



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 基于混沌序列相关性的峰均比抑制研究

赵耿, 王超, 马英杰

### 引用本文

赵耿, 王超, 马英杰. [基于混沌序列相关性的峰均比抑制研究](#)[J]. 计算机科学, 2022, 49(5): 250-255.

ZHAO Geng, WANG Chao, MA Ying-jie. [Study on PAPR Reduction Based on Correlation of Chaotic Sequences](#)[J]. Computer Science, 2022, 49(5): 250-255.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### [混沌子载波调制的无人机安全数据链路](#)

Secure Data Link of Unmanned Aerial Vehicle Based on Chaotic Sub-carrier Modulation

计算机科学, 2022, 49(3): 322-328. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210200022>

#### [一种低复杂度的水声 OFDM 通信系统子载波分配算法](#)

Low-complexity Subcarrier Allocation Algorithm for Underwater OFDM Acoustic Communication Systems

计算机科学, 2021, 48(6A): 387-391. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201100064>

#### [OFDM 系统中基于贝叶斯学习的联合稀疏信道估计与数据检测](#)

Joint Sparse Channel Estimation and Data Detection Based on Bayesian Learning in OFDM System

计算机科学, 2020, 47(11A): 349-353. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.191100090>

#### [基于混沌和 WEP 的无线传感器网络加密研究](#)

Encryption of Wireless Sensor Networks Based on Chaos and WEP

计算机科学, 2019, 46(6A): 362-364.

#### [F-OFDM 系统中的自适应 EM 相位噪声抑制算法](#)

Self-adaptive EM Phase Noise Suppression Algorithm in F-OFDM System

计算机科学, 2019, 46(2): 68-75. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.02.011>

# 基于混沌序列相关性的峰均比抑制研究

赵耿<sup>1,2</sup> 王超<sup>1,2</sup> 马英杰<sup>2</sup>

1 西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071

2 北京电子科技学院 北京 100070

(w13279480125@163.com)

**摘要** 针对降低峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)的主要技术的降低效果普遍不理想的情况,文中提出一种基于混沌序列低相关性的部分传输序列法(Chaotic Sequence with Low Correlation of Partial Transmission Sequence, CL-PTS)。该方法使用自相关性较低的数条混沌序列与原始信号相乘,经过快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)降低 OFDM 系统的瞬时功率平均值。仿真结果表明,在互补累积分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)为  $10^{-3}$  时,该方法降低 PAPR 的效果相比其他同类算法有 1 dB 左右的增益,但算法的计算复杂度过高且需消耗较多的频谱资源。在此情况下,提出了改进的相关性算法(Chaotic Sequence with Low Correlation of Modified Partial Transmission Sequence, CM-PTS),分析了 PTS 算法的子块数对计算量的影响。利用 IFFT 变换的特点,通过改变序列在系统中的插入位置达到降低 PAPR 的目的。实验结果表明,CM-PTS 算法在增加较少计算量的同时可以使 PAPR 的值降低约 0.5 dB,同时不会引起误比特率的提高。

**关键词:** 正交频分复用;部分传输序列;混沌序列;峰均功率比;低相关性

**中图分类号** TP391.9

## Study on PAPR Reduction Based on Correlation of Chaotic Sequences

ZHAO Geng<sup>1,2</sup>, WANG Chao<sup>1,2</sup> and MA Ying-jie<sup>2</sup>

1 School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

2 Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China

**Abstract** After analyzing the main techniques to reduce the peak to average power ratio (PAPR), a partial transmission sequence method (CL-PTS) based on low correlation of chaotic sequences is proposed to solve the problem that the reduction effect is generally not ideal. In this method, several chaotic sequences with low autocorrelation are multiplied by the original signal, and the average instantaneous power of OFDM system is reduced by inverse fast Fourier transform (IFFT). Simulation results show that when the complementary cumulative distribution function (CCDF) is  $10^{-3}$ , the PAPR reduction effect of this method is about 1 dB compared with other similar algorithms, but the algorithm is too complex and consumes more spectrum resources. On this basis, an improved correlation algorithm (CM-PTS) is proposed. This paper analyzes the influence of the number of sub blocks of PTS algorithm on the amount of computation and using the characteristics of IFFT transform, the PAPR can be reduced by changing the insertion position of the sequence in the system. The results show that CM-PTS algorithm can reduce the PAPR value by about 0.5 dB without increasing the BER.

**Keywords** Orthogonal frequency division multiplexing, Partial transmission sequence, Chaotic sequences, Peak to average power ratio, Low correlation

## 1 引言

无线信道环境是无线通信中最重要的一环。因不同系统间的互相干扰,频谱成为了宝贵的不可再生资源。为提高频谱利用率,以满足越来越多的需求,OFDM 系统不断被优化<sup>[1-2]</sup>。

OFDM 系统使用多个正交子载波传输信号,在某一时刻,不同信号的瞬时功率同相叠加会造成很高的峰均比,这对功放的线性范围有很高的要求,若不进行有效处理,则会导致发送信号互调失真,因此较高的峰均比是限制 OFDM 发展的一个重要因素。

到稿日期:2021-04-28 返修日期:2021-10-20

基金项目:国家自然科学基金(61772047);北京电子科技学院一流学科建设项目(3201017)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61772047) and First Class Discipline Construction Project of Beijing Electronic Science and Technology Institute(3201017).

通信作者:王超(583956200@qq.com)

降低峰均比的方法分为3类:信号预畸变、预编码技术和概率法。预畸变的主要思想是对信号的峰值进行非线性操作,是最直接、简单的方法,但它会使传输信号产生非线性失真,损失误码率<sup>[8]</sup>。Chen等<sup>[4]</sup>提出了一种基于加窗函数架构的OFDM系统相位变化PAPR抑制技术,基于相位变化,该技术使输出信号的频谱几乎不受削峰引起的再增长的影响。预编码技术主要受限于子载波数目以及调制方式,Saleh等<sup>[5]</sup>采用复BIFORE预编码变换来降低系统峰均比。Mounir等<sup>[6]</sup>采用混合预编码-编译码技术优化了误码率和OOB辐射。文献<sup>[7]</sup>给出了与扩展或主动星座扩展相结合的PTS,但该方案需要较大的计算复杂度才能得到较好的PAPR抑制效果。概率法中最常用的是部分传输序列(PTS)和选择性映射(SLM)算法<sup>[8]</sup>。Xia等<sup>[9]</sup>在时域相位旋转矢量的基础上提出了一种低复杂度盲SLM来降低峰均比,此方案具有较低的PAPR和较好的鲁棒性。传统的SLM方法通过全搜索在候选信号中选择和传输具有最小PAPR的信号,Jung提出了降低SLM峰均比的改进方法<sup>[10]</sup>,即当遇到不引起削波的候选信号时,终止搜索候选信号的过程,而不是找到具有最小PAPR的候选信号。Hamza等<sup>[11]</sup>采用了基于教学的优化算法,该算法具有计算量小、不需要特定算法参数的特点,并且具有良好的性能。PTS算法的常用方式是寻找合适的加权因子,文献<sup>[12-13]</sup>使用不同的优化技术来达到计算量和效果的平衡。Deepa等<sup>[14]</sup>提出利用部分传输法的循环移位来降低信号的峰值功率。Sharifi等<sup>[15]</sup>提出了一种基于蚁群优化的新型PTS技术,用于以降低OFDM系统的高PAPR和计算代价。

利用序列相关性来降低PAPR的思想并不少见,Sun等<sup>[16]</sup>提出利用Walsh-Hadamard矩阵联合PTS算法来降低PAPR,此方法证实了利用相关性降低峰均比是有效且可行的。本文利用混沌序列较低的自相关函数值对传输信号进行处理,考虑到PTS算法分块的复杂性,混沌序列在进行处理时,其插入位置变得尤为重要。通过对比不同的插入位置,比较其性能差异,选择出较好的方法进行使用,并与其他文献方案进行仿真对比,验证了本文方案的有效性和可用性。

## 2 高PAPR问题及PTS算法

### 2.1 高PAPR产生的原因

OFDM系统将高速传输的串行信号流分在多个正交的子信道上进行低速传输,每个OFDM符号都是多个子载波信号之和。假设子信道数量为 $N$ ,分配给每个子信道的数据记为 $d_i(i=0,1,\dots,N-1)$ ,那么第 $k$ 个OFDM信号可以表示为:

$$\sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp(j2\pi ki/N) \quad (1)$$

其中, $0 \leq k \leq N-1$ 。某一时刻,这些子载波信号以相同的相位叠加,使叠加信号产生很大的峰值,从而带来很高的峰均功率比。

$$PAPR = 10 \lg \left( \frac{\max |s_k|^2}{E(|s_k|^2)} \right) \quad (2)$$

根据中心极限定理,若 $N$ 足够大,则可以判定实部和虚部服从均值为0、方差为0.5的高斯分布。其功率分布服从两个自由度的中心分布,均值为0,方差为1,因此可得到一个

OFDM符号周期内 $N$ 个独立采样值的互补累积分布函数(CCDF)为:

$$\begin{aligned} P(PAPR > z) &= 1 - P(PAPR \leq z) \\ &= 1 - (F(z))^N \\ &= 1 - (1 - \exp(-z))^N \end{aligned} \quad (3)$$

该指标一般被用于衡量OFDM系统的PAPR分布情况。

### 2.2 PTS算法

部分传输序列算法(PTS)降低PAPR的原理是将并行输入的 $N$ 个子载波数据 $S_k = \{S_1, S_2, \dots, S_{N-1}\}$ 分割为 $V$ 组,表示为 $S_v(v=1, 2, \dots, V)$ 。每个子载波数据只能出现在一个组中,每个组中没有子载波数据的位置补0且每组的子载波数相等。

各子块经过 $N$ 点IDFT/IFFT变换,得到其时域信号,此时有:

$$\begin{aligned} s' &= IFFT \left\{ \sum_{v=1}^V b_v S_v \right\} \\ &= \sum_{v=1}^V b_v \cdot IFFT \{ S_v \} \\ &= \sum_{v=1}^V b_v s_v \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $s_v$ 是经过IFFT变换后的时域信号, $b_v(v=1, 2, \dots, V)$ 是加权因子,并且有:

$$b_v = \exp(j\varphi_v) \quad (5)$$

其中, $\varphi_v \in [0, 2\pi)$ 。通过选择合适的相位因子使得 $s'$ 的峰值信号达到最优。选择的相位因子应当满足以下条件:

$$\{b_1, b_2, \dots, b_v\} = \arg \min \left( \max_{1 \leq n \leq N} \left| \sum_{v=1}^V b_v s_{nv} \right|^2 \right) \quad (6)$$

其中, $\arg \min(\cdot)$ 表示取得极小值对应的参数,使用的 $b_v$ 在一个离散集合中取值,如 $\{+1, -1, +j, -j\}$ 。

尽管传统PTS算法的计算量比SLM小,但是寻找最优的加权因子在计算上仍然比较困难。大量文献均使用基于次优思想的次优PTS算法,其以较小的计算量来寻找合适的加权因子集合而不必寻找加权因子组合的所有值,使得寻找加权因子的计算复杂度从幂次级降为普通的乘法级,在很大程度上提高了算法的实用性。

## 3 利用相关性降低PAPR

### 3.1 PTS-WHT算法

文献<sup>[17]</sup>将Walsh-Hadamard矩阵与PTS算法相结合,其核心思想是利用哈达玛矩阵来降低输入信号的相关性。首先生成 $N$ 阶的Walsh-Hadamard矩阵,其值只包含1和-1,生成公式为:

$$\begin{cases} H_1 = [1] \\ H_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\ \vdots \\ H_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} H_{N/2} & H_{N/2} \\ H_{N/2} & -H_{N/2} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

然后,将生成的WHT矩阵与原始信号进行矩阵乘法,得到预分块的序列,其算法的原理如图1所示。

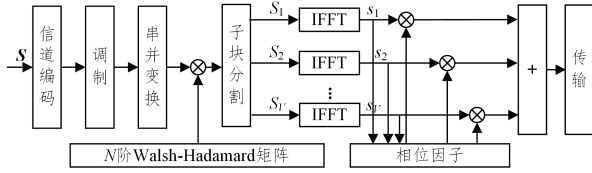


图1 PTS-WHT降低PAPR的原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of PTS-WHT reducing PAPR

该方案的具体步骤如下：

- (1)根据式(7)生成  $N$  阶 WHT 矩阵；
- (2)将 WHT 矩阵与输入数据相乘,并采用交织分割的方式将其划分为  $v$  个子块。
- (3)对各子块进行  $N$  点 IFFT 变换；
- (4)采用次优算法确定相位因子集合,并将其作为最优的序列发送。

### 3.2 混沌序列

混沌现象指发生在确定性系统中的不确定性运动,即一个确定性理论描述的系统,其行为却表现为不确定、不可重复、不可预测。混沌序列是基于混沌系统生成的一个伪随机序列,具有良好的性质,如周期长且不重复,对初值具有敏感性,即初始值的细微变化会产生完全不同的序列。使用迭代映射产生的序列很适合应用于通信领域。一般而言,混沌序列的生成只需要一个初值和迭代公式,不必记录各个点的值,对传输冗余信息的影响甚微。

Logistic 映射是最常见的混沌映射,其迭代公式是系统中最简单的非线性差分方程,具体表达式如下：

$$X_{k+1} = f(X_k) = \mu X_k (1 - X_k) \tag{8}$$

其中,  $\mu \in [0, 4]$ 。众多研究表明,当  $\mu \in [3.5699, 4]$  时,系统处于混沌状态,经过初始值和迭代公式可以求得一组分布在  $(0, 1)$  的随机数,再通过单比特量化即可得到一组便于使用的双极性码。

尽管 Logistic 序列生成简单、记录方便且有良好的伪随机性,但仍存在不足。文献[18]指出,Logistic 稳定窗与空白区过于集中,且存在无穷不动点。为了解决这一问题,该文献提出了改进的 2 级映射和一种分段 Logistic 算法,具体公式分别如下：

$$x_{n+2} = r x_{n+1} (1 - x_{n+1}) + (4 - r) x_n (1 - x_n) \tag{9}$$

$$x_{n+1} = \begin{cases} 4\mu(x_n - 0.25)^2, & x_n \in (0, 0.5) \\ 1 - 4\mu(x_n - 0.75)^2, & x_n \in (0.5, 1) \end{cases} \tag{10}$$

其中,  $x_n$  的取值范围均为  $(0, 1)$ ,且分布较为均匀。通过对两种方式进行仿真对比发现,2 级序列的取值范围集中在  $(0.2 \sim 0.9)$  区间上,而分段的 Logistic 取值较为分散,不失一般性,将多次迭代产生的序列自相关函数绝对均值(记为 CR)和迭代值大于 0.5 的比例(记为 NR)作为衡量标准,其中  $R$  为迭代次数,结果如表 1 所列。由表 1 可知,2 级 Logistic 映射在区间  $(0, 0.5)$  和区间  $(0.5, 1)$  上取值的比例失衡;相比之下,分段 Logistic 值分布差别甚微,方便序列量化,量化后序列取值为  $\{+1, -1\}$  的个数大致相等,且自相关函数均值优于前者。

表 1 2 种 Logistic 序列的迭代值分布

Table 1 Iterative value distribution of two logistic sequences

	R	Level 2 mapping	Piecewise mapping
CR	200	0.065	0.045
	1000	0.016	0.014
	10000	0.007	0.006
NR	200	0.70	0.56
	1000	0.70	0.52
	10000	0.69	0.50

### 3.3 利用混沌序列相关性降低 PAPR

自相关性越低的序列经过快速傅里叶变换后出现的平均峰均比越低。OFDM 信号可表示为：

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k C_k \exp\left(j \frac{2\pi kn}{N}\right), 0 \leq n \leq N-1 \tag{11}$$

其中,  $C_k$  代表混沌序列相位因子,其瞬时功率可表示为：

$$\begin{aligned} P_n &= |x_n|^2 \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} |x_k c_k|^2 / N + \\ &\quad \sum_{\substack{p=0 \\ q=0, q \neq p}}^{N-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq p}}^{N-1} x_p c_p (x_q c_q)^* \exp\left(j \frac{2\pi(p-q)n}{N}\right) / N \\ &= P + 2\Re\left(\sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-k-1} x_p c_p x_{q+p}^* c_{q+p}^* \exp\left(j \frac{2\pi(p-q)n}{N}\right)\right) / N \end{aligned} \tag{12}$$

其中,  $\Re(\cdot)$  表示信号的实部,  $P$  为系统平均功率,  $P_n$  的最大值和 PAPR 均值的上界分别如式(13)、式(14)所示：

$$\begin{aligned} P_n &\leq P + 2 \left| \sum_{k=1}^{N-1} \exp\left(j \frac{2\pi kn}{N}\right) \sum_{i=0}^{N-k-1} x_i c_i x_{i+k}^* c_{i+k}^* \right| / N \\ &= L + 2 \sum_{k=1}^{N-1} \left| \sum_{i=0}^{N-k-1} x_i x_{i+k}^* c_i c_{i+k}^* \right| / N \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} E(PAPR) &\leq E\left(1 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} \left| \sum_{i=0}^{N-k-1} x_i x_{i+k}^* c_i c_{i+k}^* \right| / NP\right) \\ &= 1 + 2 \sum_{k=1}^{N-1} \left| \sum_{i=0}^{N-k-1} E|x_i x_{i+k}^* c_i c_{i+k}^*| \right| / NP \\ &= 1 + 2\mathfrak{S} \sum_{k=1}^{N-1} C / NP \end{aligned} \tag{14}$$

其中,  $\mathfrak{S} = E|x_m x_n| (m \neq n)$ ,  $C$  为混沌序列的自相关函数。可以看出,  $PAPR$  的均值大小主要取决于混沌相位序列的自相关函数  $C$ 。由此可得,自相关函数值越小,平均瞬时功率可达到的最大值就越小,但这并不意味着由最小的  $C$  可以得到最小的  $PAPR$ 。为了保证  $C$  的有效性,本文选取多条具有最小  $C$  值的序列来增加降低峰值的概率,从而更好地降低  $PAPR$ 。

本文根据混沌序列自相关函数均值较低的特点,将其与 PTS 算法相结合(CL-PTS),选用自相关性最小的几条序列进行研究,其原理如图 2 所示。

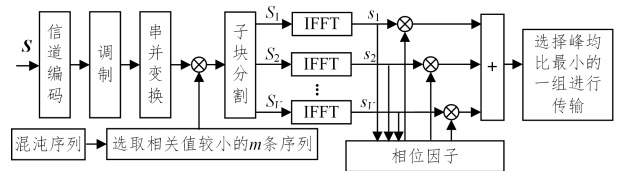


图2 CL-PTS的原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of CL-PTS

该算法的大致思路如下：首先,根据式(10)生成  $M$  条预选混沌序列  $C(i) (i = 1, 2, \dots, M)$ , 选取出使用的混沌序列,记为  $L(i) (i = 1, 2, \dots, m)$ , 其中  $m$  为自相关值最小的一组

序列;然后将该序列与传输信号进行相关操作并进行分块处理,使用次优算法来确定加权因子集合,选出 PAPR 最小的一组序列进行传输。限制  $m \ll M$ , 确保该算法在计算复杂度方面的可行性。

本文方案使用了自相关函数均值最低的数条混沌序列, 因每条序列都要与原始信号进行相关操作并进行分块, 所以导致子块分割部分的 IFFT 变换和加权因子部分的计算量增加。同时, 系统需要传输额外的  $m-1$  组加权因子的相位信息, 导致系统的频谱利用率降低, 因此此方法需要得到进一步优化。

### 3.4 改进的 CL-PTS 算法

本文将 CL-PTS 算法需要进行额外 IFFT 运算和额外相位因子传输的问题总结为多个序列与原始信号进行相关操作的位置不合适。在确定加权因子的过程中, 计算各序列分组的加权因子集合需要进行大量的 PAPR 计算操作, 为了减少运算量, 可以考虑将混沌序列的运算置于加权因子选取之后, 此时只需要进行初始信号的次优加权因子的选取, 其与混沌序列进行的相关操作均被置于子块合并之后。该算法的基本原理如图 3 所示。

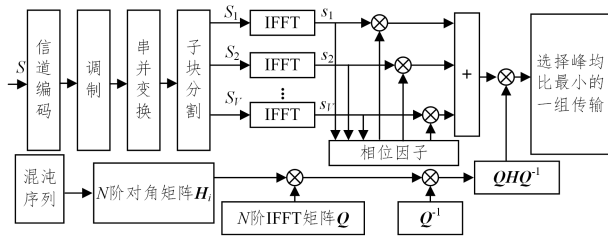


图 3 CM-PTS 降低 PAPR 的原理图

Fig. 3 Principle block diagram of CM-PTS reducing PAPR

由 3.3 节的自相关值推导过程可知, 为了使混沌序列的值参与到傅里叶变化的过程之中, 需要对混沌序列进行规模扩充。若不进行扩充, 则混沌序列将无法与传输信号构成式(11)所示的结构, 后续的自相关值推导就毫无意义。不妨将序列  $L_i$  变换为  $N$  阶对角矩阵, 其对角线上的元素为序列  $L_i$  的各元素依次排列, 记为矩阵  $H_i$ , 该矩阵形式简单, 利于计算, 因此使用此扩充方式进行混沌序列的变换, 如下式所示:

$$H_i = \begin{bmatrix} h_i(1) & & & \\ & h_i(2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & h_i(N) \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $h_i(k)$  ( $1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq N$ ) 是序列  $L(i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 的具体分量值。记相乘后的序列为  $H_i X$ , 可得:

$$x = \text{IFFT}\{X\} = QX \quad (16)$$

$$x' = \text{IFFT}\{H_i X\} = Q(H_i X) \quad (17)$$

其中,  $x$  和  $x'$  分别是信号的时域形式表示,  $Q$  为  $N$  点的 IFFT 矩阵, 其首行首列元素都为 1, 其余位置元素可表示为:

$$W_N^{-(i-1) * (j-1)} \quad (18)$$

$$W_N = e^{-j2\pi/N} \quad (19)$$

其中,  $i$  和  $j$  分别代表矩阵  $Q$  的第  $i$  行和第  $j$  列, IFFT 变换有一个很好的特点, 即:

$$\text{IFFT}\{A \cdot B\} = \text{IFFT}\{A\} \cdot B \neq A \cdot \text{IFFT}\{B\} \quad (20)$$

由此得矩阵  $Q$  有一个很好的性质:

$$Q(A \cdot B) = (QA) \cdot B \neq A \cdot Q(B) \quad (21)$$

根据此性质可得:

$$\begin{aligned} x_i' &= \text{IFFT}\{H_i X\} = Q(H_i X) \\ &= QH_i X = QH_i Q^{-1} x \end{aligned} \quad (22)$$

设矩阵  $QH_i Q^{-1}$  为  $T_i$ , 可得:

$$x_i' = T_i x \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (23)$$

本文方案的具体步骤如下:

(1) 根据式(10)生成  $M$  条待选混沌序列;

(2) 量化序列, 计算每条序列的自相关函数绝对均值, 选择最小的  $m$  ( $m \ll M$ ) 条序列, 记为  $L(i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ );

(3) 根据式(15)以及序列相关性的验证过程, 只能对序列  $L(i)$  进行转化, 生成对角矩阵  $H_i$ ;

(4) 计算  $L(i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), 记为矩阵  $T_i$ ,  $Q$  为  $N$  阶 IFFT 矩阵, 具体生成由式(18)、式(19)给出;

(5) 原始信号  $X$  经过子块分割、IFFT、加权因子选取、子块合并等一系列变换得到时域信号  $x$ ;

(6) 计算  $T_i \cdot x$ , 得到  $m$  组待选序列;

(7) 计算各待选序列 PAPR 值的大小, 选择值最小的一组作为最优序列进行传输。

由式(23)得到信号的变换公式, 通过此变换可将相关操作置于原始信号的 IFFT 变换之后, 减少了 IFFT 的运算次数。本文方案并未对每一个  $T_i x$  都取其次优加权因子, 在降低计算量的同时避免了额外的  $m-1$  组相位信息的传输, 在此对 PAPR 降低效果与系统性能进行了平衡。计算原始序列  $x$  的次优相位因子, 将其作为各序列的公共相位因子, 这会使本方案的效果有所下降, 但在选取相位因子的过程中并未进行额外操作, 大幅度降低了计算量, 且无须传输额外的边信息。

## 4 实验结果分析

### 4.1 计算复杂度

假设  $M$  为 IFFT 个数,  $W$  为相位因子的取值个数,  $m$  为选取的序列个数, 本文方案中的  $m$  为 3。混沌序列的产生需要进行  $3(N-1)$  次复数乘法和  $1.5(N-1)$  次复数加法, 本文预生成 10 条序列。CM-PTS 算法增加了少许计算量的原因就在于混沌序列的生成和变换, 但其消除了最低相关性的不稳定性, 改善了 PAPR 性能, 因此 CM-PTS 算法增加少许计算量是可以接受的。次优 PTS 算法、PTS-WHT 算法、CL-PTS 算法以及 CM-PTS 算法的计算复杂度如表 2 所列, 其末尾常数项不计。

表 2 4 种 PTS 的计算复杂度对比

Table 2 Comparison of computational complexity of four PTS

Algorithm	Number of multiplication	Number of addition
次优 PTS	$(VM+WV^2)N^2$	$VMN^2+VN$
PTS-WHT	$(VM+WV^2+1)N^2$	$(VM+1)N^2+WV^2N$
CL-PTS	$(VM+mWV^2)N^2+30(N-1)$	$(VM+m)N^2+(mW(V^2-V)+15)N$
CM-PTS	$(VM+WV^2+m)N^2+30(N-1)$	$(VM+1)N^2+(W(V^2-V)+15)N$

### 4.2 仿真结果

由表 2 可以看出, 相比 PTS-WHT 算法, CL-PTS 算法

增加的复数乘法计算量约为 $(m-1)WV^2N^2$ ,而 CM-PTS 增加的乘法计算量约为 $(m-1)N^2$ ,其中  $m$  为较小的数,总体而言,该计算量的增加幅度并不大。

本实验中的参数如下:OFDM 符号数为  $1 \times 10^4$ ,子载波数目  $N$  分别取 64, 128, 256, 编码方式采用卷积编码,调制方式为 QPSK, CP 长度为子载波数目的  $1/4$ ,次优加权因子的取值范围设置为  $\{-1, 1\}$ ,子块数目  $V=4$ ,分块方式采用交织分割,混沌序列初始值  $z=0.32$ ,  $u=3.7$ ,每条序列的初值依次增加 0.001,传输信道模拟加性高斯白噪声信道。系统经过 CL-PTS 算法、PTS-WHT 算法以及 CM-PTS 算法的 CCDF 曲线如图 4、图 5 所示。

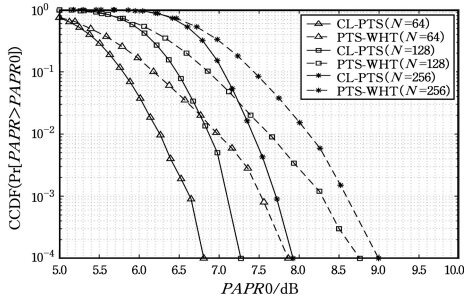


图 4 CL-PTS 与 PTS-WHT 的 CCDF 曲线

Fig. 4 CCDF curves of CL-PTS and PTS-WHT

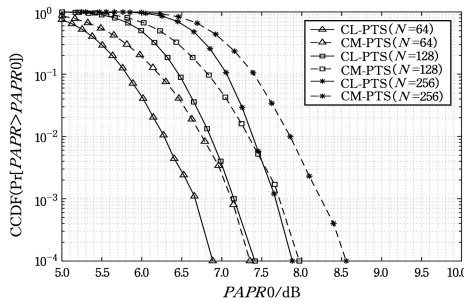


图 5 CL-PTS 与 CM-PTS 的 CCDF 曲线

Fig. 5 CCDF curves of CL-PTS and CM-PTS

由图 5 可知,CL-PTS 算法在  $10^{-3}$  处相比 CM-PTS 算法获得了 0.5 dB 的增益,比 PTS-WHT 算法的效果提升了 1 dB。由本文实验数据的计算量分析可以看出,复数乘法的  $N^2$  量级几乎是 CM-PTS 算法的 15 倍,并且消耗了额外的频谱资源,但只得到了 0.5 dB 的 PAPR 增益,这种折衷方式的性能比显然不合理,因此不再考虑 CL-PTS 算法。

通过再次仿真分析可得,同条件下,CM-PTS 相比 PTS-WHT 算法有 0.5 dB 的增益,比次优多出 1.3 dB 的增益,实验结果如图 6、图 7 所示。

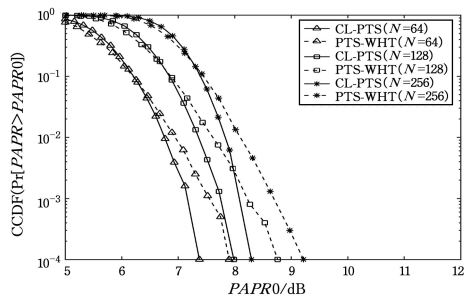


图 6 CM-PTS 与 PTS-WHT 的 CCDF 曲线

Fig. 6 CCDF curves of CM-PTS and PTS-WHT

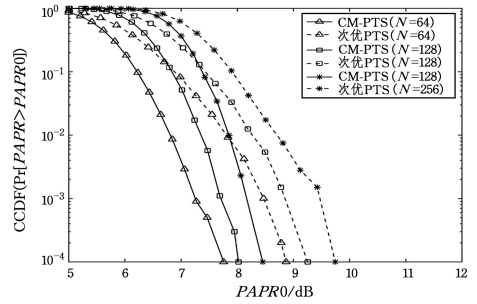


图 7 CM-PTS 与次优 PTS 的 CCDF 曲线

Fig. 7 CCDF curves of CM-PTS and sub optional-PTS

当子载波数目  $N=128$  时,计算次优 PTS 算法、PTS-WHT 算法以及 CM-PTS 算法的误比特率 (BER) 数值,从仿真结果可以看出,CM-PTS 算法的 BER 数值并没有增大,这是因为在整个算法过程中没有进行非线性操作,因此接收端在恢复信号时不易产生失真。图 8 给出了 3 种算法的误比特率曲线。

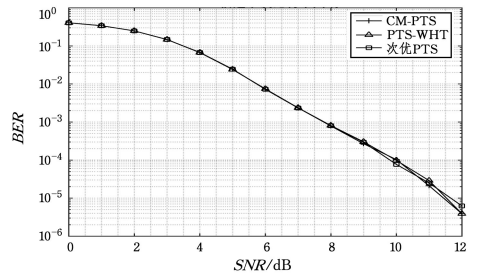


图 8  $N=128$  时的 BER 曲线

Fig. 8 BER curves when  $N=128$

**结束语** 降低峰均比技术作为 OFDM 的一项关键技术,一直备受瞩目。在此背景下,本文对降低峰均比技术进行了研究,仿真分析了次优 PTS 以及 PTS-WHT 算法,并提出了一种基于混沌序列自相关性的算法,该算法在不同的位置使用不同的序列数会产生不同的性能。与同条件下的 PTS-WHT 算法相比,CL-PTS 算法降低 PAPR 的增益约为 1 dB,CM-PTS 算法的增益约为 0.5 dB。相比 CL-PTS 算法,CM-PTS 算法拥有更小的计算复杂度同时不会降低误比特率性能。

尽管 CM-PTS 算法可以有效降低系统的 PAPR 值,但其降低效果取决于选取的序列自相关值以及使用序列的数量,本文通过分析和比较不同类型的 Logistic 映射来进行选取,也可以使用其他混沌映射,但需要确保其迭代值的随机性以及序列的自相关值较小。由于选取的序列数量越多,计算复杂度就越高,因此选取数量也是一个关键问题。本文针对采取何种混沌序列时的效果最佳并未进行实验,也并未进行最佳相位序列数的选取,因此这两方面的内容还需进一步探究。

本文尝试了在 PTS 算法的不同位置插入序列进行优化,针对计算复杂度的问题也进行了一定的改进。该算法在理论上也可以应用于 MIMO-OFDM 系统。结合上述未被解决的两个问题提出优化并与其他降低复杂度的算法级联使用,使系统的计算量更小,同时可以很好地降低系统的 PAPR 值且不会引起误比特率的提升。

## 参 考 文 献

- [1] NOORAZLINA M S, SULONG S M, SAID M S M, et al. Design of MIMO F-OFDM System Model for PAPR Reduction in the Growth of 5G Network [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1793(1): 012067.
- [2] SARKAR M, KUMAR A, MAJI B. PAPR reduction using twin symbol hybrid optimization-based PTS and multi-chaotic-DFT sequence-based encryption in CP-OFDM system [J]. *Photonic Network Communications*, 2021, 41(1): 148-162.
- [3] TAKEBUCHI S, ARAI T, MAEHARA F. A novel clipping and filtering method employing transmit power control for OFDM systems [C]// 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WC/UC). 2012: 221-225.
- [4] CHEN X R, QIU X, CHAI X R. A PAPR Reduction Technique for OFDM Systems Using Phase-Changed Peak Windowing Method; Regular Section [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2021, E104. A(3): 627-631.
- [5] SALEH M A., HAMOOD M T, AHMED M S. Reducing peak to average power ratio (PAPR) of OFDM systems using complex BIFORE precoding transform [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1058(1): 012067.
- [6] MOUNIR M, EL M M B, BERRA S, et al. A Novel Hybrid Precoding-Companding Technique for Peak-to-Average Power Ratio Reduction in 5G and beyond [J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1410.
- [7] YOUSSEF M I, TARRAD I F, MOUNIR M. Performance evaluation of hybrid ACE-PTS PAPR reduction techniques [C]// International Conference on Computer Engineering & Systems. IEEE, 2016.
- [8] PRIYANKA M, MEHBOOB U A. PAPR reduction in OFDM using various coding techniques [J]. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 2018, 15(1): 16-20.
- [9] XIA Y J, JI J W. Low-Complexity Blind Selected Mapping Scheme for Peak-to-Average Power Ratio Reduction in Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Systems [J]. *Information*, 2018, 9(9): 220.
- [10] JUNG S J. Early termination algorithm for SLM-based PAPR reduction schemes in OFDM systems [J]. *IEICE Communications Express*, 2020, 9(11): 535-540.
- [11] TARIK H A, HAMZA A. Low-complexity PAPR reduction method based on the TLBO algorithm for an OFDM signal [J/OL]. *Annals of Telecommunications*, 2020. <https://schlr.cnki.net/zn/Detail/index/GARJ2020/SSJDC378BB48CE7E602DFC5566368DFD9CF7>.
- [12] SARANKUMAR R, SUMATHI K, SAI S G, et al. Reducing Complexity in PTS Scheme using Optimization Techniques to reduce PAPR in OFDM Systems [J/OL]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1074(1).
- [13] HU C, WANG L Y, ZHOU Z. Low-complexity PTS schemes for PAPR reduction in OFDM systems [J/OL]. *IET Communications*, 2020, 14(18). <https://doi.org/10.1049/iet-com.2020.0076>.
- [14] DEEPA D, POONGODI C, SANDHIYADEVI P, et al. Reduction of Peak Power in ofdm Signal Using Cyclic Shifting in Partial Transmit Method [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1084(1): 012049.
- [15] HOSSEINZADEH A M, SHARIFI A A. A novel ant colony optimization algorithm for PAPR reduction of OFDM signals [J/OL]. *International Journal of Communication Systems*, 2020, 34(1). <https://doi.org/10.1002/dac.4648>.
- [16] SUN Q Q, CHEN B J, ZHAO J B. A suboptimal PTS-WHT joint PAPR suppression algorithm [J]. *Applied Science and Technology*, 2020, 47(5): 41-44, 52.
- [17] CAI D, JI X Y, SHI H, et al. Improved piecewise Logistic chaotic mapping method and its performance analysis [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2016, 52(5): 45-51.
- [18] WEI C, SUI A J, FAN J L. An improved piecewise logistic map and its performance analysis [J]. *Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications*, 2012, 17(5): 52-56.



**ZHAO Geng**, born in 1964, Ph. D, professor, Ph. D supervisor, is a senior member of China Computer Federation. His main research interests include chaotic secure communication and information security.



**WANG Chao**, born in 1996, postgraduate, is a member of China Computer Federation. His main research interests include communication system and chaotic secure communication.

(责任编辑:李亚辉)