

基于量子混沌映射降低 OFDM 系统 PAPR 的算法研究

马英杰, 赵耿, 魏占祯, 李兆斌, 鞠磊

(北京电子科技学院, 北京 100070)

摘 要: 针对 OFDM 系统存在较高峰均功率比的问题, 提出基于量子 logistic 混沌映射的改进选择性映射算法, 采用量子 logistic 混沌映射作为随机相位序列矢量, 解决了传统 logistic 混沌映射的不动点和稳定窗问题, 提供数目众多, 具有良好相关特性和随机特性, 易于产生和再生的信号。仿真结果表明所提算法有效降低了系统的峰均比, 扩展了候选序列数量, 减少了冗余信息传输量, 降低了系统的边带功率, 并在 OFDM 技术中具有广阔的应用前景。

关键词: 正交频分复用; 混沌映射; 量子 logistic 改进选择性映射算法; 峰均功率比; 边带功率

中图分类号: TN918

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019008

Research on the algorithm for reducing the PAPR of OFDM system based on quantum chaotic mapping

MA Yingjie, ZHAO Geng, WEI Zhanzhen, LI Zhaobin, JU Lei

Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China

Abstract: Aiming at the high peak to average power ratio (PAPR) problem of OFDM system, a modified selective mapping algorithm based on quantum logistic chaotic map was proposed. To solve the problem of fixed point and stable window, the quantum logistic chaotic maps were used as random phase sequence vectors, which provided a large number signals with fine correlation and random characteristics, easy to produce and regenerate. Matlab simulation results show that the proposed algorithm effectively reduces the PAPR, increases the numbers of candidate signals, cuts down the amount of redundant information transmission, bring down the side band power. The proposed scheme has a broad application prospect in OFDM system.

Key words: OFDM, chaotic map, quantum logistic modified selective mapping algorithm, peak to average power ratio, sideband power

1 引言

正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 技术是一种多载波调制技术, 作为一种可以有效对抗信号波形间干扰的高速传输技术, 是下一代网络物理层的核心技术。但其存在较高的峰值平均功率比 (PAPR, peak to average power ratio) 问题, 导致信号在传输过程中产生非

线性失真, 通信质量下降。目前, 降低 OFDM 系统的 PAPR 一般有三类方法: 信号预畸变技术、编码方法、扰码技术。其中, 信号预畸变法破坏了子载波之间的相位, 编码方法受限于子载波个数和调制方式, 所以扰码技术成为降低 PAPR 的主要方法。

扰码技术中的选择性映射 (SLM, selective mapping) 算法结构简单, 效果显著, 但存在较大的边带信息且运算复杂度较高的不足, 因此, 许多

收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61772047)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61772047)

研究者对 SLM 算法进行改良。文献[1]提出的循环 SLM 算法忽略了边带信息并且只做了一次快速傅里叶逆变换 (IFFT, inverse fast Fourier transform) 变换, 在时域内对原始信号及其周期移位信号相加, 选择最小 PAPR 作为候选信号。文献[2]提出了基于多混沌的时频域加密技术和 SLM 峰均比抑制算法, 采用 Lozi 和 logistic 混沌映射在时频域内扰乱子载波, 并且在 100 km 单模光纤中安全传输 8.9 Gbit/s 的加密 OFDM 信号。文献[3]提出了基于非对称截断光正交频分复用可见光系统的低复杂度最小幅度差译码器, 从而改进 SLM 算法。文献[4]提出了一种降低十六进制正交幅度调制 OFDM 信号峰均比的方法, 该方法将混沌序列与 SLM 算法相结合, 使混沌序列能够控制相位旋转因子的产生。文献[5]提出了基于 Lehmer 随机相位序列矢量的 SLM 改进算法, 将边带信息嵌入到十六进制 PSK 调制信号中进行发送。文献[6]提出了 OFDM 系统中使用 SLM 算法降低峰均比时不需要边带信息估计的接收机检测算法。文献[7]提出改进的 SLM 算法, 将交织离散余弦变换 (IDCT, inverse discrete cosine transformation) 变换与脉冲成形技术结合, 从而降低收发端的 PAPR。文献[8]提出对信号进行时域的循环移位相加减和序列组合的方法来减小 PAPR。文献[9]提出了一种低复杂度的改进 SLM 算法和 μ 律压缩方案, 从而降低正交频分多址接入 (OFDMA, orthogonal frequency division multiple access) 系统的 PAPR 以及计算复杂度。文献[10]提出了一种无边带信息的低复杂度 SLM 改进算法, 从而降低相干光 OFDM 系统的 PAPR。文献[11]提出了一种用于 Alamouti 差分空频分组编码-正交频分复用 (DSFBC-OFDM, differential space frequency block coded-OFDM) 系统的盲差分 SLM 改进算法, 从而降低系统的 PAPR。

在 OFDM 系统中, 信号峰值功率的发生时间不确定, 所以数模变换器和功率放大器需要的线性动态区间较大。然而在实际应用中, 信号幅度远远小于该峰值, 如果以该峰值为指标设计功率放大器, 将大大降低利用率, 增加系统成本。此外, 过高的 PAPR 值会导致信号失真, 破坏子载波的正交性, 产生互调干扰和带外辐射, 严重影响系统的性能。因此, 本文提出基于量子混沌映射的改进选择性映射算法, 旨在降低 OFDM 系统过高的 PAPR。

2 基于量子混沌映射的改进选择性映射算法

2.1 传统 SLM 算法

传统 SLM 算法是一种无失真降低 OFDM 信号峰均比的方法, 具体步骤如下。

步骤 1 设 IFFT 的输入信号为 X , 如式(1)所示。

$$X = (X_0, X_1, \dots, X_{N-1}) \quad (1)$$

发送端产生 M 个不相同且长度为 N 的随机相位序列矢量, 如式(2)所示。

$$P^{(m)} = (P_0^{(m)}, P_1^{(m)}, \dots, P_{N-1}^{(m)}) \quad (2)$$

其中, $m=1, 2, \dots, M$, $P_i^{(m)} = e^{j\varphi_i^{(m)}}$, $\varphi_i^{(m)}$ 在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布。

步骤 2 将这 M 个随机相位序列矢量分别与输入信号 X 进行点乘运算, 得到 M 个不相同且长度为 N 的输出序列, 如式(3)所示。

$$X^{(m)} = XP^{(m)} = (X_0P_0^{(m)}, X_1P_1^{(m)}, \dots, X_{N-1}P_{N-1}^{(m)}) \quad (3)$$

步骤 3 对这 M 个不同的输出序列 $x^{(m)}$ 分别进行 IFFT 运算, 从而得到时域上的 M 个输出序列, 如式(4)所示。

$$x^{(m)} = (x_0^{(m)}, x_1^{(m)}, \dots, x_{N-1}^{(m)}) \quad (4)$$

步骤 4 在这 M 个时域输出序列里选择 PAPR 性能最好的一组。

随着随机相位序列矢量数 M 的增加, 系统进行 IFFT 变换的次数也会增加, 从而增加了传统 SLM 算法的复杂度。当子载波数为 128, 随机相位序列矢量数 M 分别为 2、4、6、8 时, 传统 SLM 算法的 PAPR 性能如图 1 所示。

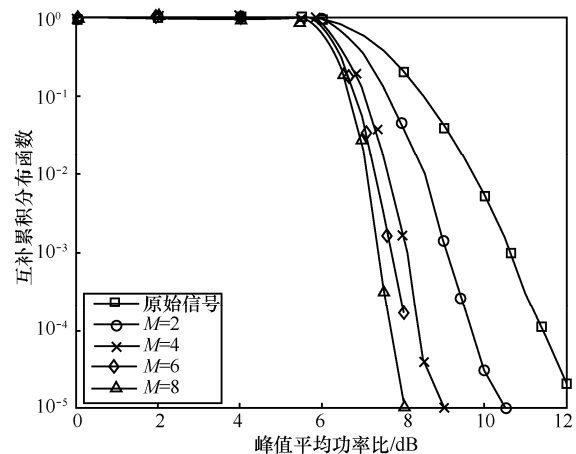


图 1 不同随机相位序列矢量下传统 SLM 算法 PAPR 性能曲线

从图 1 可以看出，传统 SLM 算法的 PAPR 性能与随机相位序列矢量数成正比， M 越大，则系统的 PAPR 性能越好，但是算法的复杂度也会增加。

2.2 量子 logistic 混沌映射

El-Latif 等^[12]通过反冲转子模型方法将传统 logistic 混沌映射量化，产生量子 logistic 混沌映射。本文采用量子 logistic 混沌映射数字化后作为随机相位序列矢量，如式(5)所示。

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1 - (x_n - |x_n|^2) - \alpha y_n \\ y_{n+1} = -y_n e^{-2\beta} + e^{-\beta} \alpha [(2 - x_n - x_n^*)y_n - x_n z_n^* - x_n^* z_n] \\ z_{n+1} = -z_n e^{-2\beta} + e^{-\beta} \alpha [2(1 - x_n^*)z_n - 2x_n y_n - x_n] \end{cases} \quad (5)$$

其中， α 是可调参数， β 是耗散参数， x_n 、 y_n 和 z_n 是系统状态参数， x_n^* 和 z_n^* 是 x_n 和 z_n 的复共轭。当 $\alpha \in (3.74, 4.0)$ ， $\beta \geq 3.5$ ， $x \in (0, 1)$ ， $y \in (0, 0.2461)$ ， $z \in (0, 0.2461)$ 时，系统是混沌态。

本文采用量子 logistic 混沌映射数字化后作为随机相位序列矢量。与传统伪随机序列相比，量子混沌序列可以提供数目众多、易于产生和再生的信号，具有良好的相关性和随机性，克服了传统伪随机码互相关函数存在大量尖脉冲的缺陷。通过引入终端扰动，量子 logistic 混沌映射解决了传统 logistic 混沌映射的不动点和稳定窗问题，提高了浮点运算的精度。

传统 SLM 算法是一种无失真峰均比抑制算法，优点是会导致信号的畸变，但是在系统接收端需要知道所选择的随机相位序列才能解调。所以除了传输数据信息，还需要传输对应的随机相位序列，

大大增加了传输的边带信息，使其在实际应用中受到限制。对于传统 SLM 算法，接收端正确恢复原信号需要传输被选中的随机相位序列矢量，需要传输整个序列，即 $\mathbf{P}^{(m)} = (\mathbf{P}_0^{(m)}, \mathbf{P}_1^{(m)}, \dots, \mathbf{P}_{N-1}^{(m)})$ ，则信息量为 N ；而本文使用量子 logistic 混沌映射产生伪随机序列，序列由初始值迭代产生，只需传输其初始值，降低了运算复杂度，减少了传输的边带信息，从而降低了系统的边带功率。

2.3 量子 logistic 改进选择性映射算法

针对传统 SLM 算法边带功率大，候选序列数量少的缺点，本文提出了量子 logistic 改进选择性映射 (QL-MSLM, quantum logistic-modified selective mapping) 算法，采用分割方法将原始信号分割为实部信号和虚部信号，采用量子 logistic 混沌映射代替传统伪随机序列作为随机相位序列矢量分别与实部信号和虚部信号进行点乘运算，然后进行 IFFT 变换，实部候选序列与虚部候选序列组合后计算 PAPR，选择最小 PAPR 进行传输，具体原理如图 2 所示。

图 2 中，OFDM 数据块为 $s(t)$ ，对串行输入的信号 $s(t)$ 进行符号映射，通过串并变换分成 $2M$ 个子信道，采用分割方法将信号 $s(t)$ 分割为实部信号和虚部信号，分别在 M 个子信道上进行传输。采用量子 logistic 混沌映射生成 M 个不同的长度为 N 的随机相位序列矢量 \mathbf{P} ，则第 m 个随机相位序列矢量为 $\mathbf{P}_m = (\mathbf{P}_{m,0}, \mathbf{P}_{m,1}, \dots, \mathbf{P}_{m,N-1})$ ， $0 \leq m \leq M-1$ 。第 u 个数据块 $s_u(t)$ 分割为实部 $s_{u,r}(t)$ 和虚部 $s_{u,i}(t)$ ，分别与第 m 个随机相位序列矢量 \mathbf{P}_m 点乘运算，然后进行 IFFT

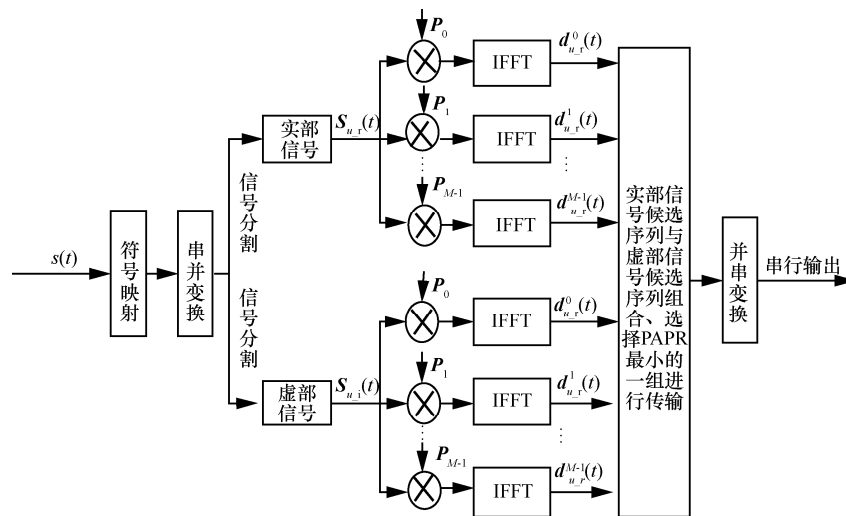


图 2 量子 logistic 改进选择性映射算法的原理

运算, 分别产生候选传输序列 $d_{u_r}^m(t)$, $d_{u_i}^m(t)$ 。

$$d_{u_r}^m(t) = \text{IFFT}(s_{u_r}(t) \otimes P_m) = \text{IFFT}(s_{u_r,0}(t)P_{m,0}, s_{u_r,1}(t)P_{m,1}, \dots, s_{u_r,N-1}(t)P_{m,N-1}), 0 \leq m \leq M-1 \quad (6)$$

$$d_{u_i}^m(t) = \text{IFFT}(s_{u_i}(t) \otimes P_m) = \text{IFFT}(s_{u_i,0}(t)P_{m,0}, s_{u_i,1}(t)P_{m,1}, \dots, s_{u_i,N-1}(t)P_{m,N-1}), 0 \leq m \leq M-1 \quad (7)$$

其中, \otimes 是 2 个矢量间的点乘运算, IFFT 是离散傅里叶逆变换, $d_{u_r}^m(t)$ 是实部候选序列, $d_{u_i}^m(t)$ 是虚部候选序列。

实部信号的候选序列 $d_{u_r}^k(t)$ 和虚部信号的候选序列 $d_{u_i}^g(t)$ 进行线性组合得到候选传输序列 $d_u^{k,q}(t)$, 如式(8)所示。

$$d_u^{k,q}(t) = \alpha_k d_{u_r}^k(t) \pm j_g d_{u_i}^g(t) = \alpha_k \text{IFFT}(s_{u_r}(t) \otimes P_k) \pm j_g \text{IFFT}(s_{u_i}(t) \otimes P_q) \quad (8)$$

如果 $\alpha_k P_k \pm j_g P_q$ 为单位相位序列矢量, 即

$|\alpha_k| = |\beta_g| = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 且正、负极性具有相同的 PAPR,

则有

$$d_u^{k,q}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{IFFT}(s_{u_r}(t) \otimes P_k \pm j s_{u_i}(t) \otimes P_q) = \frac{1}{\sqrt{2}} (d_{u_r}^k(t) \pm j d_{u_i}^g(t)) \quad (9)$$

由式(9)扩展后的候选传输序列 $d_{eu}(t)$ 数量由原来的 M 增加为 M^2 , 具体标识如式(10)所示。

$$d_{eu}(t) = \{d_u^0(t), d_u^1(t), \dots, d_u^n(t), \dots, d_u^{M^2-1}(t)\}, 0 \leq n \leq M^2-1 \quad (10)$$

第 u 个数据块的候选传输序列中选择 PAPR 最小的一组记为 X_u , 则

$$X_u = \arg \min_{0 \leq n \leq M^2-1} \{\text{PAPR}(d_u^n(t))\}, 0 \leq u \leq M-1 \quad (11)$$

故输出序列为

$$X = \sum_{u=0}^{M-1} X_u \quad (12)$$

3 系统数值仿真分析

本文采用 QPSK 调制, 子载波数为 128, 通过

互补累积分布函数 (CCDF, complementary cumulative distribution function) 来描述系统峰均比的分布情况, 采用文献[13]提出的选定数据方法 (SDU, selected data utilization), 根据特定的选择条件来旋转相位因子, 从而对传统 SLM 算法的 PAPR 性能进行改进。本文所提的 QL-MSLS 算法与传统 SLM 算法以及 SDU 算法的 PAPR 性能比较如图 3 所示。本文的数值仿真中, 变量 original 是 1×128 的原始信号 PAPR 值。

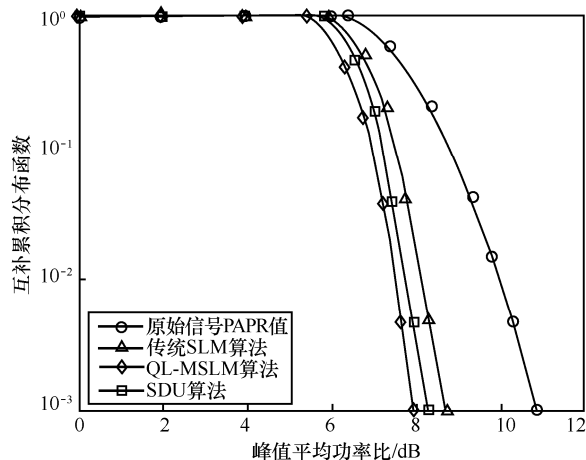


图 3 3 种算法的 PAPR 性能对比

在传统 SLM 算法中, 把 1×128 的原始信号作为输入数据, 复制 L 组点乘随机相位序列矢量, 进行 IFFT 计算, 得到 PAPR 值, 变量 SLM 是 L 组候选序列中最小 PAPR 值。采用随机相位序列矢量的传统 SLM 算法要求传输每个子信道的随机相位序列矢量信息, 因此需要传输的边带信息量非常大, 不仅增加了系统的复杂度, 而且降低了系统的效率。

在本文提出的 QL-MSLS 算法中, 把 1×128 的原始信号作为输入数据, 复制 L 组, 分割数据的实部和虚部, 量子 logistic 映射产生 L 组随机相位序列矢量, 实部信号与虚部信号分别点乘随机相位序列矢量, 然后计算 IFFT 后, 实部数据和虚部数据线性组合。算法把候选序列扩展为 L^2 组, 变量 LSLM 是 L^2 组候选序列中最小 PAPR 值。

从图 3 可以看出, 与传统 SLM 算法以及 SDU 算法相比, 本文提出的 QL-MSLS 算法更加有效地降低了系统的 PAPR。本文算法采用分割方法与线性组合变换扩展了候选序列数量, 减小了算法的计算量, 可以更高效地传输数据。

对于传统 SLM 算法, 要在接收端正确恢复原

信号需要传输被选中的随机相位序列矢量, 需要传输整个序列, 大大增加了边带信息, 增大了边带功率。采用本文提出的 QL-MSLM 算法只需传送量子混沌映射初始值就可以表示一组随机相位序列矢量, 使用 Matlab 仿真的边带功率谱如图 4 所示。

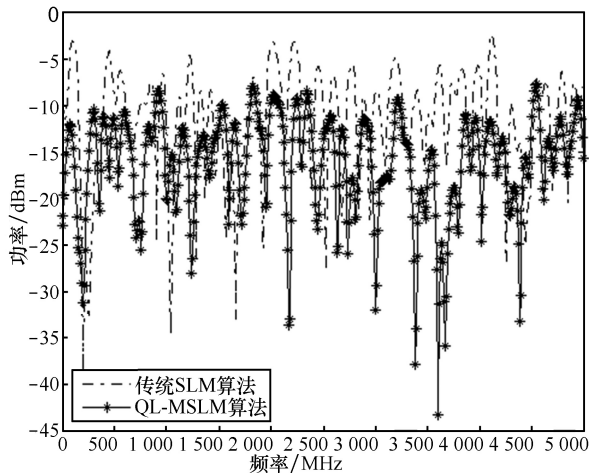


图4 边带功率谱

本文采用量子 logistic 混沌序列替代传统伪随机序列作为随机相位序列矢量, 只需要一个初始值就可以表示一个随机相位序列矢量。量子混沌序列不需要存储每个序列点的值, 有效减少了冗余信息的传输量。提出的算法在传输边带信息时, 只需要传输一个初始值即可, 不需要传输每个子信道的相位信息。从图 4 可以看出, QL-MSLM 算法与传统 SLM 算法相比, 大大降低了边带信息传输量, 减小了边带功率, 提高了系统传输效率。

4 结束语

针对传统 SLM 算法边带功率大, 候选序列数量少的缺点, 本文对传统 SLM 算法进行了改进, 提出了量子 logistic 改进选择性映射算法 (QL-MSLM), 解决了 OFDM 系统的高 PAPR 问题。采用量子 logistic 混沌映射代替传统伪随机序列作为随机相位序列矢量, 解决了传统 logistic 混沌映射的不动点和稳定窗问题, 提供了数目众多、具有良好的相关特性和随机特性、易于产生和再生的信号, 降低了系统的边带功率。采用分割方法将原始信号分割为实部信号和虚部信号, 采用量子 logistic 混沌映射代替传统伪随机序列作为随机相位序列矢量分别与实部信号和虚部信号进行点乘运算, 然

后进行 IFFT 变换, 实部备选序列与虚部备选序列组合后计算 PAPR, 选择最小 PAPR 进行传输。Matlab 仿真结果表明本文提出的算法更加有效地降低了系统的 PAPR, 扩展了候选序列数量, 减小了算法的计算量, 可以更高效地进行数据传输, 有效减少了冗余信息的传输量, 大大降低了边带信息传输量, 减小了边带功率, 提高了系统传输效率, 该方案在 OFDM 技术中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] PAMUNGKASARI P D, SANADA Y. Shift stimation with delayed correlation cyclic-selective mapping (Cyclic-SLM) PAPR reduction in OFDM system[J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 91(2): 739-753.
- [2] XIAO Y Q, WANG Z Y, CAO J, et al. Time- frequency domain encryption with SLM scheme for physical-layer security in an OFDM-PON system[J]. *Journal of Optical Communications and networking*, 2018, 10 (1): 46-51.
- [3] HU W W. SLM-based ACO-OFDM VLC system with low-complexity minimum amplitude difference decoder[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54 (3): 144-146.
- [4] XIAO Y Q, CHEN M, LI F, et al. PAPR reduction based on chaos combined with SLM technique in optical OFDM IM/DD system[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 21: 81-86.
- [5] VAIYAMALAI S, MAHESULA S, DHAMODHARAN S K. PAPR reduction in SLM- OFDM system using Lehmer sequence without explicit side information[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(4): 5527-5542.
- [6] SAHEED A, MCMEEKIN S, BRIAN G. Computational efficient SLM-OFDM receiver for time-invariant indoor fading channel[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(1): 661- 674.
- [7] SUJATHA S, DANANJAYAN P. Modified SLM combined with interleaving and pulse shaping method based on APR reduction using DCT OFDM system[C]//International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies. 2016:101- 105.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] SUDHA V, SYAMKUMAR M, KUMAR D S. A low complexity modified SLM and companding based PAPR reduction in localized OFDMA[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 96(2): 3207-3226.
- [11] YUAN J G, SHEN Q, WANG J X, et al. A novel improved SLM scheme of the PAPR reduction technology in CO-OFDM systems[J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(2): 138-142.
- [12] FALLAHZADEH M, FERDOSIZADEH M. Blind SLM for PAPR reduction of Alamouti DSFBC systems[J]. *IET Communications*, 2017, 11 (3): 451-457.
- [12] AHMED A, LI L, WANG N, et al. A new approach to chaotic image

encryption based on quantum chaotic system, exploiting color spaces[J]. Signal Processing, 2013,93(11):2986-3000.

- [13] MOON J H, NAM Y R, CHOI E J, et al. Selected data utilization technique for the PAPR reduction of FBMC-OQAM signals[C]//2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks . 2017:741-743.

[作者简介]



马英杰 (1979-), 女, 吉林通化人, 博士, 北京电子科技学院讲师, 主要研究方向为混沌保密通信。



魏占祯 (1971-), 男, 青海西宁人, 北京电子科技学院研究员级高级工程师, 主要研究方向为网络安全。



李兆斌 (1977-), 男, 内蒙古锡林浩特人, 博士, 北京电子科技学院副教授, 主要研究方向为网络安全。



赵耿 (1964-), 男, 四川长溪人, 博士, 北京电子科技学院教授, 主要研究方向为新型态密码理论与应用。



鞠磊 (1971-), 男, 山东潍坊人, 博士, 北京电子科技学院副教授, 主要研究方向为网络空间安全。