K$ 。其系统发射端框图如图 2 所示。

根据上述分析,采用脉冲整形降低 PAPR 的核心工作在于选择合适的 Nyquist 脉冲,形成相对应的整形矩阵,会在 OFDM 系统中增加 2 次线性变换;抑制 OFDM 峰均比的脉冲整形方案的优劣主要反映在几个方面:一是 PAPR 抑制性能;二是对 OFDM 系统性能的影响,主要是 BER 性能以及带宽效率;

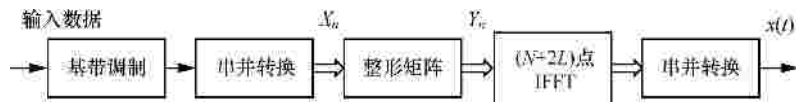


图 2 采用 Nyquist 脉冲整形的 OFDM 发射机实现

三是系统适应性，即是否受调制方式，载波数量的影响；四是在多径及存在频偏时抑制 ICI 的性能。传统的脉冲不能兼顾 PAPR 性能，系统适应性以及对系统 BER 性能的影响着几个因素。Nyquist 脉冲具有无 ISI 特性，具有较强的抑制 ICI 的性能，但不同类型的 Nyquist 脉冲性能差异较大，寻求综合性能优异的 Nyquist 脉冲是近期研究 PS 技术的重点。

3 改进整形脉冲

由于无 ISI 特性，Nyquist 脉冲在 OFDM 系统中广泛应用，Nyquist 脉冲类型较多，升余弦脉冲是最常见的也是应用最早的 Nyquist 脉冲，另外还有升余弦平方根、反转指数脉冲等，近期有研究者根据几何法构造出满足分段线性、具有奇对称特性的 Nyquist 脉冲^[11]；在 Nyquist 滤波器设计中，定义了一类脉冲的统一模型^[12]：

$$P(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq B(1-a) \\ G(|f| - (B(1-a))), & B(1-a) < |f| \leq B \\ 1 - G((B(1+a) - |f|)), & B < |f| \leq B(1+a) \\ 0, & B(1+a) < |f| \end{cases} \quad (11)$$

其中， $G(f)$ 是满足 $G(0)=1$ 的函数，该类滤波器在存在符号同步误差时，具有更小的畸变，更开的接收机眼图以及更小的符号差错率。在 $B(1-a) < |f| \leq B$ 的频率间隔内，其频域波形为凹形，而在 $B < |f| \leq B(1+a)$ 范围内为凸形，这样会使该频率范围的能量部分向高频段移动。当 $G(f) = e^{-f}$ 时，为 Beaulieu 提出的反转指数脉冲，参见式(12)。

$$P_B(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq B(1-a) \\ \exp(-\beta(|f| - (B(1-a)))) , & B(1-a) < |f| \leq B \\ 1 - \exp(-\beta((B(1+a) - |f|))), & B < |f| \leq B(1+a) \\ 0, & B(1+a) < |f| \end{cases} \quad (12)$$

其中， a 为滚降因子， $\beta = \ln 2 / (aB)$ 。基于前文分析可知，选择和构造脉冲时，时域波形的旁瓣越小对峰均比的抑制效果越好，通过频域波形分析，Beaulieu 提出的“Better-Than” Nyquist 脉冲性能很好，较传

统的升余弦脉冲性能提升很多。因此考虑可以通过合理选择和调整 $G(f)$ 来改进 PS 脉冲，在此类脉冲中找出最佳的一种，来进一步提高 PAPR 抑制性能，同时尽可能保证频带利用率及系统的 BER 性能。由于双曲反转正割曲线满足前面描述的频域特性要求，参见图 3，从图形分析，相较反转指数脉冲应该可以获得更好的能量向高端转移，保证第一旁瓣能量进一步降低，从而提高系统的 PAPR 抑制性能。令 $G(f) = 1 - \operatorname{arcsech}(f) / (2aB)$ ，则其频域表达式为

$$P_A(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq B(1-a) \\ 1 - \frac{1}{2aBg} \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{2aB}(B(1+a) - |f|)\right), & B(1-a) < |f| \leq B \\ \frac{1}{2aBg} \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{2aB}(|f| - B(1-a))\right), & B < |f| \leq B(1+a) \\ 0, & B(1+a) < |f| \end{cases} \quad (13)$$

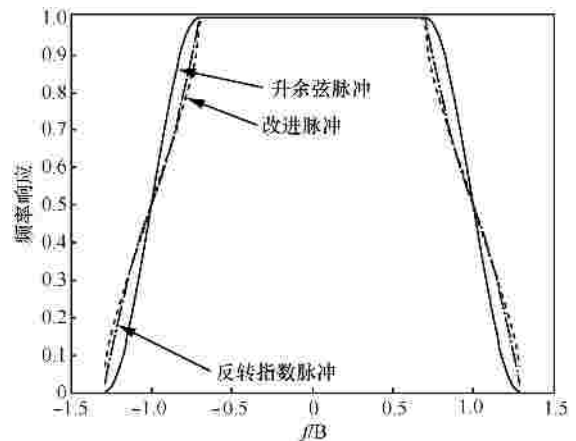


图 3 脉冲频率响应

其中， a 为滚降因子， $g = \ln(\sqrt{3} + 2) / (aB)$ ， $B=1/2T$ 为 OFDM 符号频率带宽，下面会通过仿真来验证其性能。由于 PS 技术是通过在频域上乘以整形脉冲矩阵来增加各子载波间的相关性，使得 OFDM 叠加信号的大峰值出现概率变小。根据上文分析，选择 Nyquist 整形脉冲 $p(t)$ 时，需要进一步降低第一旁瓣的能量，并且要增加时域信号的收敛速度，根据频域特性对比选择的双曲反转正割脉冲 这里称为改进 Nyquist

脉冲,该脉冲的频率响应由一个平坦部分和一个具有双曲反正割形式的滚降部分组成,它包含一些可取特性,包括实对称性、无 ISI 性质、很小的时域旁瓣;较反转指数脉冲的频响曲线更加符合上述要求。在系统存在频偏时,该脉冲较传统的 Nyquist 脉冲具有更好的 ICI 抑制性能^[13],本文先通过仿真研究其 PAPR 抑制性能以及系统综合性能如何。

4 仿真与分析

令 OFDM 符号有效子载波数为 $N=112$, $K=N+2L=128$, QPSK 调制。为了观察效果本文选择了具有很好性能的反转指数脉冲以及典型的升余弦脉冲作为对比,升余弦脉冲表达式为

$$P_c(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq (1-a)B \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left[\frac{\pi}{2aB} (|f| - (1-a)B) \right] \right], & (1-a)B < |f| < (1+a)B \\ 0, & (1+a)B < |f| \end{cases} \quad (14)$$

当 $a=0.33$ 时,3 种脉冲的频率响应如图 3。

图 4 是分别使用双曲反正割脉冲 $p_A(t)$ 、Better-Than(反转指数)脉冲 $p_B(t)$ 和升余弦脉冲 $p_C(t)$,在不同的滚降因子条件下,对 QPSK-OFDM 系统 PAPR 的互补累积分布函数(CCDFF)进行比较的结果。从图 3 可以发现,在滚降因子不同取值情况下, $p_A(t)$ 的 PAPR 抑制性能都要优于 $p_B(t)$ 和 $p_C(t)$ 。在滚降因子取值较小的情况下,与反转指数脉冲的性能相差不明显,随着滚降因子的增加,在 $a=0.5$ 时,其 PAPR 抑制性能明显优于反转指数脉冲和升余弦脉冲,性能分别相差 0.2dB 和 1dB。因此在滚降因子取值较大时,系统可获得明显的性能提升。

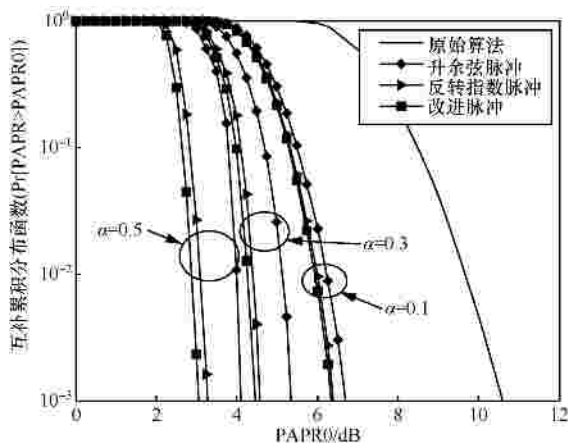


图 4 不同整形脉冲的 PAPR 抑制性能

针对采用脉冲整形的 QPSK-OFDM 系统,进行 BER 性能仿真,图 5 为使用不同脉冲滚降因子变化时,在 AWGN 信道条件下,QPSK-OFDM 系统 BER 仿真结果的比较。从图 5 中分析可以发现,使用 $p_A(t)$ 脉冲的系统 BER 性能最好,并且基本不受滚降因子影响;而使用 $p_B(t)$ 和 $p_C(t)$ 脉冲的系统 BER 要比 $p_A(t)$ 大,并且随着滚降因子的变大而变差,因此,改进脉冲具有相对最优特性。本文仿真选择了 AWGN 信道,在多径和存在频偏的时候,所提方法的性能在不同的滚降因子下是存在区别的,但是在相同的系统参数下,该脉冲具有更好的 PAPR 抑制特性以及 BER 性能。

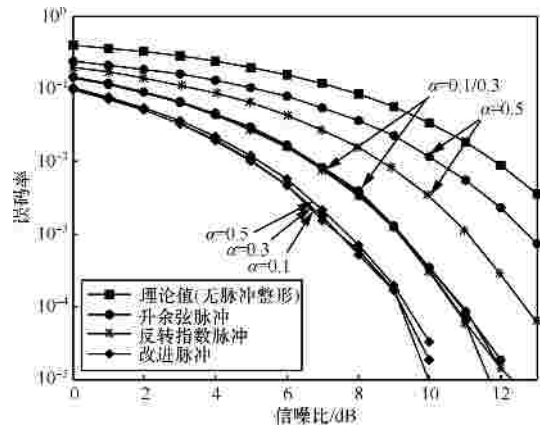


图 5 AWGN 信道下 BER 性能

仿真结果表明,3 种整形方案都可以很大程度的改进 OFDM 系统的 PAPR 性能,但是,使用提出的改进脉冲 $p_A(t)$ 整形的 OFDM 系统不仅可以大幅度降低系统地 PAPR,而且不影响系统的 BER 性能,并可获得相对最佳的 BER 性能,在 AWGN 信道下 BER 性能与滚降因子的取值基本无关。反转指数 Nyquist 脉冲 $p_B(t)$ 虽然 PAPR 抑制性能很好,但比较提出的改进脉冲,在滚降因子取值较大时,性能还是有所不足,且其误码率却随着滚降因子变化,在选取 Nyquist 整形脉冲时,需要在减小 PAPR 和 BER 两方面性能之间进行折中。而经典的升余弦脉冲 $p_C(t)$ 无论是在哪一方面都不如另外 2 种,这一点与其频域波形相符。

图 6 为改进脉冲不同滚降因子对应的抑制 PAPR 性能仿真对比,仿真参数 $K=128$,采用 QPSK 调制。可以看到,提出的改进脉冲滚降因子在 0.1~0.6 区间取值时,性能随取值增加而显著提高,超过 0.6 之后性能提高速度变缓,而且过了 0.8 之后反而下降,这对适当选择参数有实际指导意义。

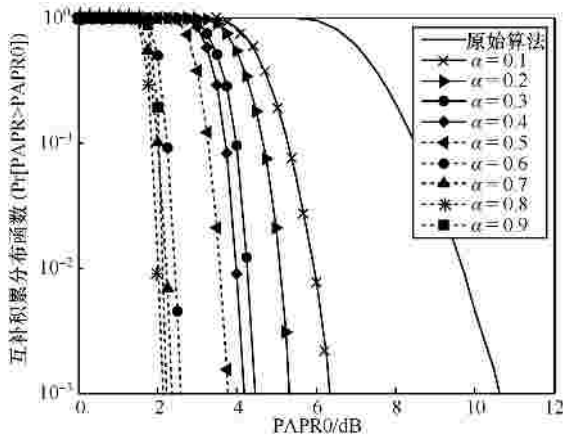


图 6 滚降因子的影响

图 7 是不同有效子载波的 PAPR 性能，仿真采用 QPSK 系统，在 $CCDF=10^{-3}$ ， $K=128$ ， $N=96、104、112$ 时的 PAPR0 分别为 4.15dB、5.01dB、5.89dB，频带冗余率从 25% 下降到 12.5%，而 PAPR 性能仅下降 1.74dB；而当 N 再增加时，性能缓慢下降，说明该脉冲不需要牺牲过多的有效子载波就可以获得较好的性能。具体性能如表 1 所示。

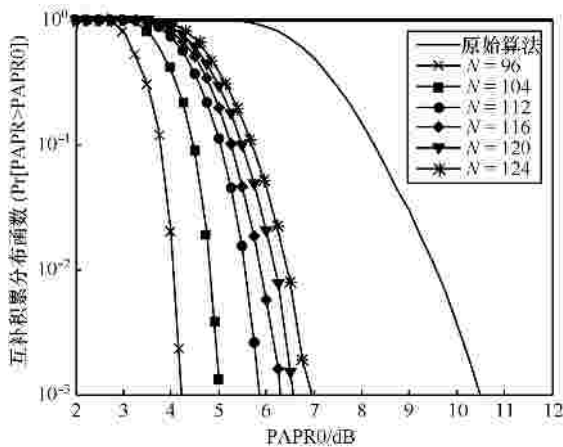


图 7 有效子载波数量的影响

表 1 频带效率与 PAPR 性能关系($K=128$)

N	频带冗余率/%	PAPR0/dB
$N=96$	25	4.15
$N=104$	18.75	5.01
$N=112$	12.5	5.89
$N=116$	9.38	6.25
$N=120$	6.25	6.73
$N=124$	3.13	6.88
$N=126$	1.59	6.94

可以看出，提高 PAPR 性能在一定范围内是需要损失频带效率的，然而在 $CCDF=10^{-3}$ 时，只损失 1.59% 的频带效率，PAPR 门限就可以达到 6.94dB，有效降低 PAPR 达 4.56dB，可见改进 PS 脉冲的 PAPR 抑制性能非常优秀。

5 结束语

本文分析了整形脉冲的构造方法，提出一种改进的 Nyquist 脉冲，该脉冲可提高 OFDM 信号 PAPR 抑制性能，同时保证系统的 BER 性能相对最优。仿真结果表明，比较以前提出的典型整形脉冲，本文提出的改进 Nyquist 脉冲在系统参数一定时，可以显著改善 OFDM 系统的 PAPR，具有较宽的滚降因子调节范围，综合性能优于传统的升余弦脉冲和反转指数脉冲。比较 PAPR 抑制性能、系统误比特率以及频带效率这些指标，改进整形脉冲在当前已提出的脉冲中具有相对最优综合性能，是一种低复杂度的有效脉冲整形方案。

参考文献：

- [1] RICHARD V N, RAMJEE P. OFDM for Wireless Multimedia Communications[M]. Norwood, MA: Artech House, 2001.
- [2] SEOK-JOONG H, HYUNG-SUK N, JONG-SEON N, et al. A modified slm scheme with low complexity for PAPR reduction of OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53(4): 804-808.
- [3] YUE X, XIA L, QING S W, et al. A class of low complexity PTS techniques for PAPR reduction in OFDM systems[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2007, 14(10): 680-683.
- [4] YANG Z. ACE with frame interleaving scheme to reduce peak-to-average power ratio in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2005, 51(4): 571-575.
- [5] JIANG T, ZHU G X, ZHENG J B. Block coding scheme for reducing PAPR in OFDM systems with large number of subcarriers[J]. Journal of Electronics, 2004, 21(6): 482-489.
- [6] SLIMANE S B. Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals using broadband pulse shaping[A]. IEEE VTC[C]. Birmingham, UK, 2002.889-893.
- [7] ZHANG C. Peak-to-average power ratio reduction in OFDM system using nyquist pulse shaping technique[A]. MAPE 2005[C]. Beijing, China, 2005.1522-1525.
- [8] TAO J, WEIDONG X, RICHARDSON P C, et al. On the nonlinear companding transform for reduction in PAPR of MCM signals[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2007, 6(6): 2017-2021.
- [9] DENG S K, LIN M C. Recursive clipping and filtering with bounded

distortion for PAPR reduction[J]. Communications, IEEE Transactions on, 2007, 55(1): 227-230.

- [10] HEE H S, LEE H J. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.
- [11] ALEXANDRU N D, BALAN A L. ISI-free pulses produced by improved Nyquist filter with piece-wise linear characteristic[J]. Electronics Letters, 2011, 47(4): 1-3.
- [12] ALEXANDRU N D. A family of improved nyquist pulses[J]. IEEE Acn T Network, 2004,8(2):87-89.
- [13] ONOFREI L A, ALEXANDRU N D. An investigation of the improved nyquist pulses families for OFDM Use[J]. IEEE Acn T Network, 2007, 32(2): 1-4.



刘卫忠 (1972-), 男, 湖北荆州人, 华中科技大学副教授, 主要研究方向为多媒体信源编码及图像处理。



陶雄飞 (1975-), 男, 湖北武汉人, 博士, 华中科技大学讲师, 主要研究方向为信道编码及嵌入式系统设计与应用。

作者简介:



冯卓明 (1970-), 男, 湖北荆州人, 华中科技大学博士生, 主要研究方向为宽带无线通信、OFDM 关键技术以及嵌入式系统设计与应用。



罗白云 (1971-), 男, 广西南宁人, 华中科技大学讲师, 主要研究方向为嵌入式系统设计与应用。