

基于全程耦合映像格子的 OFDM 系统性能改进算法*

竟诗琦, 陈朝, 苏宇航

(中国地质大学(武汉) 机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 作为仍将在 5G 中发挥重要作用的正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), 由于存在峰均比较高的问题将限制其进一步发展。SLM 算法作为降低峰均比的重要手段, 仍存在带外干扰及高峰值无法完全滤除等缺点。针对上述问题, 提出了基于全程耦合映像格子(Globally Couple Map Lattices, GCML)的 SLM-RCF 联合算法, 该算法充分利用 GCML 良好的相关性、正交性及非周期性对 SLM 算法进行改进, 提高其抗干扰的能力, 并结合迭代限幅滤波算法进一步滤除较高的峰值。理论分析和仿真结论显示, 利用联合算法能够降低带外干扰的影响进一步降低峰均比, 同时能够降低系统误码率, 提高系统的可靠性。

关键词: 正交频分复用; 峰均比; 选择性映射; 全程耦合映像格子

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200057

中文引用格式: 竟诗琦, 陈朝, 苏宇航. 基于全程耦合映像格子的 OFDM 系统性能改进算法[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 99-103.

英文引用格式: Jing Shiqi, Chen Zhao, Su Yuhang. Performance improvement algorithm of OFDM system based on GCML[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 99-103.

Performance improvement algorithm of OFDM system based on GCML

Jing Shiqi, Chen Zhao, Su Yuhang

(School of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430000, China)

Abstract: Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), as a technology that will still play an important role in 5G, will be restricted to its further development due to its high PAPR. SLM algorithm is an important means to reduce PAPR, but it still has some shortcomings such as out-of-band interference and high peak value can't be completely filtered out. In view of the above problems, a SLM-RCF combined algorithm based on GCML is proposed in this paper, the algorithm makes full use of the good correlation, orthogonality and aperiodicity of GCML to improve SLM algorithm to improve its anti-interference ability, and combines with the RCF algorithm to further filter out high peak value. Theoretical analysis and simulation results show that the combined algorithm can reduce the influence of out-of-band interference and further reduce the PAPR, at the same time, it can reduce the system bit error rate, and improve the reliability of system.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; peak to average power ratio; selective mapping; globally couple map lattices

0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是利用不同载波对数据调制的技术, 具有抗射频干扰、频谱效率高等优点^[1], 在 5G 通信中依然发挥着举足轻重的作用。但该技术存在高峰均比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)^[2], 这将导致 OFDM 信号产生非线性失真和系统性能降低的问题。因此, 对降低峰均比算法的研究是本文的主要方向。

降低 PAPR 的技术主要有: 编码类技术、限幅类技术以及概率类技术。编码类技术利用不同的编码方式对 OFDM 信号编码后选取 PAPR 较低的信号, 但传输速率较

低, 不适合子载波数较大的情况; 限幅类技术是将超过某一门限值 n 的信号都限制在该值以下, 这一过程是非线性的, 它将带来严重的带内信号失真和带外辐射^[3]; 概率类技术降低了高峰值出现的概率降, 但仍不能完全消除高峰值。文献[4]提出了一种限幅——噪声压缩方法来对 OFDM 信号修正, 但需要较高的限幅门限; 文献[5]提出了加性映射选择性映射算法(Selective Mapping, SLM), 该算法复杂度较低, 但对降低峰均比无明显效果; 文献[6]提出了一种利用相序集对 SLM 算法进行改进, 但需要将子载波进行分块处理, 增加了算法复杂度; 文献[7]通过利用扰码选择器选择出最适合 SLM 的 OCML 扰码序列, 增加了算法复杂度, 且未与其他时空混沌序列进行对比。因此, 已有的算法难以在不牺牲其他性能的情况下降低

* 基金项目: 装备预研教育部联合基金项目(20180700501); 航天科学技术基金项目(20190700401)

OFDM 的峰均比。

由于 SLM 要求相序集之间相互正交、相关性好且为非周期,本文针对高峰均比问题,在文献[7]的基础上对 SLM 的相序集进行改进,提出了一种基于全程耦合映像格子模型(Globally Couple Map Lattices, GCML)的 SLM-RCF 联合算法,仿真结果显示该算法能够在不改变复杂度的情况下降低 PAPR。

1 系统模型

1.1 传统 SLM 算法模型

传统的 SLM 算法是插入随机扰码序列降低 PAPR。在发送端将 OFDM 信号 X 点乘 M 条长度为 N 的随机扰码序列,获得带有相同信息的 M 条输出 Y :

$$Y^{(x)} = X_n \cdot P_n^{(x)} = X_1 \cdot P_1^{(x)}, X_2 \cdot P_2^{(x)}, \dots, X_N \cdot P_N^{(x)} \quad (1)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N, P_n^{(x)}$ 为扰码序列:

$$P^{(x)} = P_1^{(x)}, P_2^{(x)}, \dots, P_N^{(x)} (x=1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

x 为第几条序列,运用 IFFT 运算转换至时域,得到 M 条时域序列 $y^{(x)}$,选取 M 个时域信号中 PAPR 最低的序列作为传输序列。

计算 SLM 系统的 PAPR 互补累积积分函数(CCDF),具体表达式为^[8]:

$$[P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0)]^M = [1 - (1 - e^{-\text{PAPR}_0})^N]^M \quad (3)$$

式中, PAPR_0 代表峰均比门限值, M 代表点乘次数, N 代表 OFDM 符号长度。

1.2 GCML 时空混沌模型

在 SLM 算法中,不同扰码序列会影响 PAPR 降低程度。通常扰码序列应具有较强的时间自相关性和正交性、非周期等优点^[9]。

目前使用的扰码序列多为伪随机序列,如: m 序列、Gold 序列、Walsh 序列等^[10]。但由于其存在序列相关性差、可用码组少的缺点,并不适合用于子载波数目较大的场合。

时空混沌序列只由初始值和非线性映射决定,具有良好的正交性和自相关性、不变分布性以及非周期性等优点^[11]。被广泛用于研究的是迭代效率高的耦合映像格子模型(Couple Map Lattices, CML)。其定义为:

$$x_{n+1}(i) = (1 - \varepsilon)f(x_n(i)) + \frac{\varepsilon}{2}[f(x_n(i-1)) + f(x_n(i+1))] \quad (4)$$

其中:

$$x_n(0) = x_n(L) \quad (5)$$

x 为系统状态, n 为迭代次数, i 为空间格点数; ε 是耦合系数; L 为 CML 序列尺度; $f(x)$ 为 CML 的非线性映射,可有多重取值,一般取 $f(x) = 1 - ax^2$, a 为非线性强度。

由 CML 衍生出来的两种格子模型为:全局耦合映像格子模型(Globally Coupled Map Lattices, GCML)以及单向耦合映像格子模型(One Way Couple Map Lattices, OCML)。本文采用的 GCML 模型是更高维的时空混沌,其时空混

沌行为如图 1 所示。

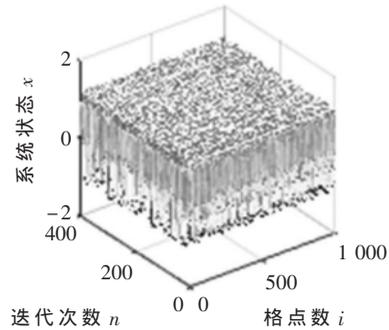


图 1 GCML 系统的时空混沌行为

该序列有简单的结构,且它每个格点之间的作用是具有方向的,一个格点状态发生改变不会对相邻格点产生影响。其序列随机性高于其他序列,具有计算的并行度高、计算效率快的优势^[12]。具体定义如下:

$$x_{n+1}(i) = (1 - \varepsilon)f(x_n(i)) + \frac{\varepsilon}{L} \sum_{j=1, j \neq i}^L f(x_n(j)) \quad (6)$$

式中, n 为空间迭代次数, i, j 为空间上的格点位置 ($i, j \in 1, 2, \dots, L, L$ 是 GCML 序列尺度), ε 是耦合系数, $x_n(i)$ 是第 i 个格点在第 n 次迭代的状态, $f(x) = 1 - ax^2$ 是一维混沌映射, a 为非线性强度^[13]。

2 算法改进

2.1 GCML 改进序列

传统的 SLM 算法以 m 序列、Gold 序列作为扰码序列。但 m 序列长度有限,具有周期性不适合子载波较大的场合。Gold 序列自相关性较差,具有三值自相关性,不利于信号的解调^[14]。故考虑利用 GCML 自相关性良好、产生序列数量多、序列间相互正交且非周期的特点来降低 PAPR。

首先对比分析了 OCML 和 GCML 的相关性。根据动力学复杂行为研究可知,利用 Lyapunov 指数来判断模型是否进入混沌状态。为了保证该指数大于 0,使 GCML 和 OCML 模型能够进入完全混沌状态,所以仿真取参数 $a=1.85, \varepsilon=0.3, n=400, i=1000$,生成的矩阵在时间和空间上都是正交的。图 2 为这两个序列的时间相关性测试结果。

如图 2 所示,GCML 自相关性在 0 值处为一个冲击,且冲击程度较 OCML 更为明显,同时其互相关性在 0 值附近,而 OCML 则偏离零值,说明 GCML 的相关性程度优于 OCML 序列,因此本文利用 GCML 序列对 SLM 算法进行改进。

为了使该序列更好地贴合 SLM 扰码序列特性,首先对 GCML 序列进行改进,对其序列进行二值化处理。图 3 给出了 GCML 的概率密度和概率分布图。

从概率密度图中可以看出,GCML 的概率分布并非对称分布,若采用同 m 序列一样的均值法将其二值化则会破坏其伪随机性。因此利用 GCML 的不变分布特性进

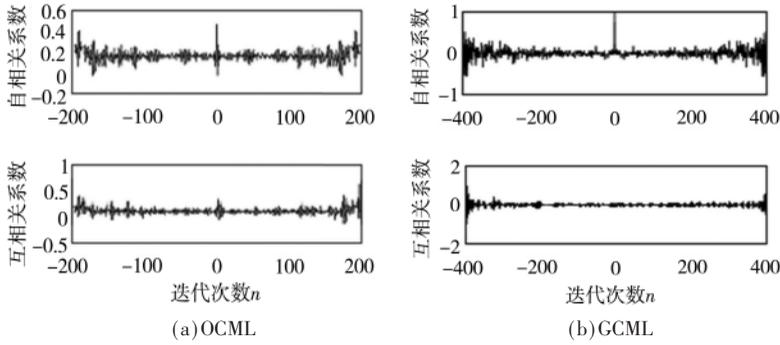
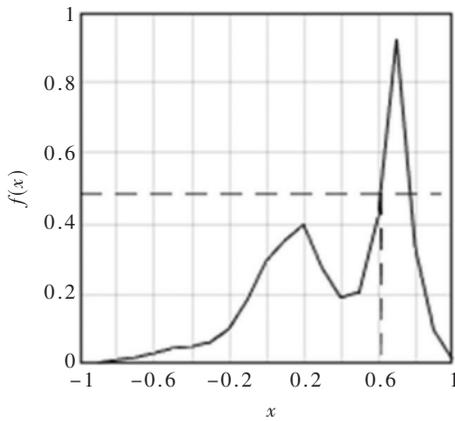
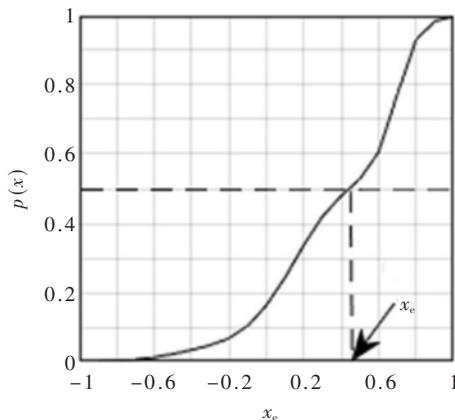


图2 OCML和GCML相关性对比图



(a)GCML时空混沌概率密度图



(b)GCML时空混沌概率分布图

图3 GCML概率密度及概率分布图

行二值化,根据GCML时空混沌序列的不变分布特性,可以找到在概率分布为0.5时所对应的基准值 x_e ,选取对应 x_e ,将系统产生的不同格点不同迭代次数的序列值与基准值对比生成仅含 ± 1 的序列。用 $b_i(k)(i=1,2,\dots,L;k=1,2,\dots,N)$ 表示生成的二值化序列,具体地:

$$b_i(k) = \begin{cases} -1, & x_i(k) < x_e \\ 1, & x_i(k) > x_e \end{cases} \quad (7)$$

式中, i 为选取的空间格点位置, k 为选取的迭代次数。在 ε 和 a 确定时,GCML系统的不变分布是固定的, x_e 是一个确定的常数。GCML系统每进行一次迭代,将每个格点的状态值与 x_e 相比较,大于等于 x_e 取1,小于 x_e

取-1,大于基准 x_e 和小于基准 x_e 的码元数相等,生成二值化后的GCML序列。

2.2 基于GCML扰码序列的SLM-RCF联合算法

基于GCML扰码序列的SLM-RCF联合算法的主要思想是在初始化时生成GCML序列,依据SLM所需的扰码大小将多条GCML序列插入到SLM中,选择出一条PAPR最低的序列,结合RCF算法进行处理,在接收端,得到峰均比最低的序列并计算其误比特率。该算法不仅解决了扰码序列相关性差、序列数量少且周期性循环的问题,并且将SLM算法与RCF算法相结合,能有效消除系统中峰值信号。算法原理图如图4所示。其中,GCML生成序列原理如图5所示。

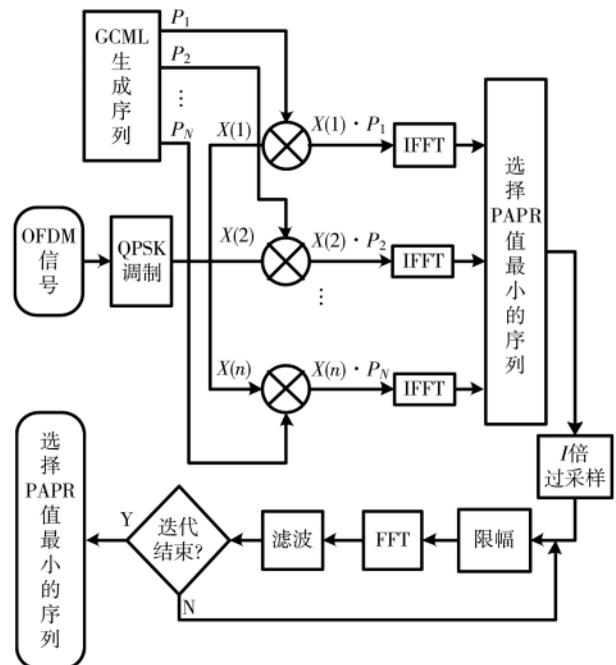


图4 联合算法原理图

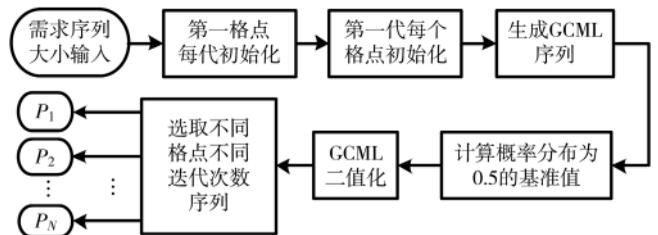


图5 GCML生成序列原理图

该算法主要由扰码序列的产生和插入、SLM算法以及RCF算法三部分构成,具体算法步骤如下:

- (1)计算SLM算法中所需的扰码序列数组大小 n ;
- (2)将发送端生成的OFDM信号插入SLM算法中经QPSK调制映射,生成调制后序列 $X=[X(1),X(2),\dots,X(n)]$;

通信与网络

Communication and Network

(3)根据 SLM 所需序列大小,初始化 GCML 并生成 GCML 扰码序列 P_1, P_2, \dots, P_N ,对该序列进行二值化;

(4)根据所需数组大小将 GCML 扰码序列 P_1, P_2, \dots, P_N 插入到 SLM 算法中并与调制后的 OFDM 序列点乘,得到点乘后的序列 $Y=[Y(1), Y(2), \dots, Y(N)]$;

(5)对点乘后的序列 Y 做 IFFT 变换,计算各支路的 PAPR,选择 PAPR 最低的序列 $Y(m)$ 用于传输;

(6)对所选序列 $Y(m)$ 进行 I 倍过采样;

(7)对采样后序列限幅、FFT 变换及滤波,重复执行步骤(7)直至迭代结束;

(8)计算经迭代限幅滤波后的序列峰均比,并计算其误码率。

3 仿真结果及分析

利用 MATLAB 平台对上述理论分析进行仿真,验证改进后算法的优化程度。仿真参数设置见表 1。

表 1 OFDM 系统仿真参数设置

| 参数名称 | 参数值 |
|------------|-------|
| 子载波个数 | 256 |
| 循环前缀长度 | 128 |
| OFDM 有效长度 | 128 |
| 码元速率/Hz | 1 000 |
| 衰落 | 瑞利衰落 |
| 信道 | AWGN |
| GCML 非线性强度 | 1.85 |
| GCML 耦合系数 | 0.95 |
| 限幅插值因数 | 8 |
| 限幅率 | 4 |

调制方式为 QPSK,计算误码率时使用经联合算法后峰均比最低的序列。

根据上述仿真参数进行设置,对比分析了利用 OCML、GCML 序列作为 SLM 算法扰码序列及原始 SLM 算法的峰均比,如图 6 所示。

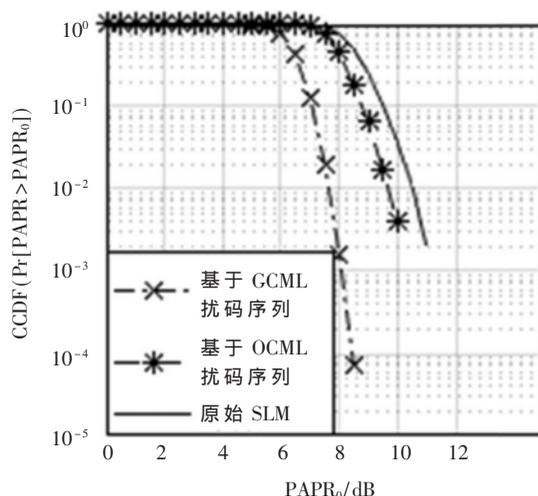


图 6 SLM 不同扰码序列对比图

如图 6 所示,其中 $PAPR_0$ 为峰均比门限值, $CCDF(Pr[PAPR > PAPR_0])$ 为峰均比超过门限值的互补累计分布函数。在互补累计分布函数相同的条件下,利用 GCML 作为 SLM 的扰码序列比 OCML 作为扰码序列以及 SLM 原始模型能够达到更低的峰均比,当其互补累计分布函数达到 10^{-4} 时,峰均比可降低至 8.5 dB。这是由于 GCML 扰码序列自相关性比 OCML 更好,且 GCML 的互相关性相比于 OCML 更接近于零值附近,因此能够更好地满足 SLM 的相序集对序列相关性的要求,也降低了带外干扰的影响。

利用 GCML 扰码序列对 SLM 改进后峰均比最低的序列进行迭代限幅滤波处理。各次迭代的峰均比对比如图 7 所示。

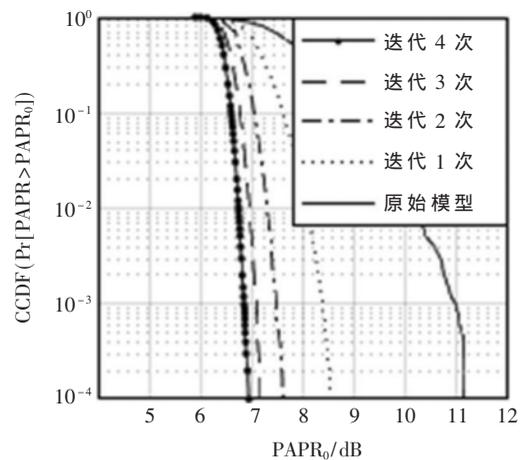
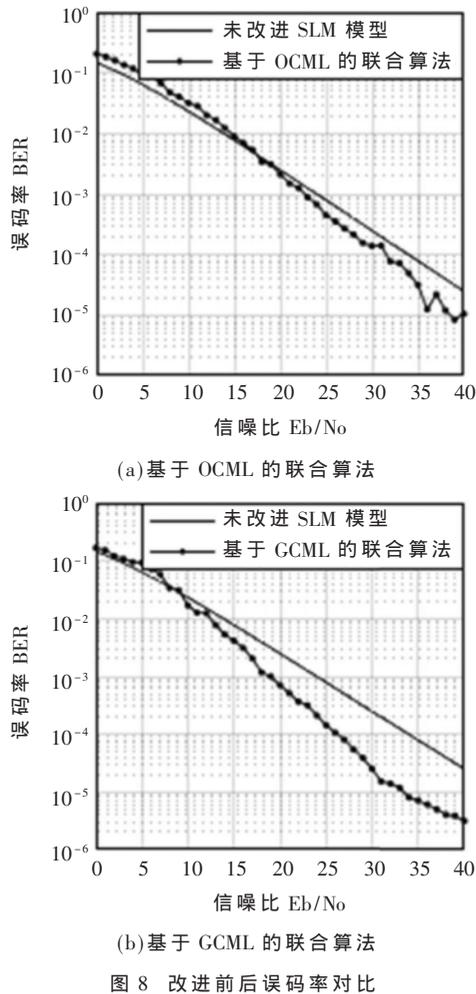


图 7 迭代限幅滤波图

如图 7 所示,经过迭代限幅滤波后,其峰均比在基于 GCML 的 SLM 算法上又有了一定程度的降低。在 CCDF 均为 10^{-4} 的条件下,随着迭代次数的增加其峰均比依次降低。在迭代第 4 次后,峰均比下降幅度减缓,考虑到仿真时间、速率等因素的影响,为使 OFDM 系统性能最大化,因此取迭代 4 次后的信号,在 CCDF 为 10^{-4} 时,其峰均比可以降低至 6.94 dB,相较于原始信号的 11.13 dB 下降了 4.19 dB,比经过 GCML-SLM 联合算法后降低了 1.56 dB。由此可以看出,基于 GCML 的 SLM-RCF 联合算法比单独使用选择性映射(SLM)算法或迭代限幅滤波(RCF)算法产生的峰均比都要理想。

最后对比分析了采用 GCML 扰码序列、OCML 扰码序列以及原始模型的误码率。仿真图如图 8 所示。

如图 8 所示,当 SNR 为 40 dB 时,基于 GCML 的联合算法其 OFDM 系统的误码率能够降至 3.193×10^{-6} ;基于 OCML 的联合算法其 OFDM 系统的误码率在 1.055×10^{-5} ;而原始系统模型其误码率为 2.5×10^{-5} 。由此可以看出,基于 GCML 的 SLM-RCF 联合算法利用 GCML 良好的自相关性、近似于零的互相关性以及序列间良好的正交性对 SLM 算法进行改进,能够有效降低带外干扰;同时结合 RCF 算法,滤除了 SLM 算法未能完全消除的高峰值,



从而提高了 OFDM 系统传输的可靠性,从误码率分析上来看该联合算法是有效可行的。

4 结论

本文在基于 SLM 算法基础上,对 SLM 的相序集进行改进,提出了一种基于全程耦合映像格子的 SLM-RCF 联合算法。该算法利用 GCML 良好的相关性、正交性以及非周期性增强了 SLM 算法的抗带外干扰能力,同时在改进 SLM 算法上结合迭代滤波限幅法消除了 SLM 算法未能完全滤除的高峰值。仿真结果表明,经该联合算法后峰均比相较于未作改进原始模型下降 4.19 dB,同时其误码率也降低至 3.193×10^{-6} ,降低 OFDM 系统 PAPR 的同时增强了传输的可靠性。

参考文献

- [1] 陈颖, 聂伟. OFDM 系统改进的训练序列结构及时频同步算法[J]. 电子技术应用, 2019, 45(6): 89-92, 96.
- [2] SHARIFI A A. PAPR reduction of optical OFDM signals in visible light communications[J]. ICT Express, 2019, 5(3): 202-205.
- [3] 宋小庆, 王慕煜, 邢松, 等. 可见光通信 OFDM 系统 PAPR 抑制技术研究进展[J]. 光通信技术, 2019, 43(12): 1-6.
- [4] TANG B, QIN K, ZHANG X, et al. A clipping-noise

compression method to reduce PAPR of OFDM signals[C]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(8): 1389-1392.

- [5] SINGAL A, KEDIA D. Complexity analysis of SLM PAPR reduction schemes in wireless OFDM system[C]. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai, 2016: 2082-2087.
- [6] KATAM S, MUTHUCHIDAMBARANATHAN P. Modified SLM method for reduction of PAPR in OFDM systems using decimal sequences[C]. 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), Kozhikode, 2015: 1-5.
- [7] 汪寻循, 陈朝, 武江燕. 基于不同扰码降低 OFDM 峰均比的算法研究[J]. 科技通报, 2018, 34(3): 110-114, 119.
- [8] VAIYAMALAI S, DHAMODHARAN S K. Low complexity PAPR reduction in SLM-OFDM system using time domain sequence separation[J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(4): 3111-3115.
- [9] INSOO S. New SLM scheme to reduce the PAPR of OFDM signals using a genetic algorithm[J]. ICT Express, 2016, 2(2): 63-66.
- [10] 孙玉花. 伪随机序列的性质及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [11] ZHANG Y Q, WANG X Y. Spatiotemporal chaos in mixed linear-nonlinear coupled logistic map lattice[J]. Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2014, 402: 104-118.
- [12] GEORGE R T, GOPAKUMAR K. Spatiotemporal chaos in globally coupled NCA map lattices using 3-D arnold cat map for digital image encryption[C]. 2014 ICCSC, IEEE: New York, 2014: 203-208.
- [13] 杨建仁. 基于时空混沌同步的混沌序列安全调制[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [14] 王玉东, 刘春雷. Gold 序列互相关性的新证明及非最大 Gold 序列性质研究[J]. 通信技术, 2014, 47(3): 241-246.

(收稿日期: 2020-01-22)

作者简介:

竟诗琦(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 混沌通信。

陈朝(1974-), 通信作者, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 无线通信, 信道编、译码, 混沌通信, E-mail: chenzhao217@126.com。

苏宇航(1999-), 男, 本科, 主要研究方向: 混沌通信。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所