

一个新的混沌模型及其硬件实现¹

李春福 胡志恒 虞厥邦

(电子科技大学光电子技术系 成都 610054)

摘要 该文提出了一个新的非线性动力学系统模型并对其进行了仿真研究, 结果表明此模型具有正的李雅普诺夫指数, 表现出时域伪随机性和连续的频谱, 因而此模型是一个混沌发生器. 由于它的线性子系统的条件李雅普诺夫指数均为负, 因而是可同步子系统, 能够用于混沌保密通信. 该文还给出了此模型的分段线性电路实现方法.

关键词 混沌, 混沌发生器, 混沌同步, 混沌通信

中图分类号 TN918

1 引言

目前对于混沌通信的研究逐步深入, 已经有许多基于混沌同步的保密通信方法^[1-6]. 然而目前能够用于混沌通信的混沌发生器还很少, 这在一定程度上阻碍了混沌通信的实用化进程, 因而设计出性能好的混沌发生器对混沌和混沌通信的研究来说具有很大的参考价值. 在混沌通信的研究中, 最常用的是蔡氏双涡旋混沌电路^[7], 其模型可以描述为一个三阶非线性自治动力学系统. 蔡氏电路只采用了一个非线性器件, 即一个三段线性的负阻, 并且蔡氏电路从整体结构来看是最简的混沌发生器. 本文提出了一种新的单涡旋混沌模型, 此模型也可以描述为一个三阶非线性自治动力学系统, 其电路实现也只需一个非线性器件, 即一个三段线性电压控制电压源或两段线性电压控制电压源, 从整体电路结构来看, 它比蔡氏电路要复杂, 然而它可以采用两段线性电压控制电压源来实现, 因而就非线性器件的复杂程度而言, 它是最简的混沌发生器. 本文研究了这种新的混沌发生器模型和它的两种分段线性电路实现方法. 本文在第 2 节给出此混沌发生器的模型和对模型进行仿真研究的结果; 在第 3 节给出此模型的分段线性电路实现方法; 在第 4 节中给出研究结果的小结.

2 混沌发生器的数学模型及仿真研究结果

此混沌发生器的动力学系统数学模型如下:

$$\left. \begin{aligned} dx/d\tau &= y - pz^2 \\ dy/d\tau &= -x + qy - rz \\ dz/d\tau &= s(y - z) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} L(dI/dt) &= V_2 - f(V_1) \\ C_2(dV_2/dt) &= -I + V_2/R - V_1/R_s \\ C_1(dV_1/dt) &= (V_2 - V_1)/R_v \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} dx/d\tau &= (4R^2C_2/L)(y - f(z)) \\ dy/d\tau &= -x + 2y - (2Rz/R_s) \\ dz/d\tau &= [2RC_2/(R_vC_1)](y - z) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

给定 $p = 0.5$, $s = 3$ 和 $r = 2.23$, 随着 q 的增大, 此模型将展现一个倍周期分岔的过程, 并最终导致一个混沌吸引子的出现, 图 1 给出了 $q = 1.8$, $q = 1.96$, $q = 1.985$ 和 $q = 2$ 所对应

¹ 2000-03-20 收到, 2000-08-28 定稿

的周期 1，周期 2，周期 4 和混沌状态，图 2 给出了系统处于混沌状态时 z 分量的时域波形和连续频谱特性。利用在半平面： $\{w|w = (x, y, z), x, y, z \in R, x < 0, y = 0\}$ 的庞加莱映射，可以清楚地看到随 q 的增加所呈现出的倍周期分岔到混沌的过程，见图 3，其中 z_w 为半平面 w 上的点的 z 坐标分量。随着 q 的增加，系统的最大李雅普诺夫指数 (L_{max})，最小李雅普诺夫指数 (L_{min}) 和中间李雅普诺夫指数 (L_{mid}) 的变化如图 4 所示，李雅普诺夫指数的变化说明了系统从周期解到混沌的必然转化。计算庞加莱映射和李雅普诺夫指数的算法参见文献 [8]。

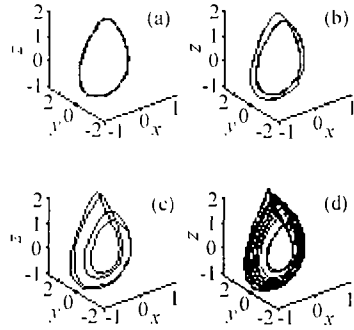


图 1 倍周期分岔导致混沌

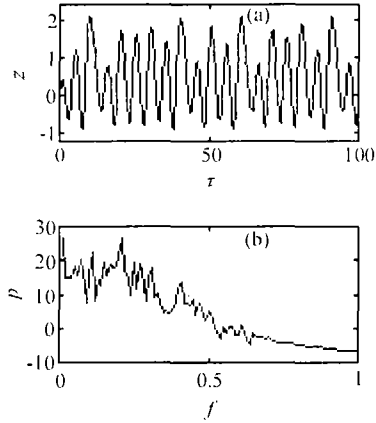


图 2 系统处于混沌状态时 z 分量的时域波形和连续频谱特性

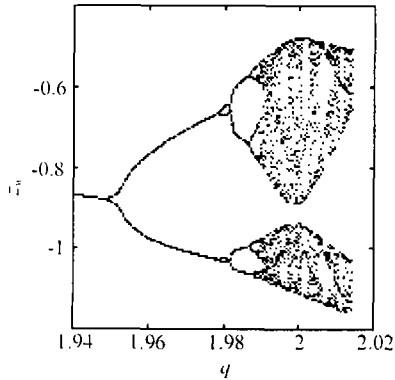


图 3 随 q 的增加系统所呈现出的分岔特性

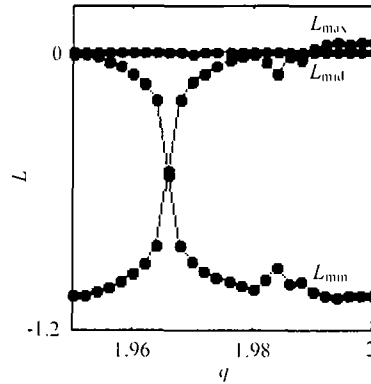


图 4 系统的三个李雅普诺夫指数 ($L_{max}, L_{mid}, L_{min}$) 随 q 的增加而发生变化

经过简单的推导计算可以知道此系统的线性子系统的两个条件李雅普诺夫指数均为负，故而此系统的线性子系统为可同步的线性子系统，此混沌发生器是可以用于混沌通信的。

3 模型的硬件实现

这里给出此混沌模型的两种分段线性电路实现，这两种分段线性电路实现的总体结构相同，只是采取了不同的分段线性 VCVS 来近似实现 (1) 式中的平方函数。

电路结构的原理如图 5：图中，NR 为线性负阻 [7]，VCCS 为线性电压控制电流源 [4]，VCVS 为分段线性的电压控制电压源，本文提出了两种实现方法，将在稍后详细描述。

根据图 5 所示的电路结构可以得出相应的动力学系统方程如 (2) 式所示，令 $t = 2RC_2\tau$, $x = 2RI$, $y = V_2$, $z = V_1$ ，则 (2) 式可以化为 (3) 式，比较 (3) 式和 (1) 式可以知道它们具有相同的动力学系统结构，只是 (1) 式中的平方函数在方程 (3) 式中被分段线性 VCVS 的端口特性函数 $f(x)$ 取代了。

当分段线性 VCVS 采用三段线性的结构时，它的电路原理和端口特性函数如图 6 和图 7 所示，此时将可变电阻 R_v 调节到合适的阻值，可以在示波器上观察到如图 8 所示的混沌吸引子；当分段线性 VCVS 采用两段线性的结构时，我们作了实验，可以获得与采用三段线性结构相类似的结果。

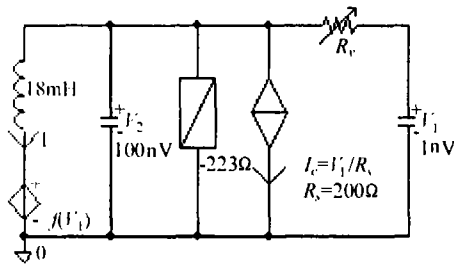


图 5 实现混沌发生器的电路结构

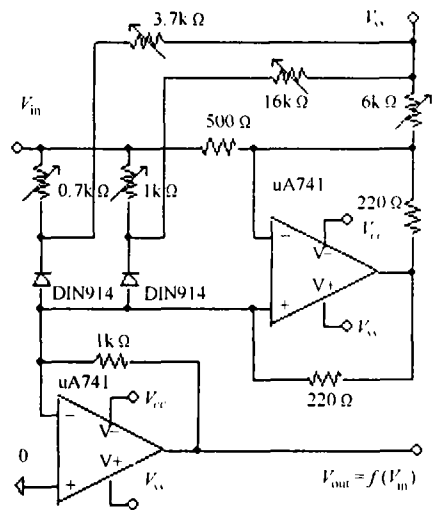


图 6 三段线性 VCVS 的电路原理图

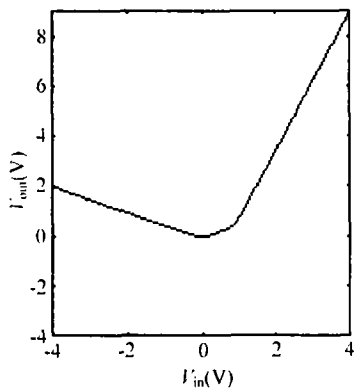


图 7 三段线性 VCVS 的端口特性

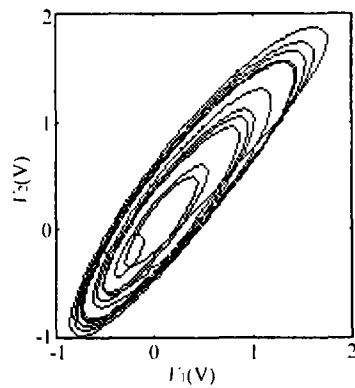


图 8 采用三段线性 VCVS 时的混沌吸引子

注：电路实验的结果是由 PSPICE5.0 仿真给出的，它与用示波器观察到的实际电路中的波形相一致。

4 小 结

本文提出了一个新的混沌发生器模型并给出了它的两种分段线性电路实现, 此模型的线性子系统是可以同步的, 因而可以用于混沌通信。实际上基于此结构会产生出一族混沌模型, 将在以后报道。

在实际中的混沌通信系统中, 具有单个正的李雅普诺夫指数的混沌发生器所能提供的保密性能是有限的。设计具有多个正的李雅普诺夫指数的混沌发生器, 或是研究利用多种混沌模型耦合来产生具有多个正的李雅普诺夫指数的混沌发生器的方法是更加值得研究的方向。

致谢 作者感谢宋琼硕士和肖贤胜学士, 是他们完成了硬件电路的调试。

参 考 文 献

- [1] M. Itoh, H. Murakami, L. O. Chua, Communication systems via chaotic modulations, *IEICE Trans. on Fundament.*, 1995, E77-A(6), 1000-1005.
- [2] H. Dedieu, M. P. Kennedy, M. Hasler, Chaotic shift keying: Modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronization of Chua's circuit, *IEEE Trans. on CAS II*, 1993, 40(10), 634-642.
- [3] N. J. Corron, D. W. Hahs, A new approach to communications using chaotic signals, *IEEE Trans. on CAS I*, 1997, 44(5), 373-382.
- [4] M. Itoh, H. Murakami, New communication systems via chaotic synchronizations and modulations, *IEICE Trans. on Fundment.*, 1995, E78-A(3), 285-290.
- [5] K. M. Cuomo, A. V. Oppenhei, S. H. Strogatz, Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications, *IEEE Trans. on CAS II*, 1993, 40(10), 626-633.
- [6] C. L. Koli, T. Ushio, Digital communication method based on M-synchronized chaotic systems, *IEEE Trans. on CAS I*, 1997, 44(5), 383-390.
- [7] M. P. Kennedy, Three steps to chaos-part II: A Chua's circuit primer, *IEEE Trans. on CAS I*, 1993, 40(10), 657-674.
- [8] T. S. Parker, L. O. Chua, *Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems*, New York, Springer-Verlag, 1989, 73-82.

A NEW CHAOS MODEL WITH ITS HARDWARE IMPLEMENTATION

Li Chunfu Hu Zhiheng Yu Juebang

(Dept. of Opto-Electronic Science and Technology, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract A new nonlinear dynamical model is presented and numerically studied. It is shown that the model has a positive Lyapunov exponent, it also has pseudo-random waveform and continuous power spectra, so it is a chaos generator. Since the conditional Lyapunov exponents of its linear subsystem are all negative, the linear subsystem is synchronizable and the new chaos generator can be used for chaotic communication. Two kinds of piecewise-linear circuit realization based on the model are given.

Key words Chaos, Chaos generator, Chaotic synchronization, Chaotic communication

李春福: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为混沌通信。

胡志恒: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为混沌通信。

虞厥邦: 男, 1932 年生, 博士生导师, 研究方向为非线性电路。