

基于状态观测器的参数调制混沌数字通信*

李国辉¹⁾ 徐得名¹⁾ 周世平²⁾

¹⁾ 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

²⁾ 上海大学理学院, 上海 200436)

(2003 年 4 月 11 日收到, 2003 年 5 月 18 日收到修改稿)

用状态观测器构造两个与混沌系统同步的子系统, 将数字信号调制发送系统的参数, 两同步系统交替与发送端同步. 在接收端, 利用同步误差解调出信号. 以 Henon 混沌为例构造基于状态观测器的参数调制与解调系统, 进行数值模拟, 验证了该方法的有效性.

关键词: 状态观测器, 混沌同步, 参数调制

PACC: 0545

1. 引 言

近年来, 混沌同步在保密通信、扩频通信中的应用受到极为广泛的关注^[1,2], 相继出现了诸多的混沌同步方法^[2-7]. 经典的驱动-响应同步方法^[6]要求系统能够分解成若干个稳定的子系统, 这在一些实际的, 如生物、物理和化学系统中不易于实现; 状态反馈控制法必须对系统的状态变量进行物理测量, 而系统的状态变量有时根本无法测量, 这往往限制了它的应用. 状态观测器可有效地克服这一缺点, 且能用于其他同步方法所不能实现的某些系统中^[5].

常见的混沌调制方式有混沌键控和混沌参数调制^[1,3], 混沌键控将信息序列与混沌信号相乘, 或交替发送不同的吸引子, 由于引入跳变沿, 所以保密性不理想, 同步的收敛时间长, 频谱利用率低. 目前, 对混沌参数调制的讨论不多, 混沌参数调制将信息调制到参数上, 然后, 在接收端估计出该参数, 解调出信息. 本文即是用状态观测器构造两个与混沌系统同步的接收系统, 将二进制信号对发送系统的某一个参数调制, 使之在两个值之间切换, 而接收系统的参数分别取这两个参数中的一个, 根据混沌同步的特点, 当接收系统与发射系统同步时, 即可检测出发送系统的参数, 进而确定传送的数字信号. 以 Henon 混沌为例进行数值模拟, 验证了该方法的有效性.

2. 状态观测器的设计

不失一般性, 设系统的动力学方程为

$$X(n+1) = f(X(n), \mu) \\ = AX(n) + B \cdot F(X(n)) + C, \quad (1)$$

其中 $X \in R^n$ 为系统的状态量, μ 为待调制的参数, $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^n$, $F: R^n \rightarrow R^m$ ($m \leq n$) 为非线性映射, AX 为线性部分, $B \cdot F(X)$ 为非线性部分, C 为常值.

令 (1) 式的输出

$$h(n) = KX(n) + F(X(n)), \quad (2)$$

其中 K 为待定常数. 利用控制理论中状态观测器的理论, 构造 (1) 和 (2) 式的状态观测器

$$\hat{X}(n+1) = (A\hat{X}(n) + B \cdot F(\hat{X}(n))) + C \\ + L(h(n) - \hat{h}(n)), \quad (3)$$

其中 \hat{X} 为状态观测器的状态, \hat{h} 为状态观测器的输出, L 为待定常数. 设 $L = B$, 则 (3) 式变为

$$\hat{X}(n+1) = (A\hat{X}(n) + B \cdot F(\hat{X}(n))) + C \\ + B(h(n) - \hat{h}(n)). \quad (4)$$

由 (1) (2) 和 (4) 式得差分方程

$$e(n+1) = (A - BK)e(n), \quad (5)$$

其中 $e = X - \hat{X}$ 为状态误差向量. 根据极点配置法, 适当选择常数 K 使得 $A - BK$ 的特征根模值小于 1, 则 $e \rightarrow 0$, 即 $\hat{X} \rightarrow X$, 得到两者同步.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60371033), 上海市重点学科建设 (批准号: 2001-44) 和上海市教育委员会青年基金 (批准号: 03AQ87) 资助的课题.

3. 参数调制保密通信系统

参数调制保密通信系统由一个发送和两个接收部分组成,其结构如图 1 所示. 由“0”和“1”组成的二进制数字信号 $S(t)$ 调制发送系统 A 中某一参数 μ , 并使之处于混沌态, 令

$$\mu = \mu_0 + \Delta\mu \cdot S(t), \quad (6)$$

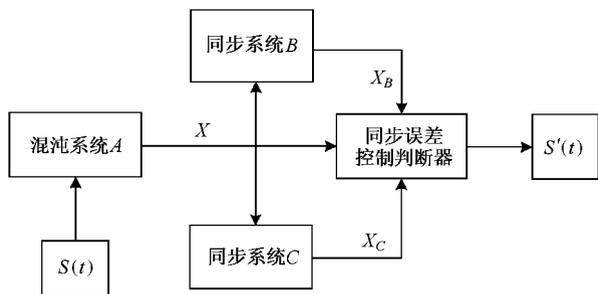


图 1 参数调制混沌通信系统

一方面,若 $\Delta\mu$ 太大则同步系统 B 和 C 变得易于区分而失去保密性,另一方面,由于同步的鲁棒性,太小的 $\Delta\mu$ 会使调制后的信号难以分离,导致误码率提高. 因此, $\Delta\mu$ 的选取需折衷考虑. 基于状态观测器的两同步系统 B 和 C 的参数分别为

$$\mu_1 = \mu_0, \quad (7)$$

$$\mu_2 = \mu_0 + \Delta\mu, \quad (8)$$

根据同步理论,只有两个参数相同的系统方能达到同步,所以,在任意时刻,只有一个系统与原系统同步. 设同步误差 $e_B(t) = \|X - X_B\|$, $e_C(t) = \|X - X_C\|$, 当 $e_B(t) < e_C(t)$ 时,可得 $S'(t) = 0$, 否则 $S'(t) = 1$. 通过同步误差判断器即可知道是系统 B 还是 C 与原系统同步,从而判断出序列 $S'(t)$.

由于本系统是对参数进行调制,当序列 $S(t)$ 发生改变,接收系统即与发送系统进行一次同步,这种同步是需要时间的,为了减小同步的时间,在同步解调过程中,需要对系统 B, C 的状态进行修正. 修正方法为:当 $e_B(t) < e_c$ 时,将 B 的状态替代 C 的状态,即令 $X_C = X_B$. 相反,当 $e_C(t) < e_c$ 时, B 的状态用 C 的状态替代,即令 $X_B = X_C$, 式中 e_c 为阈值,它的选取需视系统的抗干扰和调节时间而定.

4. 数值应用

现考虑如下 Henon 混沌系统:

$$X(n+1) = AX(n) + (1 - \mu \cdot x_2^2(n))(0, 1)^T, \quad (9)$$

其中 $X = (x_1, x_2) \in R^2$, $B = (0, 1)^T$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix}$, μ 为待调制参数, $F(X) = [(1 - \mu x_2^2(n))]$, $h(X) = (1 - \mu x_2^2(n)) + \sum_{i=1}^2 k_i x_i$, 得到系统的一个待设计的观测器,如(4)式所示. 由(9)与(4)式得到误差系统为

$$e(n+1) = Ae(n) - \left(\sum_{i=1}^2 k_i e_i(n) \right) (0, 1)^T. \quad (10)$$

由于误差系统(10)的可控矩阵是满秩的,因而存在一个增益向量 K 使得系统(10)的原点成为全局稳定不动点,选择极点 $[-0.1, 0.3]$, 根据极点配置法得到 $K = [0.29, 0]$.

设形如(9)式的发射系统 A 的参数

$$\mu = 1.4 + S(t) \cdot 0.02 = \begin{cases} 1.4, & S(t) = 0, \\ 1.42, & S(t) = 1, \end{cases} \quad (11)$$

以 100 为一个采样周期, $S(t)$ 在前 70 步保持为“1”, 后 30 步为“0”, 其波形如图 2 所示. 系统 B 的参数 $\mu_B = 1.4$, 状态量为 X_B , 系统 C 的参数 $\mu_C = 1.42$, 状态量为 X_C , 它们的观测器如(4)式. 任取初值 $X(0) = (0.1, 0.32)$, $X_B(0) = (-0.1, -0.5)$, $X_C(0) = (-0.2, 1.2)$ 进行数值模拟, 结果分别示于图 3 和图 4. 图 3 表示发送端的混沌吸引子, 它相当于动态地把 $\mu = 1.4$ 和 $\mu = 1.42$ 两个混沌序列糅合到一起, 由于混沌不仅对初值而且对参数也高度敏感, 产生的序列比原序列更复杂, 经调制的信息作为发送信号在系统中传输. 图 4 表示同步系统 B 和同步系统 C 与发送端的同步误差 e_B 和 e_C , 由于采用了修正方

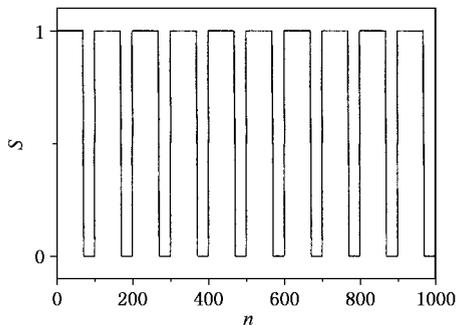


图 2 信号 $S(t)$ 时序图

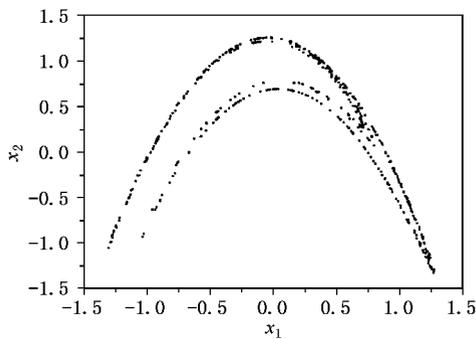


图 3 发送端混沌吸引子

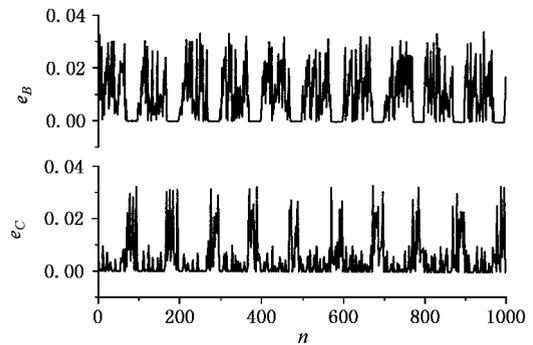


图 4 两同步系统误差图

法,二者都比较小,但由于存在同步切换,二者又有差别,同步误差判断器根据二者的差别识别并恢复信号 $S'(t)$,结果与图 2 完全一致.实际上,极点选择具有人为预先确定性,完全可以根据需要首先定好极点,然后由极点配置法得到 K ,本文确定的极点将迅速同步.

5. 结 论

混沌参数调制作作为混沌在通信中应用,有很广

阔的研究空间.如何有效地将信息调制到混沌序列上,将调制与解调同步有机地结合起来,则是急需解决的首要问题.本文采用状态观测器实现混沌同步,构造两个与混沌系统同步的接收系统,将二进制信号调制发送系统的某一个参数,而两个接收系统交替与之同步,检测同步的进程,确定并恢复传送的数字信号.通过对 Henon 混沌参数调制通信系统数值模拟,得到了较短的同步时间,发送信号的加密性更强.进一步还可以将该方法推广到连续超混沌系统.

- [1] Kolumban G, Kennedy M P and Chua L O 1997 *IEEE Trans. CAS-I* **44** 927
Kolumban G, Kennedy M P and Chua L O 1998 *IEEE Trans. CAS-I* **45** 1129
- [2] Kocarev L and Parlitz U 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 5028
- [3] Zhang J S and Xiao X C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2121 (in Chinese)[张家树、肖先赐 2001 物理学报 **50** 2121]

- [4] Chen S H et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 749 (in Chinese)[陈示华等 2002 物理学报 **51** 749]
- [5] Yang X S 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1919 (in Chinese)[杨晓松 2000 物理学报 **49** 1919]
- [6] Pecora L M and Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [7] Lai J W et al 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 21 (in Chinese)[赖建文等 2001 物理学报 **50** 21]

A parameter-modulated method for chaotic digital communication based on state observers^{*}

Li Guo-Hui¹⁾ Xu De-Ming¹⁾ Zhou Shi-Ping²⁾

¹⁾*School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China*

²⁾*School of Science, Shanghai University, Shanghai 200436, China*

(Received 11 April 2003; revised manuscript received 18 May 2003)

Abstract

By designing an appropriate state observer, we have constructed two subsystems which alternately synchronize the chaotic drive system. When the parameter of the transmitter is modulated using the binary digital signal, the two systems can alternately be synchronized with the chaotic system. In the receiver, information is demodulated by analyzing synchronization error. An observer-based parameter modulation and demodulation Henon system was chosen to be a typical example. Numerical simulation is carried out to illustrate the effectiveness and efficiency of the proposed method.

Keywords: state observer, chaos synchronization, parameter modulation

PACC: 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60371033), the Key Disciplinary Development Program of Shanghai (Grant No. 2001-44) and the Foundation for Young Scientists from the Shanghai Education Commission, China (Grant No. 03AQ87).