

# 时变信道通信中的多级蔡氏混沌同步

李建芬, 李 农

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘 要:**提出了一种适合于时变信道增益的单耦合蔡氏电路多级混沌通信方法,该方法把信道增益的变化归结为在信道中存在一等效时变电阻,并将该电阻作为同步蔡氏电路的耦合电阻。在接收端,通过信道上的电流判断收发系统是否达到混沌同步。理论分析和模拟结果表明单耦合蔡氏电路在时变信道增益时仍然可以实现混沌同步,在此基础上利用参数调制实现时变信道增益时的多级混沌同步通信。

**关键词:**混沌通信;蔡氏电路;时变信道

**中图分类号:**TP273, TN918 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)03-73-76

自1990年美国海军实验室专家提出了混沌同步概念及其驱动——响应方法<sup>[1-2]</sup>以来,如何将混沌同步理论应用于安全通信成为信息科学界关注的热点之一。人们相继提出了混沌同步系统传输信息的各种方法,如信号掩膜法,参数调制法<sup>[3]</sup>混沌键控法<sup>[4]</sup>等。但这些方法的抗干扰能力较低,容易被破译。文献[5]提出了一种多级混沌同步通信系统,该系统在有效带宽,失真特性及安全性能等方面均优于原同步掩膜通信系统。上述利用混沌同步进行保密通信的方法均假定信道是理想的,即携带信息的混沌信号应不失真地传送到接收端,并通过收发两端相应电压信号的同步关系恢复出信息信号。若信道增益发生变化,在接收端便不可能获得与发射端相同的电压信号,从而认为信道增益的变化必然导致系统的失步<sup>[6]</sup>。因此,在接收端用自适应控制器来补偿时变信道增益的变化以维持收发系统的混沌同步<sup>[6-7]</sup>,或在假定信道为理想情况时,通过参数调制并利用自适应控制器解调实现混沌通信<sup>[8]</sup>,由于在接收端的自适应控制器不能分辨系统失步是由信道增益的变化,还是信息调制所引起,所以不能在对信道增益进行补偿的同时实现混沌通信。

## 1 时变信道时蔡氏电路的单耦合同步

由两个相同的蔡氏电路,将电容 $C_1$ 两端的电压通过一个线性电阻单向耦合构成的同步蔡氏电路如图1所示,状态方程为式(1)~(6),其中 $f(x)$ 为非线性电阻 $N_R$ 的伏安特性,曲线如图2。选择元件参数: $C_1 = 5.56 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 50 \text{ nF}$ ,  $G = 0.70028 \text{ mS}$ ,  $L = 7.14 \text{ mH}$ ,  $G_a = -0.8 \text{ mS}$ ,  $G_b = -0.5 \text{ mS}$ ,  $E = 1 \text{ V}$ 时系统处于混沌状态,图3为其吸引子相图。

$$u_1 = \frac{1}{c_1} [G(u_2 - u_1) - f(u_1)] \quad (1)$$

$$u_1 = \frac{1}{c_1} [G(u_2 - u_1') + \delta_x(u_1 - u_1')] \quad (4)$$

$$u_2 = \frac{1}{c_2} [G(u_1 - u_2) + i_3] \quad (2)$$

$$u_2 = \frac{1}{c_2} [G(u_1' - u_2) + i_3'] \quad (5)$$

$$i_3 = -\frac{1}{L} u_2 \quad (3)$$

$$i_3 = -\frac{1}{L} u_2' \quad (6)$$

收稿日期:2000-11-02

作者简介:李建芬(1960-),女,湖南长沙人,讲师,硕士,主要从事非线性电路理论,混沌及其应用研究。

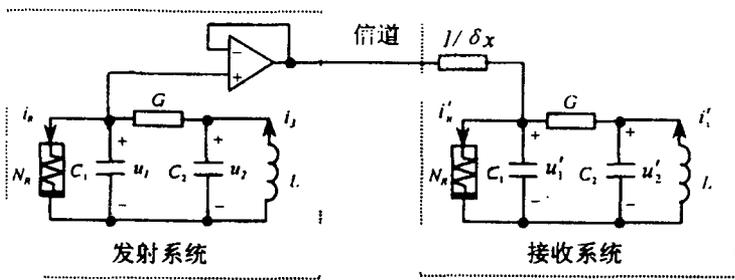


图1 单耦合同步蔡氏电路

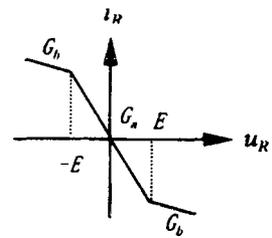


图2 蔡氏二极管的伏安特性

由方程(1)~(6)可定义下列误差方程:  $p(t) = u_1 - u_1 \quad p = \frac{1}{c_1} [G(q - p) - f(u_1) + fc_1] - \delta_x p$   $q(t) = u_2 - u_2 \quad q = \frac{1}{c_2} [G(p - q) + r]$   $r = -\frac{1}{L}q$   $r(t) = i_3 - i_3$

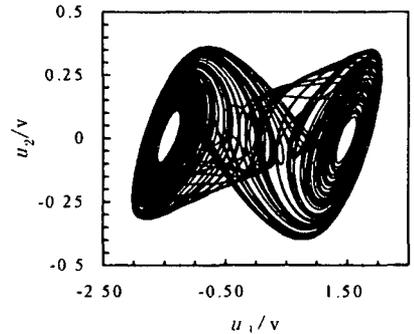


图3 蔡氏电路的混沌吸引子相图

由于  $f(*)$  为分段线性连续函数,斜率分别为  $G_a$  和  $G_b$ ,且  $G_a < G_b < 0$ , 因此  $G_a(u - u) \leq f(u) - f(u) \leq G_b(u - u)$ 。设  $f(u) - f(u) = k(u - u)$  (其中  $k$  为时变参数,且  $G_a < k < G_b$ )

误差方程即为 
$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{c_1}(G+k+\delta_x) & \frac{G}{c_1} & 0 \\ \frac{G}{c_2} & -\frac{G}{c_2} & \frac{1}{c_2} \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

选取 Lyapunov 函数:  $E(p, q, r, t) = ap^2 + bq^2 + cr^2$  其中  $a, b, c$  均为大于零的待定常数。

$$E(p, q, r, t) = 2ap \dot{p} + 2bq \dot{q} + 2cr \dot{r} = -\frac{2ap^2}{c_1}(G+k+\delta_x) + \frac{2aGpq}{c_1} + \frac{2bq^2}{c_2}(Gp - Gq + r) - \frac{2cqr}{L}$$
 
$$\text{令} \begin{cases} \frac{aG}{c_1} = \frac{bG}{c_2} = 1 \\ \frac{2b}{c_2} = \frac{2c}{L} \end{cases} \quad \text{即} \quad a = \frac{c_1}{G}, b = \frac{c_2}{G}, c = \frac{L}{c_2}b = \frac{L}{G}$$

$$E(p, q, r, t) = -2(p - q)^2 - 2p^2(k + \delta_x)$$

只要  $k + \delta_x > 0$ , 则  $E(p, q, r, t) < 0$ , 由 Lyapunov 稳定性定理可知误差方程零解稳定, 亦即系统稳定。又由于  $G_a < k < G_b$ , 只要  $G_a + \delta_x > 0$  即可达到系统稳定, 这仅是系统稳定的充分条件, 而不是必要条件。

由图1及其状态方程得知, 在理想情况下(信道无衰减), 耦合系数  $\delta_x$  等于单耦合同步蔡氏电路中耦合电阻值的倒数。但在实际中, 发射端的电压信号传送到接收端时总要产生一定的衰减, 即信道增益发生变化, 这种变化可以归结为在信道中存在一等效时变电阻  $R(t)$ 。若将该等效时变电阻作为蔡氏电路的耦合电阻(或一部分), 则耦合系数亦为一时变函数  $\delta_x = \delta_x(t) = 1/R(t)$ 。理论上, 只要  $\delta_x(t) > -k$  同步状态即可建立。计算机模拟结果表明, 如取下列参数:  $C_1 = 5.56 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 50 \text{ nF}$ ,  $G = 0.70028 \text{ mS}$ ,  $L = 7.14 \text{ mH}$ ,  $G_a = -0.8 \text{ mS}$ ,  $G_b = 0.5 \text{ mS}$ ,  $E = 1 \text{ V}$ 。只需  $\delta_x(t) > 0$  且平均值大于  $0.6 \text{ mS}$ , 系统就可同步, 这使得同步条件大大放宽,  $\delta_x(t)$  的瞬时值可以很小; 如图4所示为

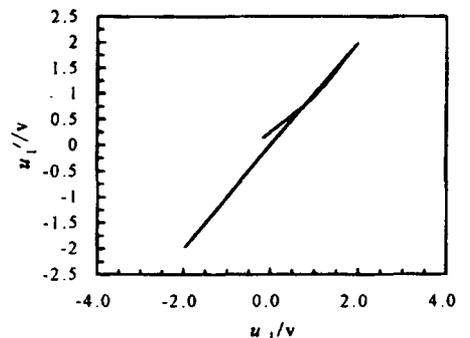


图4 时变信道时  $u_1$  与  $u_1$  的同步相图

$\delta_x(t) = 0.65 + 0.6\sin 150\pi t$  (mS) 时, 系统达到混沌同步时  $u_1$  与  $u_1$  的相图, 由图可见  $u_1 = u_1$ 。

## 2 时变信道时多级蔡混沌同步通信系统

利用蔡氏电路实现时变信道增益时多级混沌同步通信系统的原理框图见图 5, 其中  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$  分别对应于图 1 蔡氏电路的状态变量  $(u_1, u_2, i_3), (u_1', u_2', i_3')$ 。

发射端与接收端均有两级驱动—响应型混沌同步系统, 发射端的第一级为主系统  $(x_1, y_1, z_1)$ , 第二级为子系统  $(x_1', z_1')$ , 它由主系统的变量  $y_1$  驱动; 接收端的第一级为系统  $(x_2, y_2, z_2)$ , 第二级为子系统  $(x_2', z_2')$ , 它由变量  $y_2$  驱动, 待传输的信息信号  $s(t)$  与子系统  $(x_1', z_1')$

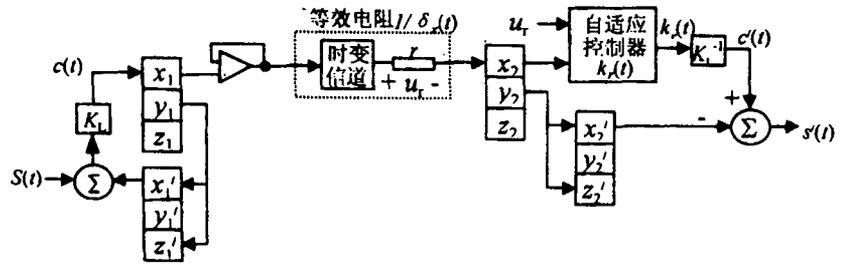


图 5 时变信道时多级蔡氏电路混沌同步通信系统原理框图

的混沌信号  $x_1$  叠加后经线性系统  $K_L$  衰减为  $c(t)$ , 注入主系统  $(x_1, y_1, z_1)$  与  $(x_2, y_2, z_2)$  构成具有时变信道增益的单耦合同步蔡混沌系统, 自适应控制器  $k_r(t)$  的输入控制信号为同步误差信号  $\delta_x(x_1 - x_2)$ , 输出为  $c(t)$  经线性系统  $K_L$  的逆  $K_L^{-1}$  后形成  $c'(t)$ , 终端恢复信号为  $s(t)$ 。由驱动—响应型单耦合同步原理有  $x_1 = x_1, x_2 = x_2, x_1' = x_2'$ , 当系统同步时,  $k_r(t) \rightarrow c(t)$ , 故  $s'(t) = c'(t) - x_2 = K_L^{-1}c(t) - x_1 = s(t)$ 。线性系统  $K_L$  用来控制  $c(t)$  的参量大小, 以不破坏主系统的混沌特性为宜, 由于信息信号  $s(t)$  不是直接加入混沌系统, 从而提高了系统的安全性。此时发射端与接收端主系统方程为:

$$u_1 = \frac{1}{c_1} [G(u_2 - u_1) + c(t) - f(u_1)] \quad (7) \quad u_2 = \frac{1}{c_1} [G(u_2 - u_1) + k_r(t) - f(u_1) + \delta_x(t)(u_1 - u_1)] \quad (10)$$

$$u_2 = \frac{1}{c_2} [G(u_1 - u_2) + i_3] \quad (8) \quad u_2 = \frac{1}{c_1} [G(u_1 - u_2) + i_3] \quad (11)$$

$$i_3 = -\frac{1}{L}u_2 \quad (9) \quad i_3' = -\frac{1}{L}u_2' \quad (12)$$

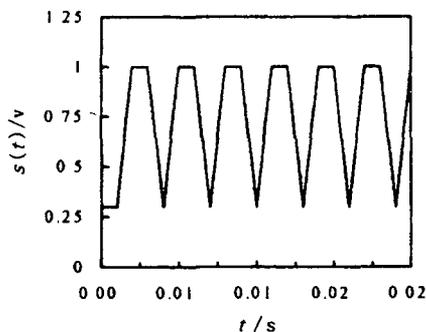
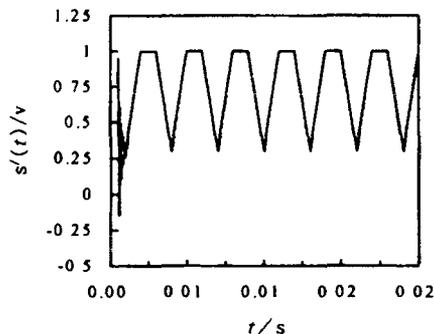
式中  $\delta_x$  为时变信道等效电导 (相当耦合系数),  $k_r(t)$  为一由自适应控制器的增益控制的受控电流源。由于发射端的电压信号  $u_1$  经时变信道传送到接收端必然发生变化, 因此在接收端不能采用通常的将  $u_1$  与  $u_1$  比较的方法来判断系统是否同步。注意到方程 (10) 右边中的第四项恰好是信道支路的电流  $i(t) = \delta_x(u_1 - u_1)$ , 当收发主系统达到混沌同步即  $u_1 \rightarrow u_1$  时有  $i(t) \rightarrow 0$ 。若  $\delta_x$  满足耦合同步条件, 则由  $c(t)$  注入发射主系统所引起的同步误差的接收端可以用  $i(t)$  来表征, 故可将其作为自适应控制器的误差信号, 该信号可通过一采样电阻  $r$  (很小) 取得。控制器增益  $k_r(t)$  的变化规律由下面的微分方程确定,  $k_r(t) = -a\delta_x(t)(u_1 - u_1)$ , 式中  $a$  为常数。该变化规律是基于自适应控制理论中关于设计模型参考自适应系统 (MRAS) 的三种基本方法之一的“梯度法”<sup>[9]</sup> 得出。自适应控制器按照  $c(t)$  的变化规律不断调节  $k_r(t)$ , 使  $k_r(t) \rightarrow c(t)$  以维持收发主系统的混沌同步。

## 3 模拟结果

设时变信道等效电导  $\delta_x$  的变化规律为

$$\delta_x(t) = 0.65 + 0.6\sin 200\pi t$$
 (mS)

自适应控制器表达式中的常数  $a = 10^8$ 。模拟结果见图 6、图 7。

图6 原信号  $s(t)$  的时域波形图7 被恢复出的信号  $s'(t)$ 

## 4 结论

本文根据 Lyapunov 的稳定性定理分析了单耦合蔡氏电路混沌同步的充分条件,提出当信道增益在一定范围内发生变化时,系统仍然可以维持混沌同步。并给出了时变信道增益中单耦合蔡氏电路构成的多级混沌同步通信系统,数值模拟结果表明该方法是可行的。

### 参考文献:

- [1] Pecora L M, Carroll L T L. Synchronization in chaotic[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(8): 821 - 824.
- [2] Pecora L M, Carroll L T L. Driving systems with chaotic signals[J]. Phys Rev A, 1991, 44(4): 2374 - 2378.
- [3] Cuomo K M, Oppenheim A V. Circuit implementation of synchronization chaos with applications to communications[J]. Phys Rev Lett., 1993, 71(1): 65 - 68.
- [4] Edieu H D, Kennedy M P, Hasler M. Chaotic shift keying: Modulation and demodulation of a chaotic carrier using self - synchronization Chua's circuits[J]. IEEE Trans Circuits Syst II, 1993, 40(10): 634 - 642.
- [5] 匡锦瑜, 裴留庆, 汤秀娟, 等. 一种多级混沌同步通信系统[J]. 电子学报, 1999, 27(6): 23 - 26.
- [6] Chua L O, Yang Tao, Zhong Guo - Qun, et al. Adaptive Synchronization of Chua's Oscillators[J]. Int J Bifurc Chaos, 1996, 6(1): 189 - 201.
- [7] Chua L O, Yang Tao, Zhong Guo - Qun, et al. Adaptive Synchronization of Chua's Circuits with Time - Varying Channels and Parameters[J]. IEEE Trans Circuits Syst I, 1996, 43(10): 634 - 642.
- [8] Yang Tao, Chua L O. Secure Communication via Chaotic Parameter Modulation[J]. IEEE Trans Circuits Syst I, 1996, 43(9): 817 - 819.
- [9] 奥斯特隆重姆 K J, 威顿马克 B. 自适应控制[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

## Chaotic Communication of Multistage Chua's Circuits with Time - varying Channels

LI Jian - fen, LI Nong

(The Engineering Institute of the Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** This paper presents a new method of chaotic communication based on multistage Chua's circuits with time - varying channel gain. In this method, the variation of channel gain is attributed to an equivalent time - varying resistor that exists in channel. Here, this resistor is regarded as coupling resistor between two Chua's circuits. At receiving end, chaos synchronization of transmitting and receiving system is judged by using current in channel. Simulation results show that chaos synchronization of two Chua's circuits can be achieved when the channel is in time - varying gain. Then a multistage chaotic synchronized system for secure communication with time - varying channel gain is given by using parameter modulation.

**Key words:** chaotic communication; chua's circuits; time - varying channels