文章编号:1674-7070(2009)03-0213-05

基于 DSP 的 Liu 混沌系统的实现

翟笃庆[1]　刘崇新[1]

摘要

介绍了一种用 DSP 实现 Liu 混沌系统的方案. 采用 TMS320F2812 和 DA 转换芯片 TLC7528C 作为工具,将 Liu 系统离散化后用 DSP 进行迭代计算,再进行 DA 转换,输出到示波器上得到相图,并与 Matlab 仿真结果比较,证明了该方法的正确性. 使用该方法不仅观察到了数字电路中的混沌现象,应用到实际中还可与其他数字器件完好地对接,拓宽了混沌理论的应用领域.

关键词

Liu 混沌系统;数字信号处理器(DSP);离散系统

中图分类号 TN751.3

文献标志码 A

0　引言

Introduction

混沌理论,作为一种认为在确定性的非线性系统中,不需要附加任何的随机因素也可以出现类似随机的行为的理论,它揭示了有序与无序的统一、确定性与随机性的统一,引起了人们浓厚的兴趣. 自从 1963 年 Lorenz[1] 在气象领域的研究中提出了著名的"蝴蝶效应"后,混沌这一自然现象已经在以通信为代表的各个工程领域中得到研究并获得一些成果. 众多学者已经研究了用模拟器件搭建电路来实现以蔡氏电路[2] 和 Liu 系统[3] 为代表的混沌和超混沌吸引子的多种方法,但在研究中,模拟器件和它与生俱来的不足带来了一些困难. 例如:模拟器件受外部环境因素影响较大,常不稳定,给混沌相图的观察带来不确定因素;另外由于模拟器件的参数离散性,导致系统调试困难;再加上器件多样而且复杂,常常给研究工作带来意想不到的难题. 相比而言,数字器件则没有上述问题,并且在调试工作中,如果需要修改参数,只需修改程序中的某一数值,而不必像模拟器件那样重新选择元器件;即使实现不同的系统,也只需修改程序中的方程结构,而不必像模拟器件那样将整个电路重新搭建. 由此想到用数字器件来实现各种复杂的混沌和超混沌吸引子. 在选择何种数字器件时,考虑到对运算速度和精度的要求,本文选择的是数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP). 本文以 Liu 等[3] 提出的 Liu 系统为例,讨论其在 DSP 上的实现方法,展示该系统在示波器上的相图,并与其 Matlab 仿真结果比较,以证明该方法的可行性和正确性.

1　Liu 系统的混沌动力学分析及 Matlab 仿真

Chaotic dynamics analysis of Liu system and simulation by Matlab

Liu 等[3] 提出了一类含有平方非线性项的三阶连续自治混沌系统. Liu 系统是一类含有平方非线性项的混沌系统,展示了丰富的混沌动力学行为,其数学模型描述如下[3]:

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x), \\ \dot{y} = bx - kxz, \\ \dot{z} = -cz + hx^2. \end{cases} \tag{1}$$

由 Lyapunonv 指数分析法,对于三维系统,吸引子有 4 种性态:

1) 若系统 Lyapunov 指数为

收稿日期 2009-06-03

作者简介

翟笃庆,男,硕士生,主要研究混沌理论及其数字器件应用. zdq850831@sina.com

1　西安交通大学 电气工程学院,西安,710049

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (-, -, -),$$

则吸引子为不动点;

2) 若系统 Lyapunov 指数为

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0, -, -),$$

则吸引子为周期吸引子;

3) 若系统 Lyapunov 指数为

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0, 0, -),$$

则吸引子为拟周期吸引子;

4) 若系统 Lyapunov 指数为

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (+, 0, -),$$

则吸引子为混沌吸引子.

参数设置为 $a = 10, b = 40, k = 1, c = 2.5, h = 4$ 时,利用 Wolf 算法可以求得其 Lyapunonv 指数为

$$\lambda_1 = 1.64328, \quad \lambda_2 = 0, \quad \lambda_3 = -14.142,$$

故呈混沌状态.

令式(1)右边等于零,得方程组

$$\begin{cases} 10(y - x) = 0, \\ 40x - xz = 0, \\ 4x^2 - 2.5z = 0. \end{cases} \tag{2}$$

求解可得 Liu 系统有 3 个平衡点,分别为 $O(0,0,0)$, $P^+(5,5,40)$, $P^-(-5,-5,40)$,它的 x-z, y-z 和 x-y 相图如图 1 所示.

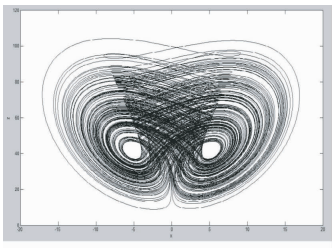
Liu 系统可用模拟电子电路来实现,前人在这方面已经做了一些研究[4-5],但用数字电路来实现还未见报道. 近来,混沌由于其貌似随机的伪随机性和频谱的连续性,被应用于保密通信方面的研究越来越广泛和深入,而混沌系统用数字器件来实现又将会推动其在保密通信领域的应用的进程. 不仅如此,Liu 系统用数字电路来实现在数字化的时代将会在航天航空、自动控制、电子电气测量领域具有重要的应用前景.

2 Liu 系统的离散化

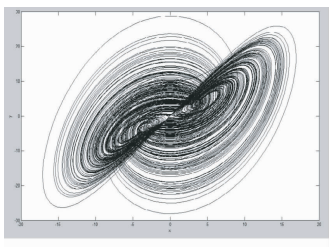
Discretization of Liu system

由于 DSP 计算过程中的离散化特性,要想将连续的系统在 DSP 上实现,首先要该系统离散化. 把一个连续系统离散化的过程,可以等价为求得解在若干点上的数值,即求微分方程的数值解,常用到的方法有欧拉法和龙格库塔法.

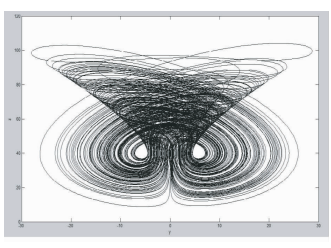
由于 DSP 本身的计算精度和速度有限,并考虑到小误差对示波器的观察效果不会产生明显影响. 在对 Liu 系统离散化时选择采用的是最简单的欧拉法.



a. x-z相图



b. x-y相图



c. y-z相图

图 1 Liu 系统的 Matlab 仿真

Fig. 1 The simulation diagram of Liu system by matlab

为了用数字电路来实现 Liu 系统,首先采用欧拉法对其离散化,得

$$\begin{cases} \dfrac{x_{i+1} - x_i}{h} = a(y_i - x_i), \\ \dfrac{y_{i+1} - y_i}{h} = bx_i - x_i z_i, \\ \dfrac{z_{i+1} - z_i}{h} = hx_i^2 - cz_i. \end{cases} \tag{3}$$

选择步长 h 时,考虑到示波器的成相效果和 DSP 的计算速度及精度,选择 $h = 0.002$. 于是,代入参数值后的离散化 Liu 系统方程如下:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + 40(y_i - x_i)/500, \\ y_{i+1} = y_i + (40x_i - x_i z_i)/500, \\ z_{i+1} = z_i + (4x^2 - 2.5z_i)/500. \end{cases} \tag{4}$$

3 实现方案

Realizing method

本文采用的 DSP 是 TI 公司的 TMS320F2812. TMS320C28x 系列是 TI 公司最新推出的 DSP 芯片,

这是目前国际市场上最先进、功能强最大的32位定点DSP芯片.它既具有数字信号处理能力,又具有强大的事件管理能力和嵌入式控制功能,特别适用于有大批量数据处理的测控场合,如工业自动化控制、电力电子技术应用、智能化仪器仪表及电机、马达伺服控制系统等[6].

将DSP的运算结果转换为模拟信号输出到示波器上成相,需要DA转换芯片的支持.本文选用的是TLC7528C,它是双路、8位数字模拟转换器,内部具有各自单独的数据锁存器,其特性包括两DAC非常精密的一致性,数据通过公共8位输入口转送至两DAC数据锁存器的任意一个.控制输入端DACA/DACB决定哪一个DAC被装载.器件的装载周期与随机存取存储器的写周期类似,能方便地与大多数通用微处理器总线或端口相接口.器件的工作电压5~15 V,功耗小于15 mW(典型值).2或4象限的乘法功能使该器件成为许多微处理器的增益设置和信号控制的良好选择.它可工作于电压模式,与电流输出相比较,更适合于电压输出.TLC7528C的工作温度范围从0 ~70 ℃.

TLC7528C控制方式比较简单,只需要将待转换的数值通过数据总线写入TLC7528C相应的寄存器就会直接送到TLC7528C转换,经过一段时间的延时之后,模拟信号就从TLC7528C的输出引脚输出.F2812通过外部扩展接口(XINTF)与TLC7528C连接,图2所示为F2812与TLC7528C的连线图.TLC7528C的两个转换寄存器分别被影射为地址0xC0002和0xC0003.TLC7528C的转换寄存器在头文件f2812.h中如下定义:

```
#define DAOUT1  *(int *)0xC0002
#define DAOUT2  *(int *)0xC0003
```

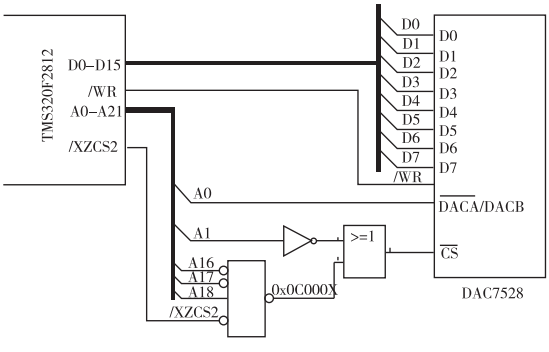
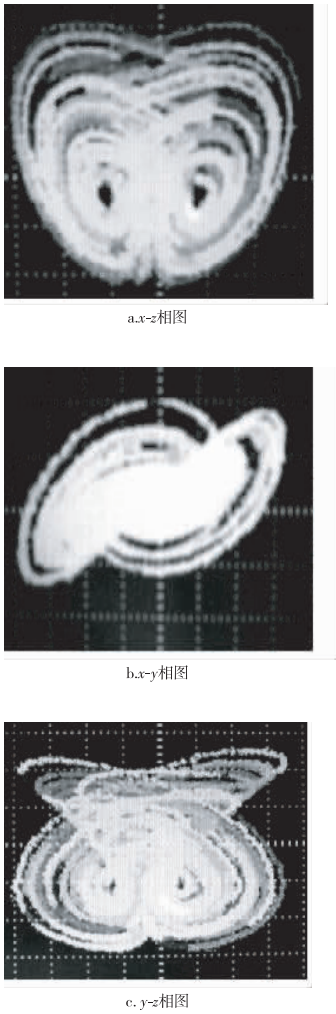


图2 TMS320F2812与TLC7528C连接

Fig. 2 The connection of TMS320F2812 and TLC7528C

由图2可看出,无论地址为0xC0002或0xC0003时,A1位始终置1,CS片选选中;而映射地址为0xC0002时,A0位为0,DACA/DACB输入为0,选择A通道进行DA转换;映射地址为0xC0003时,A0位为1,DACA/DACB输入为1,选择B通道进行DA转换.XZCS2是XINTF 2区使能信号,选择ZONE 2作为外部扩展接口.

程序算法的设计方面,通过DSP计算方程组(4),其实质就是迭代的过程,将每次迭代所得结果的x,y或z赋值给DAOUT1和DAOUT2,用示波器观察输出,即得到Liu系统的相图(图3).



a.x-z相图

b.x-y相图

c. y-z相图

图3 示波器观察的Liu系统相图

Fig. 3 The phase images of Liu system on oscilloscope

这里需要注意的是,在对x和y的值进行DA转换时,由于x和y取值范围包括正值和负值,当x或y为负值时,其8位待转换数据的存储形式为其相反数的补码.例如:-1在DA转换之前的8位数据为11111111;-2在DA转换之前的8位数据为11111110.由于芯片TLC7528C不具有识别正负号的

功能,因此,-1 进行 DA 转换后即为 255,-2 进行 DA 转换后为 254,所以需要在转换前对数据进行如下处理:

$$x' = 2^7 - x. \tag{5}$$

实质就是把图像沿 $x = 2^7$ 为对称轴翻转,即得到图 3 中所示的观察结果. 与图 1 比较,可以看出用该方法在 DSP 上实现的 Liu 系统相图与 Matlab 仿真结果一致,证明了其正确性和可行性.

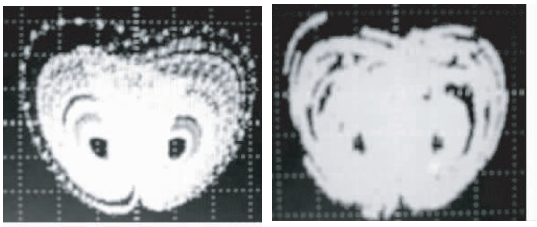
前面提到过这里选取的步长 $h = 0.002$,图 4 给出的是步长 $h = 0.01$ 和 0.001 时的 x-z 相图. 通过比较可以看出,$h = 0.01$ 时的离散特征很明显,而 $h = 0.001$ 时的混沌成像现象则不佳.

同样的实现原理,只需修改程序中的方程,也可以实现类似的混沌系统. 如图 5 就是此方法得出的 Lorenz 系统[4]的 x-z 相图和 Matlab 仿真图,比较证明该方法的普适性.

Lorenz 系统的方程描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(y - x), \\ \dot{y} = \beta x - zx - y, \\ \dot{z} = xy - \gamma z. \end{cases} \tag{6}$$

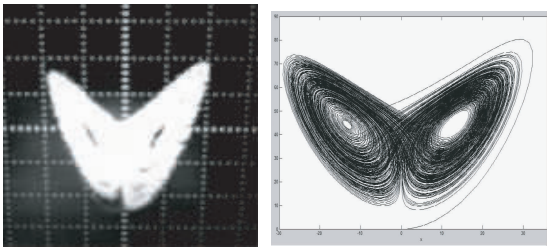
α, γ 不变,$\beta > 24.74$ 时,Lorenz 系统进入混沌状态[4]. 这里的参数设置为 $\alpha = 16, \beta = 45.2, \gamma = 4$.



a. h=0.01　　b.h=0.001

图 4　不同步长时的 Liu 系统 x-z 相图

Fig. 4　The phase diagrams of Liu system when h is different



a.示波器观察　　b.Matlab仿真

图 5　Lorenz 系统的 x-z 相图

Fig. 5　The x-z phase diagram of Lorenz system

4　问题与总结

Problems and summary

用数字器件来实现混沌系统,最大的难题就是误差问题. 误差包括方案本身带来的误差和受客观条件限制所形成的误差.

欧拉法离散化的过程本身就有误差,而且会随着每次迭代逐渐积累. 因此公式(1)中步长 h 的选取要尽可能的较小,避免误差积累. 另一方面,步长选取如果过小,又会导致示波器成像效果不佳. 而且,步长小会因为一个周期中计算次数过多,导致输出信号频率减小,在实际应用中也应考虑到这方面的问题.

客观条件带来的误差主要指 DSP 计算精度和 DA 转换芯片处理精度. DSP 的精度取决于内部寄存器的字长和电路结构及工艺,字长越长,精度越高. 另外,浮点型也比定点型有更高的计算精度. 这里所采用的 TMS320F2812 是 32 位定点 DSP 芯片. DA 转换芯片采用的是 TLC7528C,其 8 位精度要求进行 DA 转换时,有效数据必须存放在低 8 位,而且需要注意的是 DA 转换芯片只接受整型输入,浮点型数据的小数部分将被舍弃. 比如浮点型数据 $x + y$(x 为整数部分,y 为小数部分)输入到 TLC7528C 中,转换后的模拟量输出为 $A = \dfrac{x \times V_{dd}}{2^8}$,整个小数部分都会被舍去,因此会带来较大的误差. 最方便有效的克服误差的方法就是把待转换数据乘以一个放大系数,前提是要保证不会超过 DA 芯片的量程,如图 3 就是将 x 乘以 6,y 乘以 4,z 乘以 2 后进行 DA 转换的. 当然,最直接的就是尽量采用高精度的 DA 转换芯片. 考虑到这种输出偏差不会带入到迭代计算中,因此不会积累到一定程度而导致信号失真. 实际中,这种程度的偏差对观察示波器输出显示的效果的影响是可以接受的.

数字器件实现混沌系统,离散化是关键的不可缺少的步骤,而选取步长又是离散化最关键的一步. 混沌系统是非周期的,在周期信号中,采样定理(即奈奎斯特定理[7])明确规定了离散化的采样频率,而对于非周期的混沌信号,到底选取多大的采样间隔(即步长 h 的选取),目前还没有公认的较为准确的计算公式,只有通过多次的实验,才能选取到合适的步长,图 3 和图 4 的比较可以直观地了解这一点.

5 研究意义与展望

Significance of the research and its prospects

本文讨论了一个用数字器件实现 Liu 系统的方案,用示波器观察其输出结果,并与 Matlab 的软件实现结果相比较,结果证明了该方案的可行性和正确性. 这种方法与模拟器件来实现的方法比较,有着简单灵活,修改方便,受外部因素影响小等优点.

本文展示了混沌现象不同于以往的研究和发现的另一种新的存在形式. Liu 系统的数字实现,证明了混沌作为一种自然现象是确实存在的,并且不会随着离散化或者数字计算的误差而失去其原有的一些特性. 目前混沌理论已被不同程度的应用于数字保密通信、小信号频率检测、电力系统谐振抑制等领域. 在数字器件的应用越来越广泛的今天,混沌的 DSP 实现,使得它与其他应用数字器件的场合可以完好的对接,使得其应用前景越来越广阔.

参考文献

References

[1] Lorenz E N. Deterministic nonperodic flow[J]. J Atomos Sci, 1963,20:130-141

[2] Matsumoto A. A chaotic attractor from Chua's circuit[J]. IEEE Trans Circuits and Systems,1984,31:1055-1058

[3] LIU Chongxin, LIU Tao, LIU Ling, et al. A new chaotic attractor [J]. Chaos, Solitons and Fractals,2004,22:1031-1038

[4] 陈向荣,刘崇新,王发强,等. 分数阶 Liu 混沌系统及电路实验的研究与控制[J]. 物理学报,2006,57(3):1416-1422
CHEN Xiangrong, LIU Chongxin, WANG Faqiang, et al. Study on the fractional-order Liu chaotic system with circuit experiment and its control[J]. Acta Phys Sin,2006,57(3):1416-1422

[5] 王发强,刘崇新. Liu 混沌系统的混沌分析和电路实验的研究[J]. 物理学报,2006,55(10):5061-5069
WANG Faqiang, LIU Chongxin. Studies on Liu chaotic system and its experimental confirmation[J]. Acta Phys Sin,2006,55(10): 5061-5069

[6] 苏奎峰,吕强,耿庆峰,等. TMS320F2812 的原理与开发[M]. 北京:电子工业出版社,2005
SU Kuifeng, LÜ Qiang, GENG Qingfeng, et al. The theory and exploitation of TMS320F2812[M]. Beijing: Press of Electronics Industry,2005

[7] Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory[J]. IEEE Transactions,1928,47:617-644

Realization of Liu chaotic system based on digital signal processor

ZHAI Duqing[1] LIU Chongxin[1]

1 School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Abstract A way to realize Liu chaotic system based on DSP(digital signal processor) is introduced in this paper. We use TMS320F2812 and the digital-to-analog converting chip TLC7528C as our instrument. At first we have Liu system scattered to iteratively calculate it on DSP. The results are digital-to-analog converted and output to the oscillograph to get phase diagrams, which are compared with the results of Matlab simulation to testify the correctness of this method. Using this method, we can not only observe the phenomenon of chaos in digital circuits and apply it in real projects, but also have it work very well with other digital device, so as to make the theory of chaos more widely used in the future digital world.

Key words Liu chaotic system; digital signal processor(DSP); scattered system