

# 基于迭代的部分传输序列备选信号相关性降低峰均功率比算法

胡敏,郭亚南,甘俊娜

(重庆邮电大学 软件技术中心,重庆 400065)

(0506240241@163.com)

**摘要:**部分传输序列(PTS)算法能够有效降低正交频分复用(OFDM)系统中高峰均功率比(PAPR)问题,并且不会引入失真,但PTS算法具有较高的复杂度。针对该问题,提出一种称为相关循环迭代的PTS(CC-IPTS)新算法。该算法利用迭代PTS在搜索最优相位因子时相邻相位因子间的关系以及迭代PTS(IPTS)中备选信号间相关性的特点,进行循环迭代。仿真结果表明,所提算法不但取得了较低的算法复杂度,还有效降低了峰均功率比。

**关键词:**正交频分复用;峰均功率比;相关性;部分传输序列;循环迭代

**中图分类号:**TN911.7 **文献标志码:**A

## Peak-to-average power ratio reduction algorithm based on correlation between candidates of iteration partial transmitted sequence

HU Min, GUO Ya-nan, GAN Jun-na

(Center of Software Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The Partial Transmitted Sequence (PTS) is an efficient algorithm to solve the problem of high Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) in Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), but the basic algorithm of PTS has higher computational complexity. A new algorithm based on Cyclic Iteration PTS (C-IPTS) which is called Correlational Cyclic Iteration PTS (CC-IPTS) was proposed to solve this problem. The proposed algorithm reduced computational complexity by using the relation between adjacent phase factors in Iteration PTS (IPTS), and the correlation of two candidate signals in PTS and cyclic iteration. The simulation shows that CC-IPTS can not only improve the PAPR performance, but also reduce computational complexity.

**Key words:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Peak-to-Average Power Ratio (PAPR); correlation; Partial Transmitted Sequence (PTS); cyclic iteration

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术因其频谱利用率高、抗干扰性强等特点,正逐渐成为未来移动通信的主流技术之一。然而,OFDM系统中传输信号较高的峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)使高峰值超出发送端功率放大器的线性动态范围时,将产生非线性失真,使得系统性能严重下降<sup>[1]</sup>。文献[2]研究了降低PAPR的各种算法,分析并比较了不同算法的优势与不足。文献[3]对目前降低PAPR的三类方法,即信号畸变技术<sup>[4]</sup>、信号加扰技术以及编码技术<sup>[5]</sup>进行了研究。其中,部分传输序列(Partial Transmitted Sequence, PTS)是信号加扰类技术中能有效降低PAPR的方法,但是这种方法却具有较高的复杂度。文献[6]的方法仅对一部分分割的子序列进行相位优化,而其他的子序列保持不变来降低复杂度,但PAPR的性能却降低了。文献[7]提出了一种用迭代移位线性搜索的方法来确定最优相位因子的迭代PTS(IPTS)算法。IPTS算法虽然有效降低了系统的复杂度,但是PAPR性能并没有得到明显的提高。文献[8]提出了一种利用反复迭代移位的IPTS方法,以及利用预先设定的门限值以降低计算复杂度的IPTS方法。文献[9]分析了PTS各个备选信号间的相关性,并以此为参考提出了一种新的低复杂度PTS算法。这种算法虽有效降低了复杂度,但是却增加了寻找相邻

相位因子的复杂度。

针对上述问题,本文提出一种基于IPTS的新算法——CC-IPTS算法。此算法利用在循环迭代中相邻因子的备选信号间具有较高的相关性特点,从而可以降低一半备选信号与相位因子结合以及计算PAPR的复杂度。仿真结果表明,该算法能以较低的复杂度获得良好的峰均比性能。

### 1 峰均比及累积分布函数的定义

OFDM信号的峰均比是指OFDM信号的最大峰值功率与平均功率的比值(单位dB),表达式<sup>[10]</sup>如下:

$$PAPR = 10 \lg \frac{\max \{ |x(n)|^2 \}}{E \{ |x(n)|^2 \}} \quad (1)$$

其中 $x(n)$ 表示经过快速傅里叶反变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)后得到的复基带时域信号,且 $x_n =$

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp \left( \frac{j2\pi kn}{N} \right)。$$

互补累积分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)表示峰均比大于某个门限值 $z$ 的概率<sup>[11]</sup>,即为:

$$CCDF = P\{PAPR > z\} = 1 - P\{PAPR \leq z\} = 1 - (1 - e^{-z})^N \quad (2)$$

收稿日期:2011-06-07;修回日期:2011-08-01。 基金项目:重庆市教委科技计划项目(CSTC2009AB2245)。

作者简介:胡敏(1971-),女,重庆涪陵人,副教授,硕士,主要研究方向:通信网体系与协议、无线通信;郭亚南(1985-),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向:无线通信、通信网体系与协议;甘俊娜(1987-),女,重庆江津人,硕士研究生,主要研究方向:无线通信、通信网体系与协议。

其中  $N$  表示子载波个数。

## 2 IPTS 算法的基本原理

PTS 的基本原理是先将输入的 OFDM 符号进行串并转换,再将其分割为  $M$  个互不重叠的子序列,分割方式有相邻分割、随机分割和交织分割三种,即  $X = \sum_{m=1}^M X_m$ ,然后对每一个子序列分别进行 IFFT,再乘以不同的相位因子,最后各子序列相加合并后得到 OFDM 输出信号如下:

$$X' = \sum_{m=1}^M b_m \text{IFFT}\{X_m\} \quad (3)$$

其中  $b_m$  表示所引用的相位因子,且是从  $b = \{e^{j\theta_m}, \theta_m \in [2\pi k/W, k = 0, 1, \dots, W-1]\}$  中随机选取的。

PTS 算法的本质就是从所有相位因子的组合  $\{b_m, m = 1, 2, \dots, M\}$  所对应的备选信号中选出最小 PAPR 的,并将此时的备选信号作为输出信号。因此 PTS 以  $M-1$  次 IFFT 以及计算各相位因子组合所对应的功率为代价,通过穷举搜索最优的相位因子组合,提高 OFDM 系统内的 PAPR 性能。

基于迭代搜索的 PTS 算法——迭代 PTS (IPTS) 能有效降低计算复杂度,其原理假定相位因子是从集合  $b = \{\pm 1\}$  中选取的,当分组数为  $M$  时,按照下列步骤来搜索最优相位因子:

1) 设置相位因子的初始值为  $\{b_m = 1, m = 1, 2, \dots, M\}$ ,并计算此初始相位因子对应备选信号的 PAPR。

2) 当  $m$  依次取值为  $1, 2, \dots, M$ ,也相应地改变  $b_m$  (令  $b_m = -1$ ),而其余  $\{b_v, v \neq m\}$  保持不变,并计算相应备选信号的 PAPR,若 PAPR 的计算结果小于前一步中的 PAPR,则使  $b_m = -1$ ,否则使  $b_m = 1$ 。

经过上述  $M$  次搜索得到的相位因子就是所求的相位因子,搜索次数仅需  $M$  次,计算复杂度相对于 PTS 有了很大的降低,但峰均比性能却有一定的损失。

## 3 PTS 备选信号间的相关系数分析

在 PTS-OFDM 系统中,当子载波个数  $N$  很大时,时域信号的每个采样点是相互独立的复随机变量,且每个备选信号  $X_m = [X_{m,0}, X_{m,1}, X_{m,2}, \dots, X_{m,N-1}]^T$  中的元素  $X_{m,n}$  满足复高斯正态分布  $N(0, \sigma^2/2M)$ 。经过进一步分析可以得到 PTS 中任意两个备选信号  $x_u$  和  $x_v$  的相关系数  $\rho_{u,v}$  如式(4):

$$\rho_{u,v} = \frac{\text{cov}(X_u, X_v)}{\sqrt{D(X_u)} \cdot \sqrt{D(X_v)}} = (M - Q + \sum_{q=1}^Q S_q) \cdot \frac{1}{M} \quad (4)$$

其中:  $D(\cdot)$  和  $\text{cov}(\cdot)$  分别表示方差和协方差;  $Q$  表示不同相位因子个数,且  $Q \leq M$ ;  $S_q$  表示为:  $S_q = b_{m_q}^u b_{m_q}^v$ ,其中  $m_q (q = 1, 2, \dots, Q)$  表示拥有不同相位因子的备选信号。

对于两路备选信号间的相关系数  $\rho_{u,v}$ ,当  $M \geq 2Q$  时,进行进一步分析可得式(5):

$$\rho_{u,v} \geq (M - 2Q)/M \quad (5)$$

从式(5)中可以看出,当 PTS-OFDM 系统的分割数  $M$  确定后,备选信号间的相关系数主要由  $Q$  来确定,并且当  $M \geq 2Q$  时相关系数随着  $Q$  增加而单调递减。由此可以得出,当两路备选信号只有一个分割的相位因子不同时,即  $Q = 1$ ,此时相关系数最大,也即这两路备选信号具有最大的相关性。例如,在 PTS-OFDM 系统中,当  $Q = 1, M = 4$  时,  $\rho_{u,v} \geq 0.5$ ; 当  $Q = 1, M = 8$  时,  $\rho_{u,v} \geq 0.75$ 。由此可见,当  $Q$  一定时,两路备选信号的相关性随着分割数  $M$  的增大而变大。

图 1 所示为子载波数  $N = 1024, Q = 1, M = 4$  时, PTS-

OFDM 系统中两路备选信号 1 和 2 的前 50 个采样点的幅度值比较图。从图中可以看出,两路备选信号大于 0.04 幅度值的位置基本相同。由此可见在 PTS-OFDM 系统中当两路备选信号只有一个分割的相位因子不同时,它们的相近信号幅度值的分布具有很大的相似性。

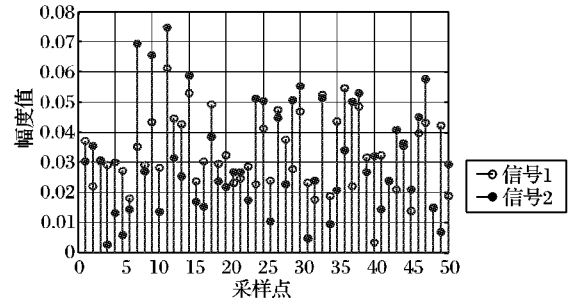


图1 PTS 中仅一个分割的相位因子不同时两路备选信号的幅度值

## 4 CC-IPTS 算法

由前面所叙述的 IPTS 原理可知,在进行每一次迭代时,相位因子的组合都是由前一相位因子组合中的一个相位因子改变得到的;再考虑到前文所得到的有关备选信号相关性的关系,可只此时在计算备选信号的各个样值点功率时只需计算  $K$  个点上的功率值即可,而这  $K$  个样值点的位置可以由前一备选信号的前  $K$  个最大功率值来确定。具体来说就是从初始相位因子开始进行循环迭代,每两个相邻的相位因子为一组采用本文算法,每进行  $M$  次迭代搜索为一个循环。

本文算法具体实现方案如下:

1) 初始化相位因子为  $\{b_m = 1, m = 1, 2, \dots, M\}$ ,求出此时对应的备选信号,计算出对应所有点的功率后求出 PAPR,保留此时 PAPR 值为最小 PAPR,然后求出前  $K$  个功率最大值的位置。

2) 使  $b_1 = -b_1$ ,其余相位因子保持不变,求出此时对应的备选信号,若此时的相位因子是从初始相位因子变换而来的,则利用步骤 1) 中求出的前  $K$  个最大功率的位置,只需计算出此时备选信号中对应的  $K$  个位置上的功率,然后求出 PAPR;若此时 PAPR 比步骤 1) 中 PAPR 小,则保留此时  $b_1$  的值,否则使  $b_1 = -b_1$ ,并保留最小 PAPR 值。

3) 使  $m$  依次为  $2, 3, \dots, M$ ,并相应地改变  $b_m$  (即  $b_m = -b_m$ ),而其余  $\{b_v, v \neq m\}$  保持不变,求出此时对应的备选信号。在计算 PAPR 时,若  $m$  为奇数,则利用上一步中求出的前  $p$  个最大功率的位置,只需计算出此时备选信号中对应的  $p$  个位置上的功率,然后求出 PAPR,若此时 PAPR 比保留的最小 PAPR 小,则保留此时  $b_m$  的值,否则使  $b_m = -b_m$ ,并保留此时 PAPR 值为最小值;若  $m$  为偶数,求出此时对应的备选信号,计算出对应所有点的功率后求出 PAPR,并求出前  $p$  个功率最大值处的位置,若此时 PAPR 比步骤 1) 中 PAPR 小,则保留此时  $b_m$  的值,否则使  $b_m = -b_m$ ,并保留最小 PAPR 值。

4) 若  $m < M$ ,则转到步骤 3) 继续执行;若  $m = M$ ,则转到步骤 2) 继续执行,一直达到循环次数  $u$  为止。

## 5 理论分析及仿真结果

### 5.1 理论分析

本文利用 PTS 中备选信号的相关性提出了一种基于循环迭代的 PTS 算法。本文算法通过降低 PTS 算法中备选信号的搜索次数,减少计算各备选信号功率时的抽样点个数以及减少备选信号结合相位因子的个数三个方面降低了 PTS 的复杂度,同时 PAPR 的性能又有了显著提高。

下面对 PTS、IPTS 和 CC-IPTS 算法之间的总复杂度进行比较。已知每个 IFFT 运算所需要的复数乘法和复数加法的运算量<sup>[4]</sup>分别为:

$$\begin{cases} n_{\text{mul}} = (N/2) \lg N \\ n_{\text{add}} = n \lg N \end{cases} \quad (6)$$

其中  $n_{\text{mul}}$ ,  $n_{\text{add}}$  分别表示  $N$  点 IFFT 所需的复数乘法与复数加法的次数。

表 1 PTS、IPTS 与 CC-IPTS 的计算总量比较

| 方法      | 计算总量   |
|---------|--|
| PTS     | $18 \left[ M \frac{N}{2} \lg N + P^M MN + P^M N \right] + 2 \left[ P^M MN \lg N + P^M (M-1) N \right]$   |
| IPTS    | $18 \left[ M \frac{N}{2} \lg N + M^2 N + MN \right] + 2 \left[ M^2 N \lg N + M(M-1) N \right]$   |
| CC-IPTS | $18M \left[ \frac{N}{2} \lg N + \frac{1}{2} UM(N+K) + \frac{1}{2} U(N+K) \right] + 2 \left[ (UM^2 N \lg N + \frac{1}{2} MU(M-1)(N+K)) \right]$ |

由表 1 可知,三种算法的计算总量随着子载波数  $N$  与分割数  $M$  的增加而增加。在经过 IFFT 之后,当  $U = P^M/M$  时,即相位因子搜索次数与 PTS 相等,CC-IPTS 算法的计算量比 PTS 减少了  $2P^M(5M+4)(N-K)$ 。当  $U = 1$  时,即相位因子搜索次数为  $M$ ,与 IPTS 的搜索次数一样,CC-IPTS 算法的计算量要比 IPTS 减少  $2M(5M+4)(N-K)$ 。当  $U$  在  $[1, P^M/M]$  区间取值时,能够达到在降低了计算复杂度的同时显著提高 PAPR 性能。

## 5.2 仿真结果

本文仿真所采用的参数如下:调制方式为 QPSK 调制,采用相邻分割法,分割数  $M = 4$ ,子载波数  $N = 1024$ ,采用 4 倍的过采样,OFDM 符号个数为 100,循环次数  $U = 2$ ,所选最大功率值的个数  $L = 256$ 。

图 2 为 OFDM 系统中 PTS 算法、文献[8]中所提两种算法(IPTS 以及 IPTS( $Th = 7.25$  dB)),和 CC-IPTS 算法的 PAPR 性能比较。从图中可以看出,当  $P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0) = 10^{-2}$  时,原始信号、PTS 算法、迭代 IPTS 算法以及门限 IPTS 算法和 CC-IPTS 算法对应的  $\text{PAPR}_0$  分别为 10.8 dB、10.3 dB、10.3 dB、9.45 dB 和 9.4 dB。PTS 算法所获得的 PAPR 性能是最好的,但是需要  $2^4 = 16$  次穷举搜索,计算复杂度很高。而文献[4]中的两种算法基本没有差别,其计算复杂度大大降低了,但是取得的 PAPR 性能一般,与 PTS 算法相差了 0.5 dB。CC-IPTS 算法相对于 IPTS 算法,有 0.85 dB 的性能改善,而与 PTS 算法仅相差 0.05 dB,但其搜索次数为  $M \times U = 8$ ,是 PTS 搜索次数的一半,而计算复杂度又小于 PTS 的一半。因此可以看出,CC-IPTS 算法能够以较低的计算复杂度获得良好的 PAPR 性能。

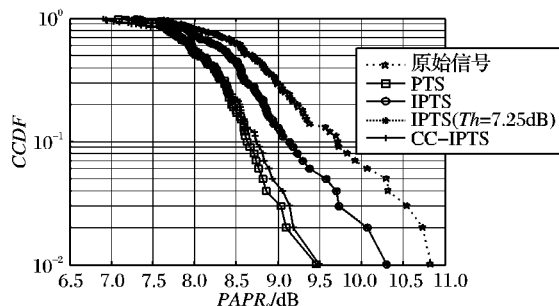


图 2 峰均比降低性能比较

图 3 为在选取的最大功率个数  $K$  分别为 128、256 和 512 时的 PAPR 性能比较。从图中可以看出。当  $K$  为 256 和 512 时所得的 PAPR 性能基本是一样的,而  $K = 128$  时的 PAPR 性能

要差一些。就是说随着  $K$  取值的增加,PAPR 性能也提高了,但当达到一定数时,PAPR 性能提高的空间基本为零。其原因就是相邻备选信号间具有较大的相关性。因此在 CC-IPTS 算法中,一般取  $K = N/4$  便可,即  $L = 4$ 。

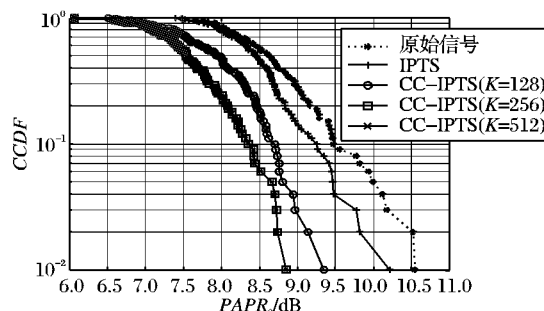


图 3 峰均比降低性能比较

图 4 为当 CC-IPTS 算法中的循环次数  $U = 2$  和  $U = 4$  时的 PAPR 性能比较。从图中可以看出 CC-IPTS 算法的 PAPR 性能要好于 IPTS 算法的 PAPR 性能。而对于 CC-IPTS 算法来说,循环次数  $U = 2$  和  $U = 4$  时  $\text{PAPR}_0$  在  $P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0) = 10^{-2}$  时分别为 8.90 dB 和 8.95 dB。虽然当  $U = 4$  时其 PAPR 性能相对于  $U = 2$  时的 PAPR 性能有所改善,但是性能改善的程度很小,只有 0.05 dB。因此可以看出在 CC-IPTS 算法中当循环次数  $U = 2$  时,本文算法在 PAPR 性能改善上已经比较明显,而随着  $u$  的增加,本文算法对 PAPR 性能的改善变得很小,所以在所提算法中可以设置  $U = 2$ ,获得在算法复杂度与 PAPR 性能间的一个好的折中方案。

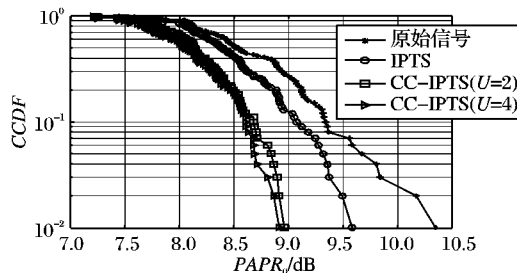


图 4 峰均比降低性能比较

图 5 为当 CC-IPTS 算法中分割数  $M$  分别为 2、4 和 8 时的 PAPR 性能比较。从图中可以看出,随着分割数的增加,PAPR 性能也在增大。当分割数  $M$  为 4 与 8 时,所得的 PAPR 性能基本一致。又当分割数  $M$  增加时,由表 1 可知算法的计算复杂度也将增大。因此,一般取分割数  $M = 4$ 。

(下转第 3232 页)

条件下,改进的算法的信噪比相比原有算法有一定的提高。

表1 各种估计算法的运行时间统计

| 算法           | 算法运行时间/s |
|--------------|----------|
| LS 信道估计      | 21.6127  |
| SVD 信道估计     | 54.8177  |
| DFT 信道估计     | 22.2075  |
| 改进的 DFT 信道估计 | 22.5420  |

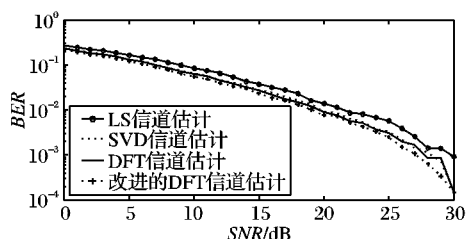


图4 LS、SVD、DFT 和改进的 DFT 信道估计的性能比较

## 5 结语

在基于导频的信道估计基础上,基于 DFT 的信道估计算法的性能优越,并且运算复杂度低,是一种可靠的信道估计算法,适用于实际系统中的应用。原算法在时域内只是去除了循环前缀长度以外的噪声影响,未对循环前缀长度以内的噪声做任何处理。基于这一点,提出了改进的 DFT 信道估计算法,通过在循环前缀以内引入判决门限,进行判决处理,进一步去除噪声,使得性能得到很大的提高。仿真结果表明,改进的算法性能优于原算法,尽管增加了计算量,但增加的计算量较小。

### 参考文献:

[1] 汪裕民. OFDM 关键技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社,

2006.

- [2] 周恩, 张光, 吕召彪, 等. 下一代宽带无线通信 OFDM 与 MIMO 技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [3] 张继东, 郑宝玉. 基于导频的 OFDM 信道估计及其研究进展[J]. 通信学报, 2003, 24(11): 116-124.
- [4] 3GPP. TR 25.814v7.1.0-2006 Physical Layer Aspects for Evolved UTRA[S], 2006.
- [5] 卢鑫, 梁永生. 基于 LS 的 STBC 导频信道估计方法[J]. 通信技术, 2008, 41(7): 63-65.
- [6] 阙大顺, 史留成. 基于小波和奇异值低阶近似的 OFDM 信道估计方法[J]. 电脑与信息技术, 2007, 15(2): 1-3.
- [7] XIA BIN, WANG J Z, SAWAHASHI M. Performance comparison of optimum and MMSE receiver with imperfect channel estimation for VSF-OFCDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 3051-3062.
- [8] SPETH M, FECH TEL S A, FOCK G, et al. Optimum receiver design for wireless broad-band systems using OFDM: Part I[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 1999, 47(11): 1668-1677.
- [9] BELOTSEKOVSKY M. An equalizer initialization algorithm for IEEE802.11a and HIPERLAN/2 receivers[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2002, 48(4): 1051-1055.
- [10] 刘光毅, 王勇等. WIMAX 系统中导频和信道估计[J]. 中兴通信技术, 2007, 13(5): 48-52.
- [11] 卢鑫, 蔡铁等. 基于 DFT 的时域 LS 信道估计算法[J]. 计算机工程, 2010, 6(11), 11-13.
- [12] KANG Y, KIM K, PARK H. Efficient DFT-based channel estimation for OFDM system on multipath channels[J]. Digital Object Identifier, 2007, 2(1): 197-202.
- [13] 李杰, 练秋生. 基于特殊导频去噪的 OFDM 信道估计算法[J]. 无线电通信技术, 2008, 34(2): 28-31.
- [14] 焦明伟, 贾振红, 覃锡忠, 等. 一种改进的基于 DFT 的 OFDM 信道估计算法[J]. 通信技术, 2010, 43(8): 117-120.

(上接第 3225 页)

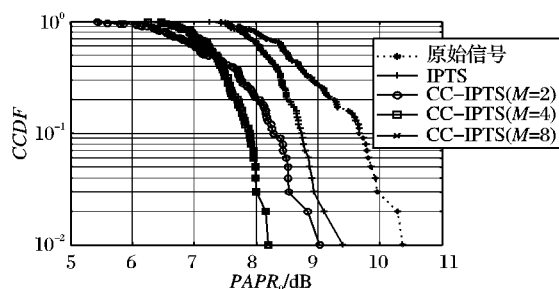


图5 峰均比降低性能比较

## 6 结语

针对 OFDM 系统中存在高峰均比的问题, IPTS 算法虽然比基本 PTS 算法具有较低的复杂度,但由于其所搜索的相位因子组合并不全面,只是占到了一小部分,因此该算法降低 PAPR 不是很有效。本文利用 PTS 中备选信号的相关性提出了一种基于循环迭代的 PTS 算法——CC-IPTS 算法。该算法通过减少 PTS 算法中备选信号的搜索次数,计算备选信号功率的样值点数以及备选信号结合相位因子的个数三个方面降低了 PTS 的复杂度,同时 PAPR 的性能又有了显著提高。

### 参考文献:

[1] YANG L, CHEN R S, SIU Y M, et al. PAPR reduction of an OFDM signal by use of PTS with low computational complexity[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2006, 52(1): 83-86.

[2] 赵宇, 胡茂凯, 陈西宏. OFDM 技术及其 PAPR 降低算法仿真分析[J]. 现代电子技术, 2009, 32(9): 56-58.

- [3] 陈琳, 胡学龙. OFDM 系统中降低 PAPR 技术的研究[J]. 上海电力学院学报, 2010, 26(5): 469-472.
- [4] ARMMASTERONG J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency filtering[J]. Electronics Letters, 2002, 38(5): 246-247.
- [5] CHEN H S, LIANG H Y. Combined selective mapping and binary cyclic codes for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2007, 6(10): 3524-3528.
- [6] JAYALATH A D S, TELLAMBURA C, WU H. Reduced complexity PTS and new phase sequences for SLM to reduce PAPR of an OFDM signal[C]// IEEE Vehicular Technology Conference. New York: IEEE, 2000, 3: 1914-1917.
- [7] SEUNG H H, JAE H L. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.
- [8] 巩朋成, 李锁平, 侯尚林, 等. OFDM 系统中基于迭代和门限理论降低 PAPR 的改进 PTS 方法[J]. 信号处理, 2010, 26(8): 1263-1268.
- [9] XIAO Y, LEI X, WEN Q. A class of low complexity PTS techniques for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(10): 680-683.
- [10] 佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [11] FISCHER R F H, HOCH M. Peak-to-average power ratio reduction in MIMO OFDM[C]// IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2007: 762-767.
- [12] WULICH D, DINUR N, GLINOWIECKI A. Level clipped high-order OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(6): 928-930.