

# 基于一种混沌同步方法的多进制数字信息通信方案\*

钱慧 于洪洁<sup>†</sup>

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系,上海 200240)

**摘要** 本文利用基于线性系统稳定性准则的 SC 混沌比例投影同步方法,提出一种全新的多进制数字信息混沌保密通信方案.将多进制数字信号调制到发送端系统的雅克比矩阵和比例因子中,然后在接收端构造的子系统判断并解调出数字信号.以传输 10 进制数字信息为例,利用 Lorenz 混沌吸引子进行数值模拟仿真,详细分析了通信过程中数字信息的同步性、安全性以及解码精度.仿真结果和数值分析证明了该多进制数字信息混沌调制方案的正确性和有效性.

**关键词** 保密通信, 混沌调制, 数字信息, 投影同步, 雅克比矩阵

DOI: 10.6052/1672-6553-2015-039

## 引言

1990 年美国海军实验室的 Pecora 和 Carroll 第一次观察到混沌同步现象<sup>[1]</sup>,自此关于混沌同步方法和混沌保密通信方案的研究在国际上兴起了二十多年.混沌同步的研究是混沌安全保密通信的基础,其应用于保密通信的基本思路是,在发送端将传输信号隐藏在混沌信号中,在接收端则通过混沌特性解调出传输的有用信息.由于混沌信号非周期性、宽频带的特点,外界一般会把有用信息信号误认为是噪声信号,所以很难被窃取.要想解调出发送的信息信号,只有掌握了通信双方的同步控制约定后方能做到,达成保密效果.

自混沌同步现象被发现以来,海内外学者做了很多深入的研究,多种不同类型的同步现象相继被提出. Mainieri 和 Rehacek 于 1999 年指出驱动和响应系统可以同步到一个尺度因子上<sup>[2,3]</sup>,此种同步现象即为投影同步. 2006 年, Yu、Peng 和 Liu 根据线性系统稳定性准则,提出了一种新的实现混沌投影同步的方法(SC 比例投影同步方法)<sup>[4]</sup>.该方法不仅适用于三维耦合部分线性系统,同时也适用于高维甚至超混沌系统.只要配置于线性项中的雅克比矩阵 A 所有特征值均具有负实部,驱动系统和响应系统即可以达到投影同步.该方法中 Lyapunov

函数不需要构造,系统条件 Lyapunov 指数也不用去计算,雅克比矩阵 A 也可在较广范围内配置,所以此投影同步方法简单而有效.

混沌掩盖、混沌调制、混沌键控和扩频通信是目前提出和发展的四种基于混沌同步的保密通信技术. Cuomo 和 Oppenheim 等<sup>[5]</sup>于 1993 年构造出了一种基于混沌掩盖技术的保密通信模拟试验电路,混沌掩盖多用于传输模拟信号.混沌键控在键控式数字通信方案中研究较多.扩频通信技术最早应用于军事通信领域.混沌调制方法于 1993 ~ 1995 年被提出<sup>[6]</sup>,是一种针对数字信号的通信方案,信息信号隐藏于整个混沌信号谱,对参数变化的敏感性更大,但系统的保密性得到了改善.

本文研究的重点是混沌参数调制方法.混沌参数调制是在系统某些参数中隐藏所传输的信息信号,使系统的运动轨迹在不同混沌吸引子之间变动,于接收端恢复相应的参数来提取所传输的信息信号<sup>[7]</sup>. Yang 和 Chua 在 1996 年提出了一种适用一般信号调制的混沌参数调制方案<sup>[8]</sup>,并对蔡氏电路实施了混沌参数调制方案的数值仿真. Chee 和 Xu 利用投影同步把多进制数字信息调制进比例因子中<sup>[9]</sup>,在接收端成功地解码出数字信息.文献 [10]提出了一种基于统一参数混沌系统的参数调制新方法,该方法没有利用混沌同步原理,数据传

2015-01-27 收到第 1 稿,2015-04-04 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(10802030)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: yuhongjie@sjtu.edu.cn

输速率不受同步误差时间的限制. 文献[11]提出一种多通道混沌调制模拟-信息转换结构, 该结构显著提高了高稀疏度信号的重构性能. 此外, 最近几年国内外在混沌调制领域还出现了很多重要的新进展和新尝试<sup>[12-15]</sup>.

本文将基于 SC 混沌比例投影同步方法, 设计一种传输多进制数字信息的混沌参数调制方案. 首先对发送端混沌系统适当分离配置出线性项和非线性项, 令配置于线性项的雅克比矩阵  $\mathbf{A}$  特征值实部均为负, 然后将多进制数字信息调制到发送端系统的雅克比矩阵  $\mathbf{A}$  和比例因子  $\alpha$  中, 从而控制输出的混沌载波信号, 使其在传输过程中不停地在  $N$  个混沌信号之间来回切换, 最后在接收端构造的子系统判断并解调出数字信息. 文中将利用 Lorenz 混沌吸引子构造 10 进制数字通信系统的发送端和接收端, 用 Matlab 软件做数值模拟仿真, 分析通信过程中的收敛性和误码率, 验证该方法的有效性.

## 1 SC 比例投影同步方法<sup>[4]</sup>

考虑一个如下描述的混沌系统:

$$\dot{x} = f(x(t)) \quad (1)$$

其中  $x(t) \in R^n$  是混沌系统的  $n$  维状态向量,  $f: R^n \rightarrow R^n$  定义了一个  $n$  维向量场. 将函数  $f(x(t))$  分解如下:

$$f(x(t)) = \hat{A}x(t) + \hat{h}(x(t)) \quad (2)$$

其中函数  $\hat{A}x(t)$  是  $f(x(t))$  的线性部分,  $\hat{h}(x(t))$  则是  $f(x(t))$  的非线性部分. 然后将  $\hat{A}x(t)$  进行适当分离配置:  $\hat{A}x(t) = Ax(t) + \bar{A}x(t)$ . 这里  $A$  是满秩的常数矩阵, 且配置其所有特征值均具有负实部,  $\bar{A}x(t)$  则是线性函数  $\hat{A}x(t)$  的剩余部分. 令函数  $g(x(t)) = Ax(t)$ ,  $h(x(t)) = \bar{A}x(t) + \hat{h}(x(t))$ , 则混沌系统(1)作为驱动系统可被重新描述为:

$$\dot{x}(t) = g(x(t)) + h(x(t)) = Ax(t) + h(x(t)) \quad (3)$$

然后构造一个新的系统作为响应系统:

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= g(w(t)) + h(x(t))/\alpha \\ Aw(t) + h(x(t))/\alpha \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $w(t) \in R^n$  是所构造新系统的  $n$  维状态向量,  $\alpha$  是比例因子, 为任意非零常数. 定义两个系统的同步误差为  $e(t) = x(t)/\alpha - w(t)$ , 其解由如下的

等式确定:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t)/\alpha - \dot{w}(t) = \\ A(x(t)/\alpha - w(t)) &= Ae(t) \end{aligned} \quad (5)$$

显然  $e(t)$  的零点即是系统的平衡点. 由于雅克比矩阵  $\mathbf{A}$  的所有特征值均具有负实部, 根据线性系统的稳定性判定准则, 同步误差系统(5)在零点渐近稳定, 即当  $t \rightarrow \infty$ ,  $e(t) \rightarrow 0$ , 此时驱动系统的状态向量  $x(t)$  和响应系统的状态向量  $w(t)$  按照指定比例  $\alpha$  达到同步, 即有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x/\alpha - w\| \rightarrow 0, \text{ 或 } \frac{x_i}{w_i} = \alpha, i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

## 2 多进制数字信息混沌调制设计方案

对于连续的混沌系统(1), 按照式(2)和(3)先将微分方程右端分离出线性项和非线性项, 再根据线性部分适当配置雅克比矩阵  $\mathbf{A}$ , 并建立矩阵集合

$$\Psi = \{A^{(i)} \mid i=1, 2, 3, \dots\} \quad (7)$$

其中  $A^{(i)}$  是由混沌系统线性部分不同元素配置出的雅克比矩阵, 都是实满秩矩阵, 且它们的所有特征值均具有负实部, 从而保证构造的接收端子系统能够和混沌发送端系统达到同步.

建立数字集合

$$\Phi = \{N \mid N=0, 1, 2, 3, \dots\} \quad (8)$$

使得  $\Psi \rightarrow \Phi = H(\psi)$  是一一对应关系, 并令比例因子  $\alpha = N + 1$ . 当在通信系统发送端采用不同雅克比矩阵配置时, 由式(4)可知发送端输出的混沌载波信号  $h(x(t))/\alpha$  也是不一样的. 因此只有在接收端系统的线性部分配置相同雅克比矩阵时, 保密通信系统发送端和接收端才能在混沌载波信号的驱动下达到比例投影同步. 因为集合  $\Phi$  中的每一个数字  $N$  都对应着集合  $\Psi$  中的每一种雅克比矩阵配置  $A^{(i)}$  和一个比例因子  $\alpha$ , 所以只要掌握了事先制定的映射规则和调制方式, 便可以在通信系统的接收端解调出所传输的数字信息.

图1是  $M=10$  进制混沌调制数字通信系统示意图.  $m(t)$  是所需传输的 10 进制数字信息, 其被调制进通信系统的发送端, 控制发送端输出的混沌载波  $h(x(t))/\alpha$ , 虚线框内是构造的接收端 10 个子系统. 对应关系有:

$$\begin{aligned} N &= H(A^{(i)}) = i - 1; \\ N &= \alpha - 1 \end{aligned} \quad (9)$$

当发送端系统传输某个数字信息  $N$  时, 其相应雅克比矩阵配置为  $A^{(i)}$ , 比例因子  $\alpha = N + 1$ , 输出的

混沌信号是  $h^{(i)}(x(t))/(N+1)$ . 在通信系统接收端,构造的 10 个子系统同时接收混沌驱动信号  $h^{(i)}(x(t))/(N+1)$ ,子系统  $j$  的动力微分方程为:

$$\dot{w}^{(j)}(t) = \mathbf{A}^{(j)} w^{(j)}(t) + h^{(i)}(x(t))/(N+1) \quad (10)$$

所以在数字信号  $N$  的传输期间时,接收端的 10 个子系统中,只有子系统  $j(j=i)$  与发送端系统达到比例投影同步,其余 9 个子系统  $j(j \neq i)$  则无法与发送端系统同步.

对于 10 进制数字  $N, N \in m(t)$ ,由于  $N$  被调制进比例因子  $\alpha: \alpha = N+1$ ,则在通信系统接收端中与发送端系统达到比例投影同步的第  $j(j=i)$  个子系统可解调出 10 进制数字信息  $N: N = \alpha - 1, N \in \hat{m}(t)$ ,以此输出解码信息  $\hat{m}(t)$ . 传输过程中的调制和解调如下:

$$m(t) \xrightarrow[\alpha = N+1]{i = N+1} \mathbf{A}^{(i)} \xrightarrow{j=i} \text{子系统 } j \xrightarrow{N = \alpha - 1} \hat{m}(t) \quad (11)$$

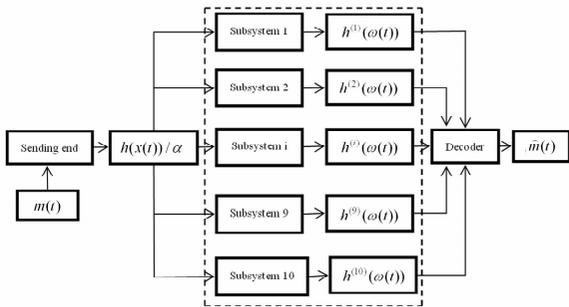


图 1 10 进制数字信息混沌调制通信过程示意图

Fig. 1 Process of 10-ary digital communication based on chaotic modulation

从表 1 中可以看出,每传输一个 10 进制数字就等于传输了 4 个 2 进制的位码,信息传输速率是 2 进制数字信息传输的 4 倍.

表 1 10 进制数字对应的 2 进制符号、雅克比矩阵和比例因子

Table 1 Digital symbol, Jacobian matrix and scaling factor of the corresponding decimal value

Digital symbol	Decimal value	Jacobian matrix	Scaling factor $\alpha$
0000	0	$\mathbf{A}^{(1)}$	1
0001	1	$\mathbf{A}^{(2)}$	2
0010	2	$\mathbf{A}^{(3)}$	3
0011	3	$\mathbf{A}^{(4)}$	4
0100	4	$\mathbf{A}^{(5)}$	5
0101	5	$\mathbf{A}^{(6)}$	6
0110	6	$\mathbf{A}^{(7)}$	7
0111	7	$\mathbf{A}^{(8)}$	8
1000	8	$\mathbf{A}^{(9)}$	9
1001	9	$\mathbf{A}^{(10)}$	10

### 3 数值仿真

利用 Lorenz 吸引子构造 10 进制数字通信系统的发送端和接收端. Lorenz 混沌系统可用如下微分方程表示:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \sigma(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2 &= -x_1 x_3 + \gamma x_1 - x_2 \\ \dot{x}_3 &= x_1 x_2 - b x_3 \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $\sigma = 16, \gamma = 45.92, b = 4$ .

建立 10 进制数字信息集合

$$\Phi = \{N | N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\} \quad (13)$$

同时建立雅克比矩阵集合与相应的比例因子  $\alpha$  集合

$$\begin{aligned} \Psi &= \{\mathbf{A}^{(i)} | i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}; \\ \Theta &= \{\alpha | \alpha = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\} \end{aligned} \quad (14)$$

映射规则如(9):

$$N = H(\mathbf{A}^{(i)}) = i - 1;$$

$$N = \alpha - 1$$

通信系统发送端按照(3)式分离配置为

$$\dot{x} = \mathbf{A}^{(i)} x + h^{(i)} x(t) \quad (15)$$

其中  $\mathbf{A}^{(i)} \in \Psi$ .

传输的混沌载波信号为

$$s = h^{(i)}(x(t))/\alpha \quad (16)$$

按照方程(10)构造的 10 个接收端子系统为

$$\begin{aligned} \dot{w}^{(j)}(t) &= \mathbf{A}^{(j)} w^{(j)}(t) + h^{(i)}(x(t))/\alpha, \\ j &= 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 \end{aligned} \quad (17)$$

令所需传输的 10 进制数字信息为  $m(t) = [0, 1, 5, 7, 2, 6, 4, 3, 8, 5, 9, 3]$ , 其中  $m_i \in \Phi$ .  $m(t)$  中每一个数字信息持续 10 个时间单位. 用 Matlab 自带的微分方程求解器 ode45 做数值分析时,通信系统的发送端取初始值为  $x_0 = [-2, 1, 5]$ ,接收端子系统 1~10 分别取初始值为  $w_0^{(1)} = [2, -1, 4], w_0^{(2)} = [-1, -1, 3], w_0^{(3)} = [2, 3, 4], w_0^{(4)} = [1, 5, 2], w_0^{(5)} = [2, 6, 3], w_0^{(6)} = [0, 1, 1], w_0^{(7)} = [1, 4, 3], w_0^{(8)} = [-3, 2, -1], w_0^{(9)} = [2, 1, 1], w_0^{(10)} = [1, 2, 3]$ . 表 2 中第 1 列是接收端 10 个子系统所配置的雅克比矩阵. 这 10 个雅克比矩阵的特征值相同,均为负实数,特征值为  $\lambda_1 = -16, \lambda_2 = -1, \lambda_3 = -4$ . 从  $\mathbf{A}^{(1)}$  到  $\mathbf{A}^{(10)}$  矩阵元素  $\mathbf{A}_{12}$  以 2 递增,  $\mathbf{A}^{(1)}$  是最简单的对角型配置,  $\mathbf{A}_{12}^{(1)} = 0, \mathbf{A}_{12}^{(10)} = 18$ . 表 2

的第三列是传输不同数字信息时发送端系统输出的混沌载波信号  $h^{(i)}(x(t))/\alpha$ , 在传输过程中混沌信号在这 10 个不同载波信号之间来回切换.

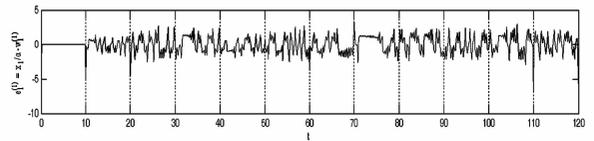
表 2 不同配置的雅可比矩阵、比例因子和混沌传输信号

Table 2 Jacobian matrix, scaling factor and transmitted chaotic signal with different configuration

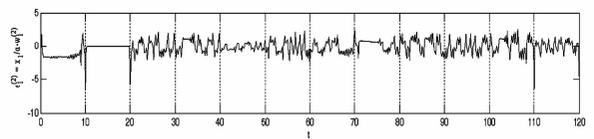
$i$	$\mathbf{A}^{(i)}$	$\alpha$	$h^{(i)}(x(t))/\alpha$
1	$\begin{bmatrix} -\sigma & & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	1	$\begin{bmatrix} \sigma x_2 \\ \gamma x_1 - x_1 x_3 \\ x_1 x_2 \end{bmatrix}$
2	$\begin{bmatrix} -\sigma & 2 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	2	$\begin{bmatrix} (\sigma - 2)x_2/2 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/2 \\ (x_1 x_2)/2 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} -\sigma & 4 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	3	$\begin{bmatrix} (\sigma - 4)x_2/3 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/3 \\ (x_1 x_2)/3 \end{bmatrix}$
4	$\begin{bmatrix} -\sigma & 6 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	4	$\begin{bmatrix} (\sigma - 6)x_2/4 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/4 \\ (x_1 x_2)/4 \end{bmatrix}$
5	$\begin{bmatrix} -\sigma & 8 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	5	$\begin{bmatrix} (\sigma - 8)x_2/5 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/5 \\ (x_1 x_2)/5 \end{bmatrix}$
6	$\begin{bmatrix} -\sigma & 10 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	6	$\begin{bmatrix} (\sigma - 10)x_2/6 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/6 \\ (x_1 x_2)/6 \end{bmatrix}$
7	$\begin{bmatrix} -\sigma & 12 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	7	$\begin{bmatrix} (\sigma - 12)x_2/7 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/7 \\ (x_1 x_2)/7 \end{bmatrix}$
8	$\begin{bmatrix} -\sigma & 14 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	8	$\begin{bmatrix} (\sigma - 14)x_2/8 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/8 \\ (x_1 x_2)/8 \end{bmatrix}$
9	$\begin{bmatrix} -\sigma & 16 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	9	$\begin{bmatrix} (\sigma - 16)x_2/9 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/9 \\ (x_1 x_2)/9 \end{bmatrix}$
10	$\begin{bmatrix} -\sigma & 18 & \\ & -1 & \\ & & -b \end{bmatrix}$	10	$\begin{bmatrix} (\sigma - 18)x_2/10 \\ (\gamma x_1 - x_1 x_3)/10 \\ (x_1 x_2)/10 \end{bmatrix}$

图 2 显示的是在通信过程中, 接收端 10 个子系统与发送端系统的投影同步误差随时间发展历程. 图 2(a) 显示接收端子系统 1 在时间  $0 < t < 10$  内与发送端系统状态变量投影同步误差迅速收敛为 0, 达到投影同步, 而在其它时间范围内投影同步误差为混沌解, 不为 0. 从另外 9 张图中也可以看出在时间  $0 < t < 10$  时, 子系统  $i(i=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)$  与发送端系统不同步, 说明在时间  $0 < t < 10$  内所传输的数字信息是  $N=0$ . 图 2(b) 显示接收端子系统 2 在时间  $10 < t < 20$  与发送端系统达到投

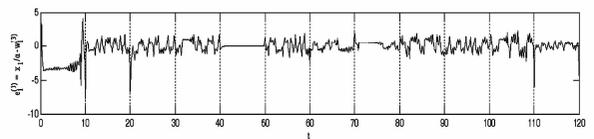
影同步, 在其它时间范围内不同步. 另外 9 张图中也可发现在时间  $10 < t < 20$  内, 子系统  $i(i=1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)$  与发送端系统不同步, 说明在时间  $10 < t < 20$  内所传输的数字信息是  $N=1$ . 图 2(c) 显示接收端子系统 3 只有在时间  $40 < t < 50$  时与发送端系统达到投影同步, 且在此时间范围内其余子系统  $i(i=1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9)$  与发送端系统不同步, 说明在时间  $40 < t < 50$  内所传输的数字信息是  $N=2$ . 同上述分析, 从图 2(d) 可以判断出在时间  $70 < t < 80 \cup 110 < t < 120$  内, 所传输的数字信息是  $N=3$ . 图 2(e) 可判断出在时间  $60 < t < 70$  内, 所传输的数字信息是  $N=4$ . 图 2(f) 可判断出在时间  $20 < t < 30 \cup 90 < t < 100$  内, 所传输的数字信息是  $N=5$ . 图 2(g) 可判断出在时间  $50 < t < 60$  内, 所传输的数字信息是  $N=6$ . 图 2(h) 可判断出在时间  $30 < t < 40$  内, 所传输的数字信息是  $N=7$ . 图 2(i) 中可判断出在时间  $80 < t < 90$  内, 所传输的数字信息是  $N=8$ . 图 2(j) 中可判断出在时间  $100 < t < 110$  内, 所传输的数字信息是  $N=9$ . 将以上分析结果与图 3(a) 所示传输的 10 进制数字信息  $m(t)$  作比较, 发现接收端没有误码输出.



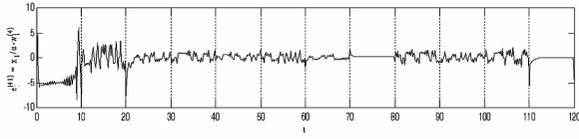
(a) 子系统 1 与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(1)} = x_1/\alpha - w_1^{(1)}$   
(a) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 1 and the transmitter



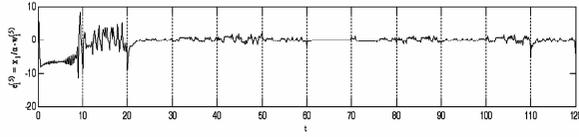
(b) 子系统 2 与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(2)} = x_1/\alpha - w_1^{(2)}$   
(b) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 2 and the transmitter



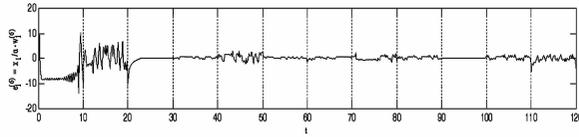
(c) 子系统 3 与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(3)} = x_1/\alpha - w_1^{(3)}$   
(c) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 3 and the transmitter



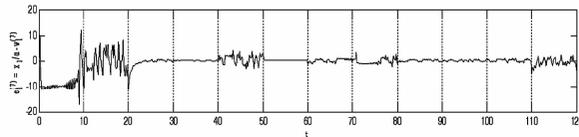
(d) 子系统4与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(4)} = x_1/\alpha - w_1^{(4)}$   
 (d) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 4 and the transmitter



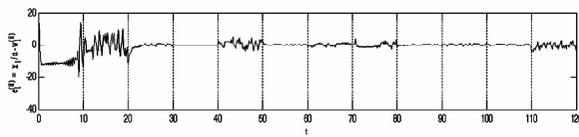
(e) 子系统5与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(5)} = x_1/\alpha - w_1^{(5)}$   
 (e) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 5 and the transmitter



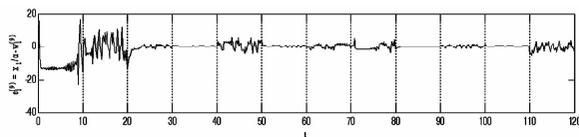
(f) 子系统6与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(6)} = x_1/\alpha - w_1^{(6)}$   
 (f) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 6 and the transmitter



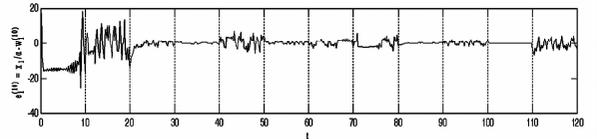
(g) 子系统7与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(7)} = x_1/\alpha - w_1^{(7)}$   
 (g) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 7 and the transmitter



(h) 子系统8与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(8)} = x_1/\alpha - w_1^{(8)}$   
 (h) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 8 and the transmitter



(i) 子系统9与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(9)} = x_1/\alpha - w_1^{(9)}$   
 (i) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 9 and the transmitter

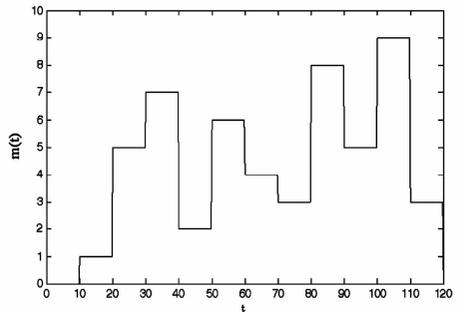


(j) 子系统10与发送端系统的投影同步误差  $e_1^{(10)} = x_1/\alpha - w_1^{(10)}$   
 (j) Error of the projective synchronization between the sub-receiver end 10 and the transmitter

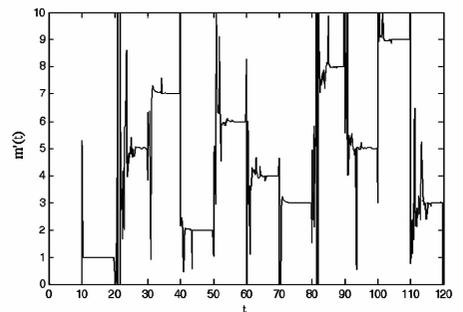
图2 通信系统接收端10个子系统与发送端投影同步误差时间历程图

Fig. 2 Error of the projective synchronization between 10 sub-receiver ends and the corresponding transmitter

基于映射规则(9)解调出数字信息  $N: \hat{N} = \alpha - 1, \hat{N} \in \hat{m}(t)$ . 图3展示了传输的数字信息和解码信息的对照图. 图3(a)显示的是所传输的10进制数字信息  $m(t)$ , 图3(b)显示的是解调后的数字信息  $\hat{m}(t)$ . 将这两张图对比可以看出解调数字信息  $\hat{m}(t)$  与传输数字信息  $m(t)$  符合的很好, 当传输数字信息发生改变的时候, 解码信息从前一个数字信号经过一段很短的时间后收敛到后一个数字信号. 由此也可以说明利用 Lorenz 混沌吸引子构造的数字通信系统, 对于传输多进制数字信息的解码过程快, 误码率低, 精度高.



(a) 传输的数字信息  $m(t)$   
 (a) The transmitted digital messages



(b) 解调后的数字信息  $\hat{m}(t)$   
 (b) The recovered digital messages

图3 解码信息  $\hat{m}(t)$  与传输信息  $m(t)$  时间历程图

Fig. 3 The time history of recovered and transmitted digital messages

图4所示的是发送端输出信号  $h^{(i)}(x(t))/\alpha$  的第三分量  $h_3^{(i)}(x(t))/\alpha$ , 可以看出在信道中传输的信号  $h^{(i)}(x(t))/\alpha$  曲线, 在时间域中没有稳定的幅值和周期, 毫无规律可循, 无法用确定的函数表示, 属于混沌信号. 传输信号的混沌特性提高了数字通信系统的安全保密性.

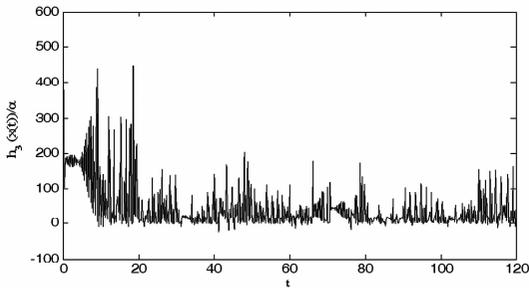


图4 通信系统发送端的输出信号  $h_3^{(i)}(x(t))/\alpha$

Fig. 4 The transmitted signal of the sub-receiver ends

## 4 结论

本文利用基于线性系统稳定性准则的 SC 混沌比例投影同步方法, 设计了一种全新的多进制数字信息混沌保密通信方案. 该方法在发送端系统的雅克比矩阵和比例因子中分别调制进所需传输的多进制数字信号, 制定了对应的映射规则, 于通信系统接收端的子系统中解调出数字信号. 文中以 Lorenz 混沌吸引子构造了 10 进制数字通信系统, 数值模拟发现, 发送端输出信号不仅是混沌信号, 而且在传输不同的数字信息时, 输出信号在多个不同的混沌信号之间来回切换, 增加了信息传输过程中的安全性, 提高了系统的保密性. 仿真结果表明, 当传输某个数字码元时, 发送端和对应子系统的投影同步误差迅速收敛为 0, 而其余子系统则与发送端的同步误差是混沌解, 同时解调信息图与传输信息图也符合的很好, 证明该通信系统对多进制数字信息的解码过程很快, 没有误码输出, 解码精度高.

## 参 考 文 献

- Pecora L M, Corroll T L. Synchronization in chaotic system. *Physical Review Letters*, 1990, 64: 821 ~ 824
- Manieri R, Rehacek J. Projective synchronization in three-dimensional chaotic systems. *Physical Review Letters*, 1999, 82: 3042 ~ 3045
- Xu D L, Li Z. Controlled projective synchronization in non-partially-linear chaotic systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2002, 12(6): 1395
- Yu H J, Peng J H, Liu Y Z. Projective synchronization of unidentical chaotic systems based on stability criterion. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2006, 16(4): 1049 ~ 1056
- Cuomo K M, Oppenheim A V. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications. *Physical Review Letters*, 1993, 71(1): 65 ~ 68
- Parlitz U. Estimating model parameters from time series by auto-synchronization. *Physical Review Letters*, 1996, 76(8): 1232 ~ 1235
- 杨志民, 熊丽, 张新国等. 基于 Lorenz 系统的混沌调制保密通信的电路实现. 西北师范大学学报, 2010, 46(2): 40 ~ 48 (Yang Z M, Xiong L, Zhang X G, et al. Circuit implementation of chaos modulation secure communication based on Lorenz chaotic system. *Journal of Northwest Normal University*, 2010, 46(2): 40 ~ 48 (in Chinese))
- 王国红. 基于变形蔡氏电路的混沌掩盖保密通信研究. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6(4): 49 ~ 62 (Wang G H. Design of network management structure based on mobile agent technology. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2005, 6(4): 49 ~ 62 (in Chinese))
- Chee C Y, Xu D. Chaos based M-ary digital communication technique using controlled projective synchronization. *IEE Proceedings-Circuits Devices and Systems*, 2006, 153(4): 357 ~ 360
- 廖旋焕, 王晖, 高金峰. 基于统一混沌系统的参数调制新方法. 电路与系统学报, 2012, 17(4): 95 ~ 98 (Liao N H, Wang H, Gao J F. A new parameter modulation method based on the unified chaotic system. *Journal of Circuits and Systems*, 2012, 17(4): 95 ~ 98 (in Chinese))
- 陈胜奎, 席峰, 刘中. 多通道混沌调制模拟-信息转换. 电子与信息学报, 2014, 36(1): 152 ~ 157 (Chen S Y, Xi F, Liu Z. Multi-channel chaotic modulation for analog-to-information conversion. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2014, 36(1): 152 ~ 157 (in Chinese))
- Dwivedi A, Kumar M A, Dwivedi S. Adaptive synchronization of diffusion Lorenz systems and secure communication of digital signals by parameter modulation. *IET Communication*, 2012, 6(13): 2016 ~ 2026
- 朱立岗, 沈传文, 朱少平. 互变参数双混沌调制 SPWM

- 波生成原理及实现方法. 中国电机工程学报, 2014, 34(30):5335 ~ 5341 (Zhu L G, Shen C W, Zhu S P. Principle and realization of chaotic SPWM modulation based on double-chaotic sequence with mutual changing parameters. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(30):5335 ~ 5341 (in Chinese))
- 14 Dwivedi A, Kumar M A, Dwivedi S. Chaotic communication using Pecora Carroll complete replacement and parameter modulation without controller. Allahabad: IEEE, 2014;1 ~ 4
- 15 Chan H J, Heung G R. Design of chaotic CDSK modulation system using different chaotic maps. PyeongChang: IEEE, 2013;222 ~ 226

## M-ARY DIGITAL COMMUNICATION TECHNIQUE BASED ON A CHAOTIC SYNCHRONIZATION METHOD \*

Qian Hui Yu Hongjie<sup>†</sup>

(*Department of Engineering Mechanics, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

**Abstract** A new communication technique of transmitting M-ary digital signals using projective synchronization based on stability criterion is proposed in this paper. At the sender, M-ary digital signals are modulated into Jacobian matrix and the scaling factor of chaotic system. The digital signals are decoded in the corresponding subsystem constructed at the receiver end. Lorenz attractor is taken as an example to simulate the process of transmitting decimal digital signals by chaotic modulation. Numerical analysis shows that the communication system has higher transmission rate and decoding accuracy for the digital symbols without increasing complexity. The security and effectiveness of the proposed technical scheme is validated through the numerical investigation.

**Key words** secure communication, chaotic modulation, digital signal, projective synchronization, Jacobian matrix