

基于受激蔡氏电路混沌系统的混沌键控和最佳解调

卢俊国¹, 魏 荣², 王执铨²

(1. 上海交通大学自动化研究所, 上海 200030; 2. 南京理工大学自动化系, 江苏南京 210094)

摘 要: 提出了一种利用混沌载波进行数字通信的方法, 该方法通过调制周期激励混沌系统中周期激励项的相位来传输数字信号, 并在接收端利用由可同步的串联结构的混沌系统组成的最佳接收机进行相干解调. 所提方法能传输二进制信号, 也可推广到传输多进制信号的情况. 最后进行了数值仿真, 结果说明了所提方法的有效性.

关键词: 混沌键控; 最佳解调; 相位调制; 受激蔡氏电路

中图分类号: TN918 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2002)07-1003-03

Chaos Shift Keying Based on Driven Chua's Circuit and Optimal Demodulation

LU Jun guo¹, Wei Rong², WANG Zhi quan²

(1. Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Department of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: This paper presents the scheme of digital communication using a chaotic carrier. In the transmitter, the bits are mapped to sample functions of chaotic signals emanated from one or more chaotic attractors by modulating phase of excitation term of driven Chua's circuit. The bits are demodulated by the optimal demodulator that consists of synchronizable chaotic circuits in the correlation receiver. The proposed scheme can be used for transmitting binary signal and be extended for M-ary signal. Finally, the numerical simulation results demonstrate the proposed scheme effectiveness.

Key words: chaos shift keying; optimal demodulation; phase modulation; driven chua's circuit

1 引言

混沌虽是确定性的, 但对初始条件具有极端的敏感性, 即初始条件的微小变化将导致混沌轨道演化的指数分离. 此外, 混沌信号还具有很宽的频谱和类似噪声的性质, 因此混沌信号特别适合于保密通信. 混沌通信由于具有几乎不可破译的保密性, 因而已经引起了广泛的重视^[1-11]. 目前, 人们基于自治混沌系统已经提出了几种保密通信方法如混沌调制^[2-5]、混沌遮蔽^[6-8]和混沌键控^[9-10], 但它们具有一些不足: 如混沌遮蔽^[6-8]要求信息信号能量比加到信息信号中的混沌信号能量低 30dB, 这将导致如果与信息信号具有相同能量的噪声污染了混沌信号, 将很难保证接收端能正确解调出信息信号; 基于自治混沌系统的混沌键控^[9-10]则要求系统存在混沌的参数区域比较大, 而且还要求混沌系统的同步性能明显地受参数的影响, 这必然对混沌系统提出了更高的要求, 使这种方法在通信中的应用收到一定的制约, 此外, 这种方法在进行数字通信时, 一般只传输二进制信号, 而不能传输多进制信号, 而且混沌键控的解调方法一般是对误差信号进行移动平滑后在进行抽样判决, 这种非相干解调的差错性能不是最优的; 混沌调制^[2-5]则要求注入到混沌系统中的信息信号的能量比较小, 否则会使混沌系统脱离混沌区, 且传输的信号不易保持混沌等不足.

为了克服上述调制和解调方法的不足, 本文针对周期激励的非自治蔡氏电路混沌系统, 提出了串联误差反馈同步方

法, 从理论上证明了串联误差反馈同步方法的同步性能, 并基于串联误差反馈同步方法提出了在发送端通过调制周期激励蔡氏电路中周期激励项的相位来传输二进制信号, 在接收端利用相干解调方法来解调出二进制信号的混沌保密数字通信新方法, 该方法也可推广到传输多进制信号的情况, 仿真结果说明了所提方法的有效性.

2 周期激励蔡氏电路混沌系统的串联同步方法

周期激励混沌系统^[11]的无量纲形式为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(y - h(x)) \\ \dot{y} &= x - y + z \\ \dot{z} &= -\beta y + f \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $h(x) = bx + 0.5(a-b)(|x+1| - |x-1|)$, 选取参数 $\alpha = 7.0, \beta = 14.286, \omega = 3.0, f = 1.5, a = -1/7, b = 2/7$, 而相位 ϕ 受待传输的数字信息信号调制, 实际传输的混沌载波信号是 x .

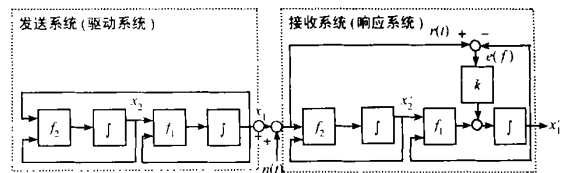


图 1 串联误差反馈同步系统结构图

在图 1 同步系统中, 以式(1)为驱动系统. 为了便于设计响应系统, 我们把系统式(1)分成两个子系统, 状态变量分别为 $x_1 = x, x_2 = (y, z)$, 如图 1 中所示, 即

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, t) \quad (3)$$

驱动系统式(1)产生驱动信号 $x_1(t)$, 假设 $x_1(t)$ 直接通过信道传输, 这样, 响应系统收到的是受噪声污染过的信号 $r(t)$, 同步的目的是在响应系统中恢复驱动信号 $x_1(t)$, 所以响应系统要能够恢复混沌驱动信号 $x_1(t)$, 且对噪声具有一定的鲁棒性.

Pecora Carroll 的驱动响应同步化方法本质上是一个开环状态估计方法, 它的目的是通过噪声的载波驱动信号 $r(t)$ 来估计驱动系统的状态, 而开环状态估计对噪声和参数不匹配是敏感的, 因此 Pecora Carroll 方法不鲁棒. 为提高 Pecora Carroll 驱动响应同步化方法的鲁棒性和性能, 我们在状态估计中增加了误差反馈. 串联误差反馈响应系统如图 1 所示, 由两个子系统组成, 第一个子系统为:

$$\dot{y}' = x - y' + z' \quad (4a)$$

$$\dot{z}' = -\beta y' + f \sin(\omega t + \phi)$$

第二个子系统为:

$$\dot{x}' = \alpha(y' - h(x')) + k(x - x') \quad (4b)$$

其中 k 为待定的误差反馈增益阵. 令 $e_x = x - x', e_y = y - y', e_z = z - z'$, 由式(1)和(4)可得同步误差方程为:

$$\dot{e}_x = \alpha e_y - k e_x + \alpha(h(x) - h(x')) \quad (5a)$$

$$\dot{e}_y = -e_y + e_z \quad (5b)$$

$$\dot{e}_z = -\beta e_y \quad (5c)$$

定理 1 如果 $k > \alpha |a|$, 那么同步误差动态系统式(5)在原点是全局渐近稳定的, 即混沌系统式(1)和(4)是全局渐近同步的.

证明 解微分方程组(5b)和(5c)可得:

$$e_y(t) = e^{-t/2} (e_y(0) \cos(c_1 t) + \frac{e_z(0) - \frac{1}{2} e_y(0)}{c_1} \sin(c_1 t))$$

$$e_z(t) = e^{-t/2} (e_z(0) \cos(c_2 t) + \frac{\frac{1}{2} e_z(0) - \beta e_y(0)}{c_1} \sin(c_1 t))$$

式中 c_1, c_2 为常数. 由上两式可知, $e_y(t), e_z(t)$ 随时间 t 按指数 $e^{-t/2}$ 规律收敛于 0, 即响应系统中的混沌信号 y' 和 z' 能够按指数 $e^{-t/2}$ 迅速收敛于驱动系统的混沌信号 y 和 z , 实现同步. 为了简化证明 x' 也收敛于 x , 我们假设 $e_y(t) = 0$, 这个假设是合理的, 因为 $e_y(t)$ 随时间 t 按指数 $e^{-t/2}$ 规律收敛于 0. 由式(5a)得:

$$\dot{e}_x = -k e_x + \alpha(h(x) - h(x')) \quad (6)$$

取 Lyapunov 函数为 $V = \frac{1}{2} e_x^2$, V 沿着同步误差动态系统式(6)的时间导数为

$$V = e_x \dot{e}_x = e_x [-k e_x + \alpha(h(x) - h(x'))] \leq -k e_x^2 + \alpha |a| e_x^2 = -(k - \alpha |a|) e_x^2 \quad (7)$$

由式(7)可知当 $k > \alpha |a|$ 时, V 是负定的, 进而 x' 也收敛于 x . 综上所述, 当 $k > \alpha |a|$ 时, 同步误差动态系统式(5)在原点是

全局渐近稳定, 即混沌系统式(1)和(4)是全局渐近同步的.

注: 定理 1 只给出系统式(1)和(4)同步的充分条件. 我们通过仿真发现, 只要 $k \geq 0$, 系统式(1)和(4)同步都能同步, 只是同步的快慢不同.

3 周期激励混沌系统激励项的相位调制和最佳解调

在周期激励混沌系统中, 激励信号的相位变化对混沌系统的同步性能有很大的影响, 但是对混沌系统的结构没有任何影响, 不象文[9]那样改变系统结构; 而且激励信号相位可供用来调制传输信息的区域是普通参数所不可比拟的. 因此, 我们可以用调制激励信号相位的办法来传输二进制或多进制信息信号. 限于篇幅, 这里只讨论传输二进制情况, 设码元宽度为 T , 通信系统如图 2 所示.

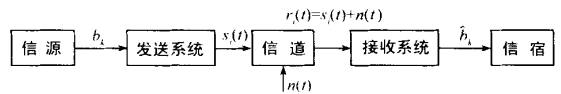


图 2 通信系统结构图

图 2 通信系统中的发送系统由式(1)组成, 其中相位 ϕ 受 b_k 调制, 即 $\phi = \begin{cases} 0, & b_k = 0 \\ \pi, & b_k = 1 \end{cases}$. 输出载波信号取为 $s_i(t) = x(t)$. 通信系统中的接收系统是一个相关接收机, 其结构如图 3 所示.

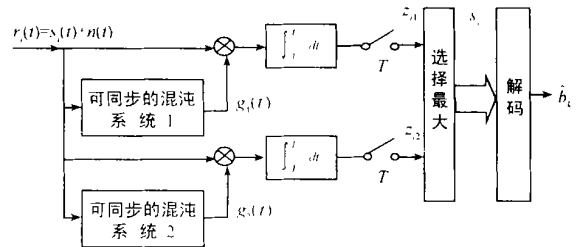


图 3 相关接收系统结构图

图 3 中, 可同步系统 1(简称系统 1)为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \alpha(y_1 - h(x_1)) + k(x - x_1) \\ \dot{y}_1 &= x - y_1 + z_1 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{z}_1 = -\beta y_1 + f \sin(\omega t + \pi)$$

而可同步混沌系统 2(简称系统 2)为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \alpha(y_2 - h(x_2)) + k(x - x_2) \\ \dot{y}_2 &= x - y_2 + z_2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{z}_2 = -\beta y_2 + f \sin(\omega t)$$

系统式(8)和(9)中的参数与式(1)相同. 若发送信号 0, 即发送系统中的 $\phi = 0$, 那么, 只有系统 2 能与之同步, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_2 = x$, 而 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_1 \neq x$; 若发送信号 1, 即发送系统中的 $\phi = \pi$, 那么, 只有系统 1 能与之同步, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_1 = x$, 而 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_2 \neq x$. 因混沌信号具有类似噪声的性质, 因此 x 的自相关性大于其和与之不同步的系统状态 x_i 的互相关性, 故解码方法为 $b_k =$

$$\begin{cases} 1, & z_{i1} - z_{i2} > 0 \\ 0, & z_{i1} - z_{i2} < 0 \end{cases}$$

在实际情况下,接收系统收到的信号总是受噪声 $n(t)$ 污染过,即使在完全同步情况下,接收系统接收到的瞬间值也可能不同于将要恢复的混沌载波信号,而相关性具有时间平滑作用,允许通信系统短时间失去同步,因此,我们用相关接收机来确定同步程度.此外,在实际的通信系统中,不仅要传输单独的码元,也要传输一系列的码元,这样即使在线性信道中,也会出现连续符号间的干扰(ISI),ISI的一个来源是相关接收机中的积分器.如果我们在每一个码元周期的开始处通过 integrator and dump 电路^[12]把积分器的初值置为0,那么这种类型的ISI就可以避免.

若不采取措施,则每次传输码元变化时,通信系统将失去同步和需要恢复同步,因此码元时间 T 应等于同步时间 T_s .加上观测矢量估计时间,这样码元速率即数据速率上限为 $1/T_s$.为最大化数据速率,一种方法就是一直保持同步:为了减少同步的时间,在解调过程中,我们对两个可同步系统的状态进行修正,使两接收系统与发送系统的状态差维持在较小的水平,修正方法为:当系统1与发送系统同步时,将系统2的状态值用系统1状态代替,即 $(x_1, y_1, z_1) \rightarrow (x_2, y_2, z_2)$;而当系统2与发送系统同步时,将系统1的状态用系统2状态代替,即 $(x_2, y_2, z_2) \rightarrow (x_1, y_1, z_1)$.另一种方法就是采用高频的混沌振荡器来减小 T_s ,如特征频率达 160kHz 和兆 Hz 级的 CMOS 工艺集成蔡氏电路都已有报道.

4 仿真研究

在仿真中,取误差反馈增益 $k=0.1$,取码元宽度 $T=10$,由于式(1)为无量纲形式,故除以式(1)的时间标度因子才得到实际电路的比特率.取数字信号 $b_k=10100110$,仿真结果如图4所示,由图可知 $b_k=10100110$.可见本文所提通信系统能够实现混沌保密数字通信.

5 结束语

本文提出了一种利用周期激励蔡氏电路混沌系统进行数字通信的方法,计算机模拟表明本文的方案是可行的.虽然本文讨论的是利用周期激励的蔡氏电路混沌系统进行数字通信,但是将本文所提的方法推广到利用其它周期激励的混沌系统进行数字通信没有任何问题.限于篇幅,本文只讨论了二

进制混沌键控数字通信系统情况,在随后的文章中我们将讨论多进制混沌键控数字通信系统.

参考文献:

- [1] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems [J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(8): 821-824.
- [2] Halle K S, Wu C W, Itoh M, Chua L O. Spread spectrum communication through modulation of chaos [J]. Int J Bifurcation and Chaos, 1993, 3(2): 469-477.
- [3] Itoh M, Wu C W, Chua L O. Communication systems via chaotic signals from a reconstruction viewpoint [J]. Int J Bifurcation and Chaos, 1997, 7(2): 275-286.
- [4] Liao T L, Huang N S. An observer based approach for chaotic synchronization with applications to secure communications [J]. IEEE Trans Circuits and Systems I, 1999, 46(9): 1146-1150.
- [5] Grassi G, Mascolo S. A system theory approach for designing cryptosystems based on hyperchaos [J]. IEEE Trans Circuits and Systems I, 1999, 46(9): 1135-1138.
- [6] Cuomo K M, Oppenheim A V, Strogatz S H. Synchronization of Lorenz Based chaotic circuits with applications to communications [J]. IEEE Trans Circuit Systems II, 1993, 40(10): 626-633.
- [7] Kocarev L J, Halle K S, Chua L O, Parlitz U. Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization [J]. Int J Bifurcation and Chaos, 1992, 2(3): 709-713.
- [8] Oppenheim A V, Womell G W, Isabelle S H, Cuomo K M. Signal processing in the context of chaotic signals [A]. Proc IEEE ICASSP [C]. San Francisco: ICASSP, 1992.
- [9] Dedieu H D, Kennedy M P, Hasler M. Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self synchronizing Chua's circuits [J]. IEEE Trans Circuits and systems II, 1993, 40(10): 634-642.
- [10] Parlitz U, Chua L O, Kocarev L J, Halle K S, Shang A. Transmission of digital signals by chaotic synchronization [J]. Int J Bifurcation and Chaos, 1992, 2(4): 973-977.
- [11] Murali K, Lakshmanan M. Synchronizing chaos in driven Chua's circuit [J]. Int J Bifurcation and Chaos, 1993, 3(4): 1057-1066.
- [12] Frigyes I, Szabo Z, Varyai P. Digital microwave transmission [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 1989.

作者简介:



卢俊国 男,1975年12月生于福建龙岩,2001年获南京理工大学控制理论与控制工程专业博士学位,现为上海交通大学自动化研究所博士后,主要从事混沌控制与同步及其在通信中的应用、预测控制理论及其应用等研究工作.

魏荣女,1975年9月生于安徽马鞍山,1997年获南京理工大学工学学士学位,现为南京理工大学自动化系98级博士生,主要从事信号处理、小波分析理论及其在控制领域中应用研究.

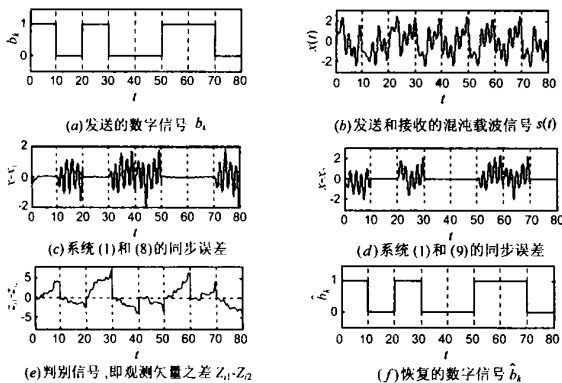


图4 基于受激蔡氏电路的数字通信系统各点波形