doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.06.014

引用格式:张晓蓉,吴成茂.基于混沌与自编码相融合扩频码的构造[J].电讯技术,2014,54(6):769-774.[ZHANG Xiao-rong,WU Cheng-mao. Construction of Spreading Code Based on Nonlinear Fusion of Chaotic Mapping and Self-coded Method[J]. Telecommunication Engineering, 2014,54(6):769-774.]

基于混沌与自编码相融合扩频码的构造*

张晓蓉**,吴成茂

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710121)

摘 要:为了提高扩频通信系统数据传输的有效性和安全性,提出了一种混沌映射与自编码非线性融合的思想构造扩频码方法。该方法首先将 Logistic 混沌序列通过改进产生的复合符号混沌序列与自编码算法输出反馈进行逻辑异或,然后与自编码序列经非线性 Henon 映射相融合产生高质量的复合扩频码。以混沌和自编码为基础分析了该方法的有效性,并与现有方法进行比较,提高了序列的相关性和复杂度。在 DS-CDMA 系统中进行仿真验证,结果表明该方法产生的扩频序列抗多径干扰能力更好,并能获得较低的扩频误码率,有利于扩频通信的需要。

关键词:扩频通信;混沌映射;序列自编码;Henon 映射

中图分类号:TN914.42 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-893X(2014)06-0769-06

Construction of Spreading Code Based on Nonlinear Fusion of Chaotic Mapping and Self-coded Method

ZHANG Xiao-rong,WU Cheng-mao

(School of Electronic Engineering,Xi'an University of Posts and Telecommunications,Xi'an 710121,China)

Abstract:In order to improve the effectiveness and reliability of data transmission in spread spectrum communication system, a spread spectrum code which is constructed by the nonlinear fusion of chaotic mapping and self-coded method is proposed. Firstly, it generates a compound symbol sequence through a Logistic chaotic sequence to obtain a xor operator with the feedback of self-coded output, and then to get a high quality compound spread spectrum code by the nonlinear Henon mapping fusion with self-coded sequence. The effectiveness of the method is analyzed based on chaos and self-coded sequence. Compared with existing methods, this algorithm improves the correlation and complexity of the sequence. And simulation in DS-CDMA system shows the method of generating spread spectrum sequence has a better ability of anti-multipath interference, and obtains a lower bit error rate of spread spectrum, which is conducive to the needs of the spread spectrum communication.

Key words:spread spectrum communication; chaotic map;self-coded sequence;Henon map

1 引 言

目前,扩频通信系统的核心问题就是扩频码的构造。扩频系统传输效率、安全性、低截获率、抗干扰能力等优良性能都与扩频码有密切关系。在扩频

* **收稿日期**:2013-12-12;**修回日期**:2014-04-16 Received date:2013-12-12;Revised date:2014-04-16

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(90607008);国家自然科学基金资助项目(61073106);陕西省自然科学基金项目(2014JM8331,2014JQ5183,2014JM8307);陕西省教育厅自然科学资金资助项目(2013JK1129);西安邮电大学研究生创新基金资助项目

Foundation Item:Key Program of the National Natural Science Foundation of China(90607008); The National Natural Science Foundation of China(61073106); The Natural Science Foundation of Shaanxi Province(2014JM8331,2014JQ5183,2014JM8307); Shaanxi Provincial Department of Education Science Funded Project(2013JK1129);Xi'an Institute of Posts and Telecommunications Graduate Innovation Fund Project

** **通讯作者**:971401590@qq.com **Corresponding author**:971401590@qq.com

通信领域,m 序列是广泛应用于直接序列扩频通信的一种扩频码,因其采用移位寄存器产生,其周期短、互相关性差、码组数目有限及序列复杂度低等不足[1],将易被侦破且难以满足多址通信中地址码的要求。Gold 码序列是基于 m 序列的一种改进拟正交码序列,相比具有良好周期相关性,但是码数量依然有限且周期短易被复制和侦测从而使通信保密性差[2]。于是,许多学者研究具有良好复杂性和随机特性的混沌理论在扩频码构造中的应用[3-9],其中 Bateni 等人首次提出混沌映射构造随机 PN 序列并应用于 CDMA 扩频系统[3],后来学者们提出奇偶相关的 Chebyshev 混沌序列[4]、Logistic 混沌序列[5]、拟 Tent 混沌序列[6]、二维 Ikeda 混沌序列[7]、正交混沌码[8]和三维混沌序列[9]等,并应用于扩频系统等,但是混沌序列作为扩频码与传输信源信息无关,不能保证扩频码序列随传输信源信息变化而改变,不利于军事战场环境中信息对抗的需要。所以学者们提出采用线性滤波法从不断变化的信源序列中提取一种自编码随机序列作为扩频码[10-11]应用于扩频通信系统,能保证扩频码与传输信源信息紧密关联,极大地提高了抗扩频码检测能力,但是这种自编码扩频序列存在复杂性低、周期短的缺陷。于是,本文提出了将混沌序列与自编码序列通过 Henon 映射融合获得一种复合扩频码的构造方法。该复合扩频码充分利用了混沌序列和自编码序列的优点,而避免了其缺点,保证了扩频通信系统数据传输的有效性和安全性。

2 扩频通信系统

扩频通信系统框图如图 1 所示,其基本原理是:在扩频系统发送端,随机产生一个二进制信号作为信源,不同的随机序列作为扩频码进行扩频调制,来达到展宽信号频谱目的,频谱被展宽后所得信号经射频调制通过天线发射进入信道。由于 BPSK 调制频带利用率高、实现简单,因此本文射频调制采用 BPSK 调制方式。接收端收到经调制后通过信道输出的信号,与发送端相同的扩频码作为解扩码对接收到的信号进行相关解扩,再进行 BPSK 解调,经判决后就可以正确完成解调输出原始信息。为了统计该扩频系统误码率,BPSK 解调时需将原始数据延迟一个周期与解调信号逐位比较得出误码率。

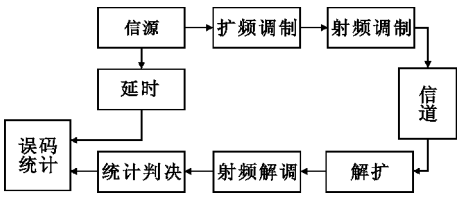


图 1 扩频通信系统框图

Fig. 1 Spread spectrum communication system diagram

3 扩频序列产生

3.1 混沌序列产生

混沌系统是一种非线性动态系统,混沌序列呈随机性、对初始值极其敏感等特点。相比传统伪随机序列,Logistic 混沌映射等所产生的随机序列可提供数量更多、相关性更好、保密性更强且易于产生与再生的信号。Logistic 混沌映射是混沌系统中最为经典的混沌映射,应用也最为广泛,下面简单介绍 Logistic 混沌映射。

Logistic 映射表达式为[12]

$$x_{n+1}=\mu x_n(1-\mu x_n),x_n\in R,n=0,1\cdots \quad (1)$$

其中,参数 μ 是混沌映射参数,若3.569 946$\leqslant\mu\leqslant$4 时, Logistic 映射进入混沌状态;当 $\mu=4$ 时为满映射,其输入和输出都分布在区间(0,1)上。以下采用 Logistic 混沌序列为基础产生复合符号混沌序列。设 $X=\{x_i\}_1^{N_1}$ 是长为 N_1 的符号序列,状态集为 $A=\{a_1,a_2,\cdots,a_k\}$,若 X 在状态集 A 的符号分别由状态集为 $B=\{0,1\}$ 有限序列 $B_1,B_2,\cdots,B_k$ 替换得到长度为 N_2 符号序列,则称 $Y=\{y_i\}_1^{N_2}$ 为复合符号序列[3]。将序列 $Y=\{y_i\}_1^{N_2}$ 长度为 d 子序列视为二进制实数,顺序得到 N_2-d+1 个构成时间序列(Z),则称 Z 为复合符号混沌序列。

3.2 自编码序列产生

自编码序列是采用线性滤波法从不断变化的信源序列中提取一种随机序列作为扩频码应用于扩频通信系统,能保证扩频码与传输信源信息紧密关联且随信源信息发生改变而改变,极大地提高了抗扩频码检测能力,保证了扩频序列的随机性、通信隐蔽性和低截获率。由高度相关观测值组成的时间序列 $u(n)$,通过一系列独立冲激激励函数为 $H(w)$ 的线性滤波器产生,该冲激为零均值高斯白噪声序列,记为 $v(n)$。文中采用 AR 滤波模型为例进行讨论。定义 P 为 AR 滤波器阶数,$A(i)(i=1,2,\cdots,p)$ 为滤波器各阶参数,$r(i)=E[u(n)*u(n+i)]$ 是 $u(n)$ 相

关函数,则AR滤波器参数与自相关函数之间关系用尤利沃克方程表示如下:

$$\begin{pmatrix} r(0) & r(-1) & \cdots & r(-p+1) \\ r(1) & r(0) & \cdots & r(-p+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(p-1) & r(p-2) & \cdots & r(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A(1) \\ A(2) \\ \vdots \\ A(P) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} r(1) \\ r(2) \\ \vdots \\ r(p) \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{R}$ 表示相关矩阵,$\boldsymbol{A}$ 表示滤波器参数矩阵。假设自相关矩阵 $\boldsymbol{R}$ 可逆,可得方程式(2)解为

$$\boldsymbol{A} = -\boldsymbol{R}^{-1} \times r \tag{3}$$

由式(3)得知,求出信源 $u(n)$ 相关矩阵就可求出滤波器各阶参数 $A(i)$ 得到系统函数 $H(w)$ 。若使信源 $u(n)$ 通过系统函数 $1/H(w)$ 反向 AR 滤波器,就可将 $u(n)$ 变换为服从 $N(0,\sigma_v^2)$ 分布高斯白噪声序列 $v(n)$。由于 $v(n)$ 取值连续, 不适用于数字扩频通信,需要对其进行二值量化,得到最终自编码扩频序列 $\{y(n): n=0,1,2\cdots\}$, 即 $y(n)=\begin{cases}-1, v(n)\leqslant 0\\ 1, v(n)>0\end{cases}$。

自编码扩频通信系统 AR-SESS 模型如图 2 所示。

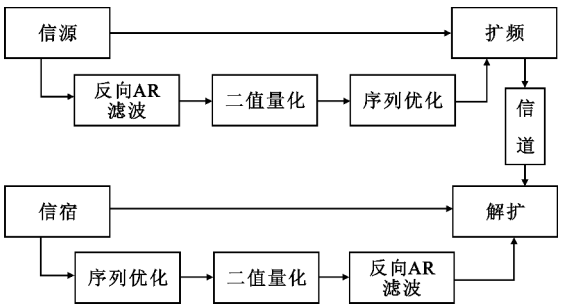


图 2　AR-SESS 系统模型

Fig. 2 AR-SESS system model

3.3　复合扩频序列产生

本文以混沌理论和自编码算法为基础,提出将混沌映射产生的随机序列与自编码序列通过二维 Henon 混沌映射相融合获得一种复合扩频码的构造方法,它兼有混沌随机序列的高复杂性和随机性以及自编码序列的良好相关性和信源关联性,满足高安全性要求的扩频通信需要。产生原理:首先产生一个离散二进制序列通过 AR 线性滤波器产生自编码序列,然后由 Logistic 混沌序列通过改进产生复合符号混沌序列,将该复合符号混沌序列与自编码算法输出反馈值进行逻辑异或运算,最后与产生的自编码序列通过非线性 Henon 函数融合产生复合扩频码。复合扩频码产生原理如图 3 所示。

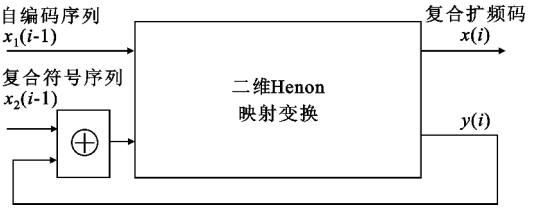


图 3　复合扩频码产生原理图

Fig. 3 Complex spreading code generation diagram

Henon 映射表达式[13]为

$$\begin{cases} x' = 1 + y - ax^2 \\ y' = bx \end{cases} \tag{4}$$

其中,若参数 $a=1.4, b=0.3$ 时,该映射进入混沌状态。将二维 Henon 映射取模处理其表达式[13]为

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + by_n \bmod G \\ y_{n+1} = x_n \bmod G \end{cases} \tag{5}$$

式中,a、b、G 是正整数且 $G=256$,可产生有限域上二维随机序列实现图像置乱、加密等需要。

下面具体介绍复合扩频码生成算法步骤:

Step 1: 将 Logistic 混沌映射迭代 N 次生成伪随机序列,再按照本文 3.1 节所述方法转换成二进制复合符号序列;

Step 2: 对一个迭代 N 次的二进制序列通过本文 3.2 节所述自编码算法产生一个 AR 自编码序列;

Step 3: 当 $i=1$ 时,设置一个初值 $c0$,按照公式(6),将 $c0$ 与 Step 1 产生复合符号混沌序列 $x_2(0)$ 进行比特位逻辑异或运算,再按照公式(7)与(8)生成第一个复合扩频序列 $x(1)$;

在上述公式中,$\mathrm{bitxor}(x_2(0), c0)$ 将 $x_2(0)$ 和 $c0$ 按其二进制值进行比特位异或运算;$\mathrm{mod}(x,y)$ 求 x 除以 y 得到整数商以后的余数,这里 $c0\in[1,255]$,其中取 $c0=235$:

$$y(0) = x_2(0) \oplus c0, \tag{6}$$

$$x(1) = \mathrm{mod}(1 - ax_1^2(0) + by(0), 256), \tag{7}$$

$$y(1) = \mathrm{mod}(x_1(0), 256); \tag{8}$$

Step 4: 当 $i=2$ 时,采用公式(9),将公式(6)中产生结果 $y(0)$ 与 Step 1 产生复合符号序列 $x_2(i-1)$ 进行比特位逻辑异或运算,再按照公式(10)与(11)生成第二个复合扩频序列:

$$y(i-1) = x_2(i-1) \oplus y(0), \tag{9}$$

$$x(i) = \mathrm{mod}(1 - ax_1^2(i-1) + by(i-1), 256), \tag{10}$$

$$y(i) = \mathrm{mod}(x_1(i-1), 256); \tag{11}$$

Step 5: 当 $i>2$ 时,采用公式(12),将 $y(i-1)$ 与 Step1 产生复合符号序列 $x_2(i-1)$ 进行比特位逻辑异或运算,再按照公式(10)与(11)生成下一个复合

扩频序列：

$$y(i-1)=bitxor(x_2(i-1),y(i-1)); \quad (12)$$

Step 6：重复执行 Step 5，直至 $i=N$，即生成长度为 N 的一系列复合扩频码。

4 扩频序列相关性分析

相关性是衡量扩频码特性的一个重要技术指标，对扩频系统性能好坏有着直接影响。对于扩频序列，设$\{a_i\}$与$\{b_i\}$是周期为 N 的两个码序列，即 $a_{N+j}=a_j$，$b_{N+j}=b_j$，码字$\{a_i\}$与$\{b_i\}$的互相关函数 $R_{ab}(k)$的定义式为

$$R_{ab}(k)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}a_ib_{i+k} \quad (13)$$

长度为 N 的码序列$\{a_i\}$的自相关函数 $R_a(k)$的定义式为

$$R_a(k)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}a_ia_{i+k} \quad (14)$$

其中对 Logistic 映射来说其生成的概率密度函数为[14]

$$\rho(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\pi\sqrt{x(1-x)}}, & 0<x<1\\ 0, & x\leqslant 0,x\geqslant 1\end{cases} \quad (15)$$

由 $\rho(x)$可得到 Logistic 混沌序列统计特性，从而得到其相关函数。独立选取两个初值 x_0 和 y_0，则 Logistic 映射产生混沌序列自相关函数为

$$R_{ac}(k)=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}(x_i-\bar{X})(x_{i+k}-\bar{X})=\int_0^1 xf^k(x)\rho(x)\mathrm{d}x-\bar{X}^2=\begin{cases}0.125, & k=0\\ 0, & k\neq 0\end{cases} \quad (16)$$

互相关函数为

$$R_{cc}(k)=\lim_{x\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}(x_{1i}-\bar{X})(x_{2(i+k)}-\bar{X})=\int_0^1\int_0^1 x_1f^k(x_2)-\rho(x_1)\rho(x_2)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2-\bar{X}^2=0 \quad (17)$$

4.1 传统扩频序列的相关性分析

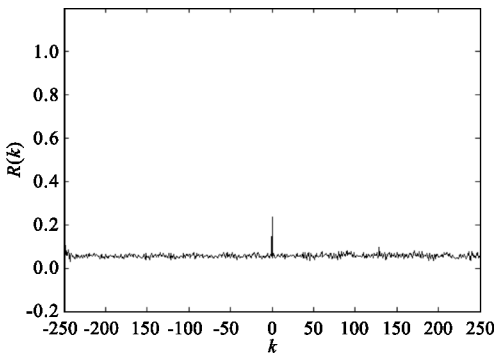
在 Matlab 仿真环境下，对传统伪随机序列相关性进行仿真测试，结果表明，m 序列和 Gold 序列均有很多旁瓣值，其相关性不是很好，但 Gold 序列较 m 序列具有更小的旁瓣值、更小的互相关峰值，其互相关性比 m 序列互相关性好。

4.2 混沌和自编码扩频序列相关性分析

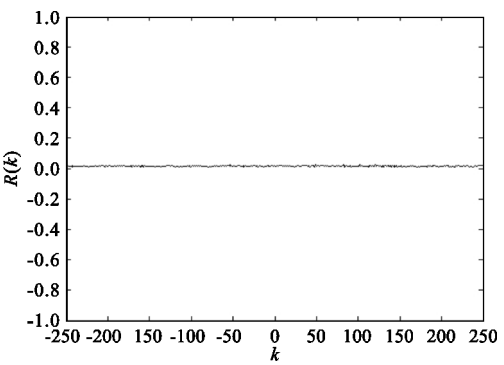
仿真表明，自编码序列有尖锐的自相关特性和良好的互相关特性，相比 Logistic 混沌序列相关性更好，更适宜于扩频通信系统的要求。

4.3 复合扩频序列的相关性分析

图 4 是复合扩频码的相关性。从图中可看出，本文通过融合方法构造的复合扩频码序列自相关峰非常尖锐，自相关函数类似 δ 函数，具有白噪声性能，互相关值非常小，几乎接近于零。相比其他序列有更好的相关特性，说明本文构造的复合随机序列作为扩频通信信息传输的扩频码是可行的，由相关性可知复合扩频序列具有较强的抗干扰能力，有利于扩频通信系统信息的保密安全传输。



(a) 自相关性



(b) 互相关性

图 4 复合扩频码的相关性

Fig. 4 Correlation of complex spread code

5 复合扩频系统的误码性能分析

5.1 复合扩频系统误码率

误码率是衡量通信系统准确度的一个重要指标，本文主要分析不同扩频序列作为扩频码对扩频系统误码率影响。

在高斯白噪声(AWGN)信道中，扩频系统在 BPSK 下的误码率表达式为

$$P_b=Q\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \quad (18)$$

其中，E_b 为符号能量，N_0 为噪声功率谱密度，$Q(x)$为高斯 Q 函数，定义式如下：

$$Q(x)=\frac{1}{2\pi}\int_{x}^{\infty}\exp(-0.5y^2)\,\mathrm{d}y \tag{19}$$

如果功率大小为 P_J 的 $i(t)=A_J\cos(2\pi f_J t)$ 的正弦波是干扰信号,则误码率可近似为

$$P_b=Q\sqrt{2E_b\cdot 1/\frac{P_J}{W}}=Q\sqrt{2E_b/J_0} \tag{20}$$

其中,f_J 是发送信号带宽内的干扰频率,$J_0=P_J/W$ 为能量谱密度,$P_J=A_J^2/2$ 为干扰信号的平均能量,W 为信息序列扩展后的带宽。

加入高斯白噪声的影响,其误码率表达式为

$$P_b=Q\sqrt{2E_b/N_0+P_J/W}=Q\sqrt{2E_b/N_0+J_0} \tag{21}$$

5.2　扩频通信误码率分析测试

本文采用 Matlab 在高斯白噪声(AWGN)信道下实验仿真测试,传输信号是二进制离散化序列,扩频码由以上几种随机序列产生法提供,本文中的扩频调制和扩频解调使用同一扩频码,从而保证两者在时间和相位上同步,但起始时间和初始相位不同。采用信道干扰是信噪比为10 dB、方差 $\sigma^2=N_0/2$ 的高斯白噪声(AWGN)和干扰为 $i(n)=A\sin\omega_0 n$,$A=3$ 的叠加,此系统扩频增益为20 dB。为了得到准确的结果,本文选取传输比特数从 1.0×10^2 逐渐增大直至 1.0×10^4 个观察其结果,并重复多次求其误码率的算术平均值。

5.2.1　传统扩频误码率分析测试

首先研究传统 m 和 Gold 扩频码对扩频系统误码率影响。通过 Matlab 仿真,对信号按比特个数逐位进行扩频,测试在不同传输比特数下的误码率,其结果如表 1 所示。

表 1　伪随机序列在不同传输比特下误码率

Table 1 The bite error rate of pseudo-random sequence in different transmitted symbols

传输比特数	m 序列	Gold 序列
1.0×10^2	0.018 0	0.013 6
3.0×10^2	0.016 7	0.013 2
5.0×10^2	0.015 0	0.012 7
7.0×10^2	0.014 7	0.012 6
9.0×10^2	0.014 5	0.013 0
1.0×10^3	0.013 9	0.013 4
1.0×10^4	0.014 3	0.012 6

由表 1 可知,传统 m 和 Gold 扩频码应用于扩频系统中在不同传输比特数下的误码率分别是0.015 3和0.013 0。相比而言,Gold 序列在扩频系统中误码率低于 m 序列误码率,验证了 m 和 Gold 序列的特性。由于传统扩频码具有一定短周期性和自相关性差、扩频码数量有限等不足,将其作为扩频码不适应未来扩频通信发展需要。

5.2.2　混沌和自编码误码率分析测试

本文采用 Matlab 测试了 Logistic 混沌序列和自编码序列在扩频系统中的误码率,其详细结果如表 2 所示。

表 2　Logistic 及自编码在不同传输比特数下误码率

Table 2 The bite error rate of different chaotic sequence in different transmitted symbols

传输比特数	Logistic 映射	自编码序列
1.0×10^2	0.012 6	0.012 1
3.0×10^2	0.012 4	0.011 8
5.0×10^2	0.012 2	0.011 3
7.0×10^2	0.012 3	0.012 0
9.0×10^2	0.012 0	0.011 2
1.0×10^3	0.012 3	0.011 0
1.0×10^4	0.012 0	0.010 6

由表 2 可知, Logistic 混沌序列误码率平均值约为0.012 3,自编码序列误码率平均值约为0.011 4,表明自编码序列误码率性能较 Logistic 混沌序列误码率性能好,原因在于自编码序列较 Logistic 混沌序列相关特性好,因此所对应误码率低。从表 2 看出不同传输比特数下自编码序列相比 Logistic 混沌序列误码率更低,表明自编码序列可以很好地提高扩频系统可靠性,保证信号传输的准确率,且提高了扩频系统安全性,更有利于扩频通信系统的需要。

5.2.3　复合扩频误码率分析测试

复合扩频码在扩频系统中误码率结果如表 3 所示。

表 3　复合扩频码在不同传输比特数下的误码率

Table 3 The bite error rate of complex spread code in different transmitted symbols

传输比特数	复合扩频码
1.0×10^2	0.010 0
3.0×10^2	0.003 3
5.0×10^2	0.002 0
7.0×10^2	0.001 4
1.0×10^3	0.001 0
1.0×10^4	0.000 2

由表 3 可知,复合扩频码误码率平均值约为0.003 0,相比传统伪随机序列、Logistic 混沌序列和自编码序列误码率都低,说明本文采用非线性融合的方法构造的复合扩频码误码率性能相对最好。原因在于复合扩频码自相关和互相关特性非常好,而以上扩频序列相对比较差(见表 1 和 2)。从表中看出仿真结果与本文理论分析基本吻合。表 3 中随着传输比特数增大,其误码率降低,说明复合扩频码复

杂特性、相关性和保密性较现有扩频序列更好,使得通信系统抗干扰能力、安全性增强,降低了传输信号的截获率,提高了通信隐蔽性和安全性,保证了数据传输速率和可靠性。

6 结 论

本文提出基于混沌与自编码通过非线性 Henon 映射相融合思想构造扩频码方法,该方法充分利用混沌序列与自编码序列各自优点,避免两者缺点,构造的复合扩频具有良好复杂性、长周期性、随机性以及相关性等特性,从而使抗干扰能力更强,在扩频通信系统研究中具有一定意义。通过相关性和误码率的分析测试,揭示了不同扩频码误码率与其统计相关性密切相关,进一步说明了仿真测试与理论结果基本上相吻合,从而验证了该复合扩频码较现有扩频码相关特性更好,能较好地降低扩频系统误码率,保证信号传输的高效率和可靠性,满足了扩频通信需要。已有研究都是对混沌序列和自编码序列进行单一改进,而本文研究将两者非线性融合构造扩频码。将在进一步研究中寻求性能更好、抗干扰能力更强的扩频码构造方法,同时推进在多用户扩频通信、图像加密,特别在军事卫星通信、无人机、战略侦察机等高机密战场环境中的应用。

参考文献:

[1] Hill P C J, Ridley M E. Blind estimation of direct-sequence spread spectrum m-sequence chip codes[C]// Proceedings of 2000 IEEE Sixth International Symposium on Spread Sprectrum Techniques and Applications. Parsippany, NJ: IEEE, 2000: 305-309.

[2] Jack K H. Spread Spectrums for GNSS and Wireless communications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Indurstry, 2013.

[3] Heidari-Bateni G, McGillem C D. Chaotic sequences for spread spectrum: An alternative to PN-sequences[C]// Proceedings of 1992 IEEE Internations Conference on Selected Topics in Wireless Communications. Vancouver, BC: IEEE, 1992: 437-440.

[4] Kohda T, Tsuneda A. Even-and odd correlation functions of chaotic Chebyshev bit sequences for CDMA[C]//Proceedings of the IEEE Internation Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Oulu: IEEE, 1994: 391-395.

[5] WANG Hai, HU Jing-dong. Logistic-Map chaotic spread spectrum sequence[J]. ACTA Electronica Sinica, 1997, 25(1): 19-23.

[6] Jessa M. The period of sequences generated by tent-like maps[J]. IEEE Transactions on Circuits and System—I: Fundamental Theory and Application, 2002, 49(1): 84-88.

[7] Kurian A P, Puthussery S, Htut S M. Performance enhancement of DS/CDMA system using chaotic complex spreading sequence[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(3): 984-989.

[8] Philip I M, Andi S. Chaos Codes vs. Ortho gonal Codes for CDMA[C]//Proceedings of 2010 ISSSTA. Taichung, Taiwan: IEEE, 2010: 189-193.

[9] Nazila R, Siamak T. Performance comparison of chaotic spreading sequences generated by two different classes of chaotic systems in a chaos-based direct sequence-code division multiple access system[J]. IET Communications, 2013, 10(7): 1024-1031.

[10] WEI Mei, LI Zhong-ling, YIN Fei. Analysis and Simulation of AR-SESS System Performance [C]//Proceedings of 2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems. Chengdu: IEEE, 2005: 160-164.

[11] Duraisamy P, Nguyen L. Coded-sequence self- encoded spread spectrum communications[C] //Proceedings of the IEEE Global Tecommunications Conference. Honolulu: IEEE, 2009: 1-5.

[12] 范九伦,张雪峰. 分段 Logistic 混沌映射及其性能分析[J]. 电子学报,2009,29(7):720-725.
FAN Jiu-lun, ZHANG Xue-feng. Sectional Logistic chaotic map and Performance Analysis [J]. Journal of Electronics, 29(7): 720-725. (in Chinese)

[13] 张瀚,王秀峰,李朝晖. 一种基于混沌系统及 Henon 映射的快速图像加密算法[J]. 计算机研究与发展,2005,42(12):2137-2142.
ZHANG Han, WANG Xiu-feng, LI Chao-hui. A fast image encryption algorithm based on chaotic system and Henon map[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(12): 2137-2142. (in Chinese)

[14] 余金峰,杨文革,路伟涛. 满映射 Logistic 数字混沌序列的产生及性能分析[J]. 电讯技术,2013,53(2):140-145.
YU Jin-feng, YANG Wen-ge, LU Wei-tao. Full map generation and performance analysis Logistic digital chaotic sequence [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(2): 140-145. (in Chinese)

作者简介:

张晓蓉(1989—),女,宁夏吴忠人,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为扩频通信技术;

ZHANG Xiao-rong was born in Wuzhong, Ningxia Hui Autonomous Region, in 1989. She is now a graduate student. Her research concerns spread spectrum communication technology.

Email: 971401590@qq.com.

吴成茂(1968—),男,四川人,高级工程师、硕士生导师,主要研究方向为多媒体通信和图像处理、扩频通信技术。

WU Cheng-mao was born in Sichuan Province, in 1968. He is now a senior engineer and also the instructor of graduate students. His research interests include multimedia communications and image processing, spread-spectrum communication technology.