

降低 OFDM 系统 *PAPR* 的改进 SLM 算法

季策¹, 祝雯靖¹, 魏颖², 贾佃霞¹

(1. 东北大学计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 为了降低正交频分复用系统中 SLM 算法的峰均功率比, 减少边带信息传输, 提高频谱利用率, 首先提出基于转移矩阵和混沌序列的 TL-SLM 算法。TL-SLM 算法有效减少了边带信息的传输, 但 *PAPR* 的降低幅度有限。因此, 进一步提出基于旋转向量的改进 TL-SLM 算法, 即 TR-SLM 算法, 该算法通过旋转向量的引入, 产生更多的时域备选信号, 达到进一步降低 *PAPR* 的目的。性能分析表明, 虽然 TL-SLM 算法和 TR-SLM 算法少量增加了系统的复杂度, 但 *PAPR* 性能得到了有效改善, 而且较大幅度地减少了边带信息的传输。

关键词: 正交频分复用; 转移矩阵; 混沌序列; 旋转向量; 峰均功率比

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018059

Improved SLM algorithm for *PAPR* reduction in OFDM system

Ji Ce¹, ZHU Wenjing¹, WEI Ying², JIA Dianxia¹

1. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China

2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China

Abstract: In order to reduce the peak to average power ratio (*PAPR*) of the conventional selective mapping (SLM) algorithm, decrease the transmission of side-band information, and improve the spectral efficiency in the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system, the TL-SLM algorithm based on the conversion matrix and the chaotic sequence was proposed firstly. Although the TL-SLM algorithm could effectively decrease the transmission of side-band information, the reduction of *PAPR* was limited. To solve this problem, an improved TL-SLM algorithm based on the rotation vector was proposed, which was the TR-SLM algorithm. TR-SLM algorithm introduced the rotation vector to generate more time-domain alternative signals to further reducing the *PAPR*. The performance analysis shows that although the TL-SLM algorithm and the TR-SLM algorithm increase the complexity a little, the *PAPR* performance is effectively improved and the transmission of side-band information is greatly reduced.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing, conversion matrix, chaotic sequence, rotation vector, peak-to-average power ratio

1 引言

正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 是一种多载波调制技术, 由于其具有较高的频谱利用率和较强的抗多径干扰能力等优点, 得到了普遍应用^[1]。但是, OFDM 信号是由多个子载波信号进行叠加而得到的, 因

此, 它会产生很高的峰均功率比 (*PAPR*, peak to average power ratio)^[2]。峰均功率比过大, 势必会增加系统对线性功率放大器的线性放大要求, 使射频功率放大器的效率大幅降低^[3]。因此, 学者们从多方面进行研究与分析, 提出了一些有效降低 *PAPR* 的方法。

当前, 降低 OFDM 系统 *PAPR* 的技术主要包括

收稿日期: 2017-06-29; 修回日期: 2018-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61673093, No.61370152); 沈阳市科技计划基金资助项目 (No.F16-205-1-01)

Foundation Items: The National Nature Science Foundation of China (No.61673093, No.61370152), Science and Technology Foundation Project of Shenyang (No.F16-205-1-01)

预畸变类^[4]、编码类^[5]、概率类技术^[6,7]等。概率类技术中的选择性映射 (SLM, selective mapping) 算法将随机产生的 M 个相位序列与原始 OFDM 信号进行点乘, 对 M 个信号进行快速傅里叶逆变换 (IFFT, inverse fast Fourier transform) 后, 选择时域信号中 PAPR 最小的一路进行传输^[8]。

基于转移矩阵的 SLM 算法^[9,10], 即 T-SLM 算法, 通过加入转移矩阵以产生更多的时域备选序列, 达到改善 PAPR 性能的目的, 但是其计算复杂度会有所增加, 且 T-SLM 算法需要传输所选最优序列的所有相位信息, 系统传输效率较低。针对此类问题, 本文在 T-SLM 算法的基础上, 提出了转移矩阵和混沌序列相结合的 TL-SLM 算法, 以达到在改善 PAPR 性能的同时降低边带信息的目的。但是此算法 PAPR 降低的幅度有限, 因此, 在 TL-SLM 算法的基础上, 又提出了引入旋转向量的 TR-SLM 算法, 使系统能够产生更多的时域备选信号, 进而大幅降低系统的 PAPR, 仿真结果表明了上述算法的有效性。

2 OFDM 系统及传统的 SLM 算法

假设一个 OFDM 系统中包含 N 个子载波, 用 $\mathbf{X} = \{X_0, X_1, \dots, X_{N-1}\}$ 表示 OFDM 系统的输入信号。用 $\mathbf{x} = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$ 表示 OFDM 时域信号序列, 则 \mathbf{x} 可表示为^[11]

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{LN}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi}{LN}nk} \quad (1)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N$, L 为采样系数。

信号的 PAPR 定义为^[12]

$$PAPR_{\text{dB}} = 10 \lg \frac{\max(|x_n|^2)}{E(|x_n|^2)} \quad (2)$$

其中, $\max|x_n|^2$ 表示信号功率的最大值, $E(|x_n|^2)$ 表示信号功率的平均值, PAPR 的单位为 dB。

通常情况下, 使用互补累积分布函数 (CCDF, complementary cumulative distribution function) 来描述 PAPR 的分布情况, 其数学计算式为

$$P(PAPR > z) = 1 - P(PAPR \leq z) = 1 - (1 - \exp(-z))^N \quad (3)$$

OFDM 系统中发射机的信号可以表示为

$$\mathbf{x}_n = \text{IFFT}(\mathbf{X}_n) \quad (4)$$

设 \mathbf{Q} 为 IFFT 矩阵, 则 \mathbf{Q} 具有以下形式。

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N^{-1} & W_N^{-2} & \dots & W_N^{-(N-1)} \\ 1 & W_N^{-2} & W_N^{-4} & \dots & W_N^{-2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_N^{-(N-1)} & W_N^{-2(N-1)} & \dots & W_N^{-(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$, 则式(4)可以表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{Q}\mathbf{X} \quad (6)$$

存在 M 个不同的、长度为 N 的相位旋转向量, 其表示形式如下

$$\boldsymbol{\gamma}_i = [P_0^{(i)}, P_1^{(i)}, \dots, P_{N-1}^{(i)}] \quad (7)$$

其中, $i=1, \dots, M$, $P_u^{(i)} = e^{j\phi_u^i}$, ϕ_u^i 在 $[0, 2\pi]$ 之间均匀分布。传统 SLM 算法原理如图 1 所示, 该算法通过相位旋转向量与发送端数据序列点乘得到 M 个不同的备选信号。

$$\mathbf{S}_i = \boldsymbol{\gamma}_i \mathbf{X} \quad (8)$$

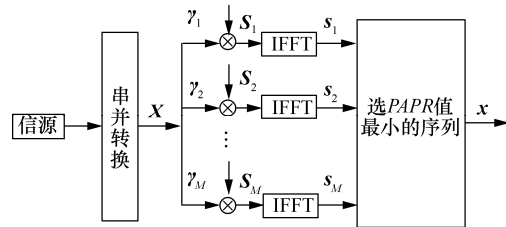


图 1 传统 SLM 算法原理

3 改进的 SLM 算法

3.1 TL-SLM 算法

T-SLM 算法利用转移矩阵和 IFFT 后的信号进行运算, 矩阵运算的原理如图 2 所示。

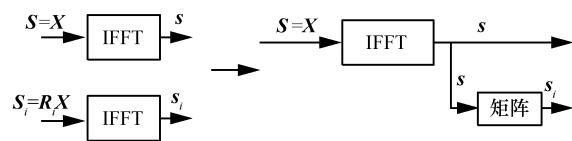


图 2 加入矩阵运算的原理

s 和 s_i 分别是频域信号 $\mathbf{S} = \mathbf{X}$ 和 $\mathbf{S}_i = \mathbf{R}_i \mathbf{X}$ 经过 IFFT 之后的信号。 \mathbf{R}_i 为向量 $\boldsymbol{\gamma}_i$ 对应的相位变换矩阵, 其计算式为

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} P_0^{(i)} & & & 0 \\ & P_1^{(i)} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & P_{N-1}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(8)中的 S_i 也可以表示为

$$S_i = R_i X \quad (10)$$

由图 2 可知式(11)成立。

$$\begin{aligned} s &= \text{IFFT}\{S\} = QS = QX \\ s_i &= \text{IFFT}\{S_i\} = QR_i X \end{aligned} \quad (11)$$

由于 IFFT 矩阵 Q 是可逆的, 由式(11)可得

$$s_i = QR_i Q^{-1} s \quad (12)$$

由式(12)得, 可用转移矩阵 T_i 来代替传统 SLM

算法的 IFFT 模块, 有

$$T_i = QR_i Q^{-1} \quad (13)$$

由文献[9]知, 转移矩阵 T_i 可以表示为

$$T_i = QR_i Q^{-1} = [p_i, p_i^{<1>}, p_i^{<2>}, \dots, p_i^{<N-1>}] \quad (14)$$

其中, $p_i^{<\mu>}$ 是第一列 p_i 循环下移 μ 个元素得到的向量。

$t_i = [1, 1, -1, 1]^T$ 为转移矩阵 T_i 的第一列向量 p_i 的非 0 元素, 由 t_i 得到基向量 p_i 为

$$p_i = [1, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, \underbrace{0, 1, 0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, \underbrace{-1, 0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, \underbrace{0, 1, 0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}] \quad (15)$$

根据式(14)和式(15), 由列向量 p_i 进行循环移位得到矩阵 T_i 。

为了减少传统 SLM 算法及上述 T-SLM 算法边带信息的传输, 本文提出了混沌序列与转移矩阵相结合的 TL-SLM 算法, 该算法使用混沌序列代替 T-SLM 算法中的随机相位序列。混沌序列^[13]的映射方式有很多种, 如 Logistic 映射、Chebyshev 映射和 Tent 映射等。本文使用的混沌序列采用了 Logistic 映射, 该映射是在实际系统中存在的最简单的非线性差分方程, 计算式为

$$L_{k+1} = f(L_k) = 1 - \mu L_k^2 \quad (16)$$

其中, $\mu \in [0, 2]$, $L_k \in (-1, 1)$ 。经研究发现 $\mu \in [1.40015, 2]$ 时, 系统工作于混沌状态, 产生的序列为混沌序列^[14]。此时的 TL-SLM 算法中的相位因子是混沌序列 l , 由于混沌序列的特性, 只需设定一个初始值, 就可以通过迭代得到整个相位序列, 此时, 传输过程中的边带信息只包含一个初始值, 远少于传统 SLM 算法和 T-SLM 算法, 提高了系统的传输效率。TL-SLM 算法的原理如图 3 所示。

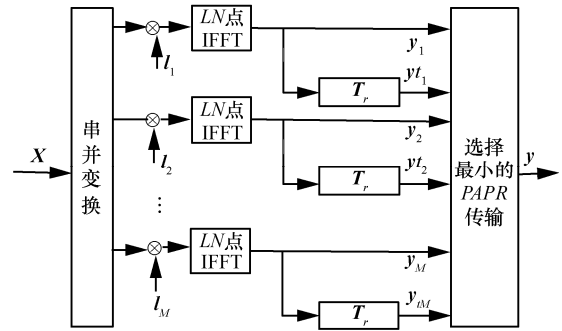


图 3 TL-SLM 算法的原理

3.2 TR-SLM 算法

为了进一步改善系统的 PAPR 性能, 本文又提出了 TR-SLM 算法, 该算法的原理是在 TL-SLM 算法的基础上引入旋转向量 G ^[15], 从而增加时域备选信号的多样性, 达到进一步降低系统 PAPR 的目的。

本文使用了 2 种旋转向量, 第一种旋转向量 G_a 是 $1 \times LN$ 维的向量, G_a 可由 2 个基向量组成, 基向量形式为

$$\begin{aligned} G_{a1} &= \left[-1, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{2}}, 1, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{2}} \right] \\ G_{a2}^0 &= \left[1, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{2}}, 1, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\frac{LN}{2} \geq 1$ 。因此, 旋转向量就可以表示为 $G_a(w, m) = G_{a1} + wG_{a2}^m$, $w \in \{\pm 1, \pm j\}$, G_{a2}^m 可由 G_{a2}^0 向右移位 m 次得到, $m = 0, 1, \dots, \frac{LN}{2} - 1$ 。

第二种旋转向量 G_b 也是 $1 \times LN$ 维的向量, G_b 可由 2 个基向量组成, 基向量形式为

$$\begin{aligned} G_{b1} &= \left[g_{b1}[0], \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, g_{b1}\left[\frac{LN}{4}\right], \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, g_{b1}\left[\frac{LN}{2}\right], \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{2}} \right] \\ G_{b2}^0 &= \left[g_{b2}^0[0], \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, g_{b2}^0\left[\frac{LN}{4}\right], \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, g_{b2}^0\left[\frac{LN}{2}\right], \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

当 $\frac{LN}{4} \geq 1$ 时, $g_{b1}[0] \in \{-1, 1\}$, $g_{b1}\left[\frac{LN}{4}\right] \in \{1 \pm j, -1 \pm j\}$, $g_{b2}^0\left[\frac{LN}{4}\right] \in \{1 \pm j, -1 \pm j\}$ 。对于 $v \in \{\pm 1, \pm j\}$, 得

$$\begin{aligned}
g_{b1} \left[\frac{LN}{4} \right] &= v g_{b2}^0 \left[\frac{LN}{4} \right] \\
g_{b2}^0 [0] &= \frac{-g_{b1}[0]}{v} \\
g_{b1} \left[\frac{LN}{2} \right] &= \frac{j g_{b1}[0]}{\operatorname{Re} \left\{ g_{b1} \left[\frac{LN}{4} \right] \right\} \operatorname{Im} \left\{ g_{b1} \left[\frac{LN}{4} \right] \right\}} \quad (19) \\
g_{b2}^0 \left[\frac{LN}{4} \right] &= \frac{-j g_{b1}[0]}{v^3 \operatorname{Re} \left\{ g_{b2}^0 \left[\frac{LN}{4} \right] \right\} \operatorname{Im} \left\{ g_{b2}^0 \left[\frac{LN}{4} \right] \right\}}
\end{aligned}$$

本文取 $g_{b1}[0]=1$, $v=1$, $g_{b2}^0 \left[\frac{LN}{4} \right]=1+j$, 则

$$\begin{aligned}
g_{b2}^0 [0] &= -1, \quad g_{b1} \left[\frac{LN}{4} \right] = 1+j, \quad g_{b1} \left[\frac{LN}{2} \right] = j, \\
g_{b2}^0 \left[\frac{LN}{2} \right] &= -j, \quad \text{则有}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{G}_{b1} &= \begin{bmatrix} 1, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, 1+j, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, j, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{2}} \end{bmatrix} \\
\mathbf{G}_{b2}^0 &= \begin{bmatrix} -1, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, 1+j, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{4}}, -j, \underbrace{0, \dots, 0}_{\frac{LN-1}{2}} \end{bmatrix} \quad (20)
\end{aligned}$$

因此, 旋转向量就可以表示为 $\mathbf{G}_b(w, m) = \mathbf{G}_{b1} + w \mathbf{G}_{b2}^m$, $w \in \{\pm 1, \pm j\}$, \mathbf{G}_{b2}^m 可由 \mathbf{G}_{b2}^0 向右移位 m 次得到, $m=0, 1, \dots, LN-1$ 。

由于旋转向量由 2 个基向量构成, 并且根据卷积的线性性质, 候选信号序列可以表示为

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}(m_a) &= \mathbf{x} \otimes_{LN} \mathbf{G}_a(w, m_a) \\
&= \mathbf{x} \otimes_{LN} \{ \mathbf{G}_{a1} + w \mathbf{G}_{a2}^{m_a} \} \\
&= \mathbf{x} \otimes_{LN} \mathbf{G}_{a1} + w \{ \mathbf{x} \otimes_{LN} \mathbf{G}_{a2}^{m_a} \} \\
&\equiv \mathbf{A}_{a1} + w \mathbf{A}_{a2}^{m_a} \quad (21)
\end{aligned}$$

其中, \otimes_{LN} 代表 LN 点的卷积运算, $\mathbf{A}_{a1} = \mathbf{x} \otimes_{LN} \mathbf{G}_{a1}$, $\mathbf{A}_{a2}^{m_a} = \mathbf{x} \otimes_{LN} \mathbf{G}_{a2}^{m_a}$, $\mathbf{A}_{a2}^{m_a}$ 可由 \mathbf{A}_{a2}^0 向右循环移位 m_a 次得到。同理得到通过第二种旋转向量产生的候选信号序列 $\mathbf{y}(m_b)$ 。

由式(21)并结合 TL-SLM 算法, 给出 TR-SLM 算法的原理如图 4 所示。

TR-SLM 算法的具体实现过程如下。

- 1) 将原始信号 \mathbf{X} 进行串并变换。
- 2) 将混沌序列 $\mathbf{I}_i = \{L_0, L_1, \dots, L_{N-1}\}$, $i=1, \dots, M$ 与原始信号 \mathbf{X} 进行点乘, 得到表示相同数据信息的

M 路信号。

3) 点乘后的 M 路信号经过 IFFT。

4) 经过 IFFT 后的信号分别通过转移矩阵和旋转向量, 生成 $3M$ 路信号, 因此, 总时域备选信号数目为 $4M$ 。

5) 从 $4M$ 路时域备选信号中选择 PAPR 最小的信号传输。

因此, TR-SLM 算法产生的时域备选信号集合 \mathbf{y}_{all} 可表示为

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}_{\text{all}} &= \{ \underbrace{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_M}_M, \underbrace{\mathbf{y}_{11}, \mathbf{y}_{12}, \dots, \mathbf{y}_{1M}}_M, \\
&\quad \underbrace{\mathbf{y}_{g1}, \mathbf{y}_{g2}, \dots, \mathbf{y}_{gM}}_M, \underbrace{\mathbf{y}_{c1}, \mathbf{y}_{c2}, \dots, \mathbf{y}_{cM}}_M \} \quad (22)
\end{aligned}$$

4 性能分析

4.1 计算复杂度

假设 M 为 IFFT 个数, 则传统 SLM 算法、T-SLM 算法、TL-SLM 算法、TR-SLM 算法的复杂度如表 1 所示。

混沌序列的产生需要 $2(LN-1)$ 次复数乘法和 $LN-1$ 次复数加法, 转移矩阵和旋转向量的复杂度均为 $3LN$ 次复数加法。表 1 中后 2 种算法相比于前 2 种算法复数乘法次数的增加主要源于混沌序列的生成。但是就产生备选信号序列的数目而言, TL-SLM 算法是传统 SLM 算法的 2 倍, TR-SLM 算法是传统 SLM 算法的 4 倍、是 TL-SLM 算法的 2 倍。由 4.2 节的仿真可以看出, TL-SLM 算法和 TR-SLM 算法在降低了边带信息传输的同时, 改善了 PAPR 性能。因此, TL-SLM 算法和 TR-SLM 算法增加少量计算复杂度是可以接受的。

4.2 仿真结果

为了验证改进算法的有效性, 对几种算法进行了 Matlab 仿真对比, 仿真参数设置如下。调制方式为 QPSK 调制, 采样率 L 为 4, 子载波数 N 为 128, 仿真 OFDM 信号数为 10 000。

图 5 给出了当 $M=16$ 时, OFDM 系统经过传统 SLM 算法、T-SLM 算法、TL-SLM 算法及 TR-SLM 算法的 CCDF 性能曲线。由图 5 可知, T-SLM 算法降低 OFDM 系统 PAPR 的效果明显优于传统 SLM 算法; TL-SLM 算法相比于 T-SLM 算法, 性能略有改善; TR-SLM 算法相比于 T-SLM 算法, 性能有大幅度的提升。TR-SLM 算法降低 OFDM 系统 PAPR 的效果明显优于 T-SLM 算法和 TL-SLM 算法。

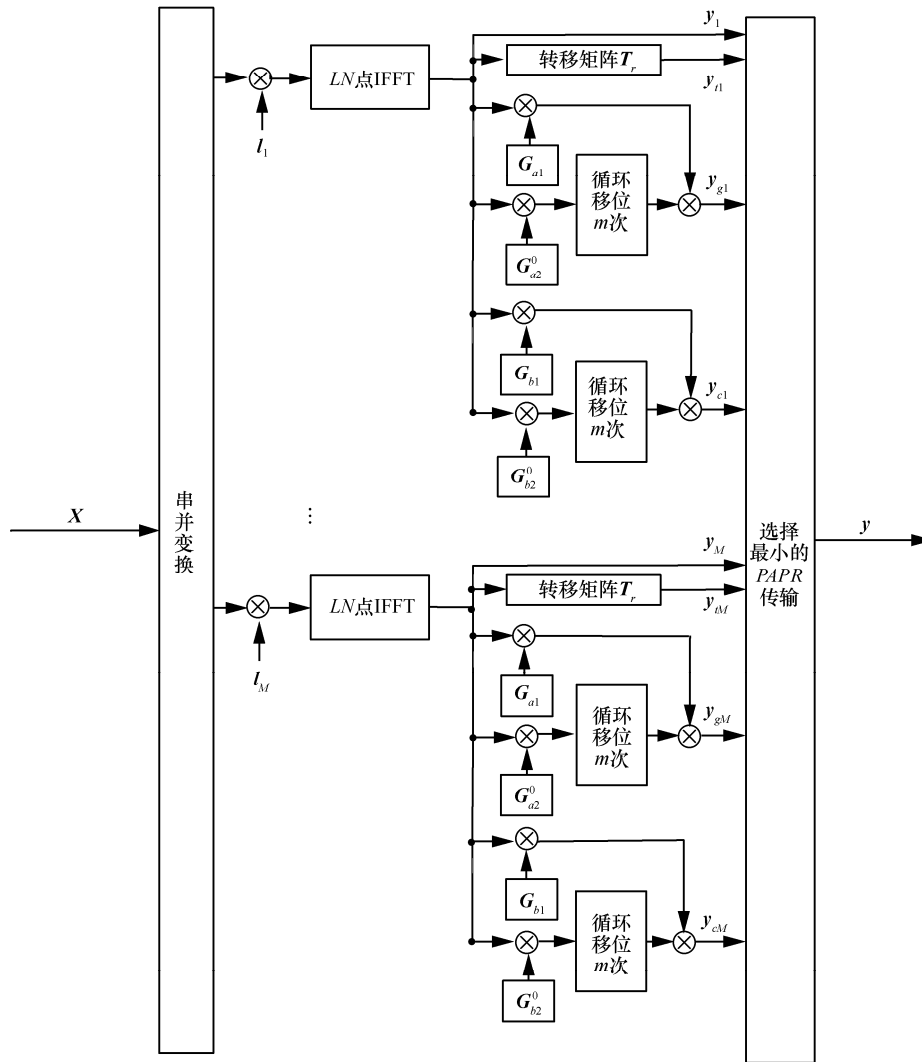


图 4 TR-SLM 算法的原理

表 1 4 种 SLM 算法的复杂度对比

SLM 算法	复杂度	
	复数乘法	复数加法
传统 SLM	$\left(\frac{MLN}{2}\right) \text{lb}(LN)$	$MLN \text{lb}(LN)$
T-SLM	$\left(\frac{MLN}{2}\right) \text{lb}(LN)$	$MLN \text{lb}(LN) + 3MLN$
TL-SLM	$\left(\frac{MLN}{2}\right) \text{lb}(LN) + 2M(LN - 1)$	$MLN \text{lb}(LN) + 3MLN + M(LN - 1)$
TR-SLM	$\left(\frac{MLN}{2}\right) \text{lb}(LN) + 2M(LN - 1)$	$MLN \text{lb}(LN) + 9MLN + M(LN - 1)$

图 6 给出了当 M 分别取 4、16、64 时，TL-SLM 算法和 TR-SLM 算法的 CCDF 性能曲线。由图 6 可知，TL-SLM 算法和 TR-SLM 算法的 $PAPR$ 随着 M

的增加而减小，与传统 SLM 算法 $PAPR$ 随着备选信号数量的增加而减小的趋势一致。

图 7 为 $M=128$ 时，几种算法的系统误码率

(BER, bit error rate) 的对比。由图 7 可知, 传统 SLM 算法、T-SLM 算法、TL-SLM 算法及 TR-SLM 算法的 BER 曲线接近相互重合, 由此可以进一步证明本文所提算法的有效性。

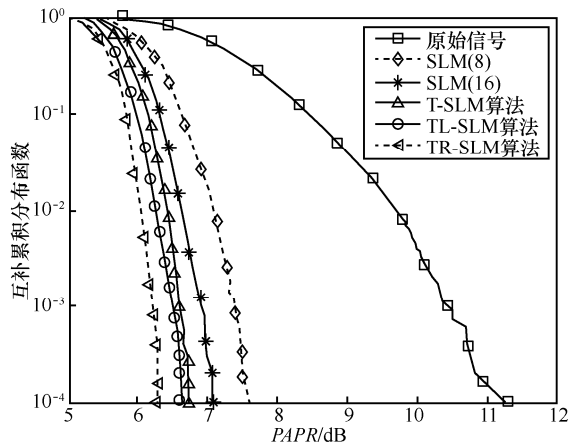


图 5 $M=16$ 时, 几种算法的 PAPR 性能比较

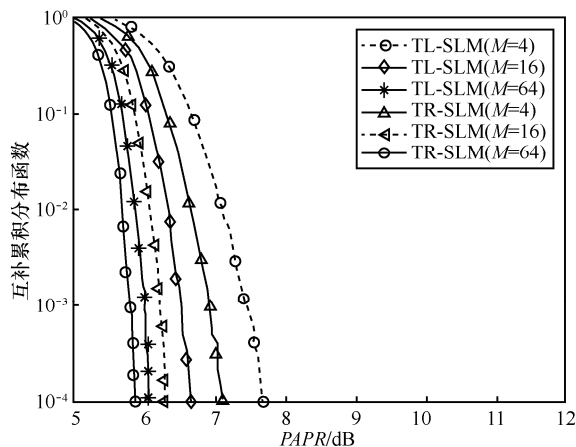


图 6 当 M 取值不同时, TL-SLM 和 TR-SLM 的 CCDF 曲线

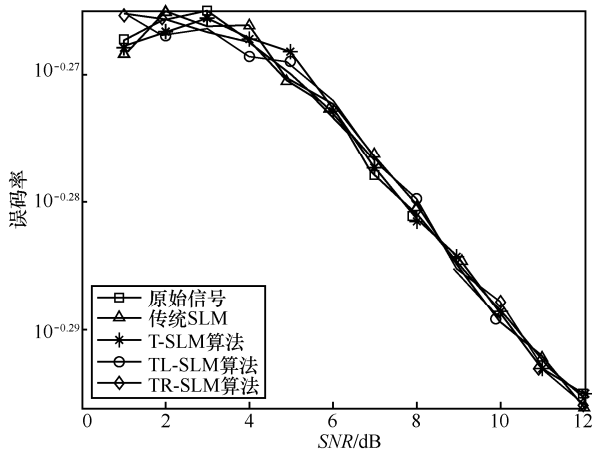


图 7 $M=128$ 时, 几种算法的误码率性能比较

5 结束语

本文提出了 2 种改进的 SLM 算法, 使用混沌序列代替随机相位序列, 减少边带信息的传输, 同时引入旋转向量与 IFFT 后的信号进行运算, 实现时域备选信号数量的扩充, 进一步降低系统的 PAPR。本文引入的旋转向量只增加了部分复数加法运算, 没有增加复数乘法运算。仿真结果表明, 与 T-SLM 算法相比, TR-SLM 算法和 TL-SLM 算法都进一步降低了系统的 PAPR, 并且误码率保持基本不变。

参考文献:

- [1] 蒙文武, 朱光喜, 胡修林, 等. OFDM 系统中低峰均功率比的 SLM 算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(6):63-65.
MENG W W, ZHU G X, HU X L, et al. SLM algorithms for PAPR reduction in OFDM system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(6):63-65.
- [2] 胡武君, 杨霖. MIMO-OFDM 系统中基于循环移位和信号联合的改进 SLM 算法[J]. 通信学报, 2015, 36(4):1-8.
HU W J, YANG L. Modified SLM algorithm based on cyclic shift and signal combination in MIMO-OFDM system[J]. Journal on Communications, 2015, 36(4):1-8.
- [3] 杨霖, 何向东, 刘云云. OFDM 系统中基于盲检测的低复杂度分块 SLM 算法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(1):163-171.
YANG L, HE X D, LIU Y Y. Low complexity block SLM based on blind detection in OFDM systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(1):163-171.
- [4] KELVIN A, CAGRI T, BAMIDELE A, et al. A new approach to iterative clipping and filtering PAPR reduction scheme for OFDM systems[J]. IEEE Access, 2017, PP(99):1-11.
- [5] SGHAIER M, ABDELKEFI F, SILALA M. Efficient embedded signaling through alamouti STBC precoders in MIMO-OFDM system[C]//IEEE Wireless Communication and Networking Conference. 2013: 4053-4058.
- [6] FATHY S A, EL-MAHALLAWY M S, HAGRAS E A A. SLM technique based on particle swarm optimization algorithm for PAPR reduction in wavelet-OFDM systems[C]//32nd National Radio Science Conference (NRSC). 2015: 163-170.
- [7] KANG S L, YOUNG J C, JUN Y W, et al. Low-complexity PTS schemes using OFDM signal rotation and preexclusion of phase rotating vectors[J]. IET Communications, 2016, 10(5):540-547.
- [8] HYUN B J, JONG S N, DONG J S. A low-complexity SLM

scheme using additive mapping sequences for PAPR reduction of OFDM signals[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(4): 866-875.

- [9] CHIN L W, YUAN O Y. Low-complexity selected mapping schemes for peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(12):4652-4660.
- [10] WANG C L, KU S J. Novel conversion matrices for simplifying the IFFT computation of an SLM-based PAPR reduction scheme for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(7):1903-1907.
- [11] NECMI T, MAHMUT Y. A novel parallel artificial bee colony algorithm and its PAPR reduction performance using SLM scheme in OFDM and MIMO-OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10):1830-1833.
- [12] KATAM S, MUTHUCHIDAMBARANATHAN P. Low complexity SLM-PTS method for reduction of PAPR in OFDM systems[C]//3rd International Conference on Eco-friendly Computing and Communication Systems. 2014: 233-237.
- [13] LITVINENKO A, ABOLTINS A. Chaos based linear precoding for OFDM[C]//Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). 2015: 13-17.
- [14] 胡泽鑫, 许柯, 朱晓明, 等. 一种基于混沌序列降低 OFDM 系统 PAPR 方法的研究[J]. 通信技术, 2007,12(40): 63-65.
HU Z X, XU K, ZHU X M, et al. A Chaotic sequence-based method for reducing PAPR of OFDM system[J]. Communications Technology, 2007, 12(40): 63-65.
- [15] LI C P, WANG S H, WANG C L. Novel low-complexity SLM schemes for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(5):2916-2921.

[作者简介]



季策 (1969-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 东北大学副教授, 主要研究方向为盲信号处理和 OFDM 关键技术。



祝雯靖 (1994-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学硕士生, 主要研究方向为 OFDM 关键技术。



魏颖 (1968-), 女, 辽宁本溪人, 博士, 东北大学教授, 主要研究方向为信号处理与分析、计算机视觉等。



贾佃霞 (1991-), 女, 山东临汾人, 东北大学硕士生, 主要研究方向为 OFDM 关键技术。