

基于现场可编程逻辑门阵列的新型混沌系统实现*

邵书义¹⁾ 闵富红^{1)†} 吴薛红¹⁾ 张新国²⁾

1) (南京师范大学电气与自动化工程学院, 南京 210042)

2) (兰州大学信息科学与工程学院, 兰州 730000)

(2013年11月21日收到; 2013年12月03日收到修改稿)

构建了一个新的五维变形蔡氏系统, 通过数值仿真, 分析平衡点的稳定性、分岔图和 Lyapunov 指数谱, 研究系统特有的基本非线性动力学行为, 还分析了改变不同参数时系统动力学行为的变化. 基于混沌系统的数值仿真分析以及数字化处理技术, 将五维变形蔡氏系统状态方程进行离散化处理, 并根据 IEEE-754 标准和模块化设计理念构建出实现混沌系统变量运算关系的基本模块, 进一步利用现场可编程逻辑门阵列硬件平台实现了五维变形蔡氏系统的混沌吸引子. 研究表明, 新五维变形蔡氏系统具有新的混沌动力学行为, 并通过硬件证实了新系统的存在性和物理上的可实现性.

关键词: 混沌系统, 动力学行为, 现场可编程逻辑门阵列硬件实现

PACS: 05.45.-a, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.63.060501

1 引言

非线性科学是当今世界科学的前沿和热点, 涉及自然科学和社会科学的众多领域, 而混沌问题又是非线性科学的核心问题之一^[1]. 自从1963年描述湍流现象的 Lorenz 混沌系统被提出后, 研究者相继提出了多种不同的混沌系统(如 Rössler 系统、Chen 系统、Lü 混沌系统、统一混沌系统、含多翼蝴蝶混沌吸引子的混沌系统和产生网格多翅膀吸引子的混沌系统)^[2-6]. 混沌具有内在的随机性和初值敏感性等特点, 使其特别适合于系统的保密通信^[7,8]和图像隐藏等信息领域^[9-12]. 文献^[7, 8]基于混沌系统的同步, 研究了不同的保密通信方案, 将需要传送的有用信号隐藏于统一混沌系统的参数中, 从构造的接收端无失真地恢复出有用信息, 实现了信号安全保密传输. 文献^[9-12]中基于各种混沌序列, 提出了不同的新型图像加密策略, 并且分别对密钥空间、像素分布特性、相关系数、抗差分攻击能力以及密钥敏感性进行了测试和分析, 证

明了这些方案的安全性. 文献^[7-12]成功地利用混沌系统实现了图像隐藏和保密通信. 由于低维混沌系统结构简单, 带宽相对较窄, 因此其安全保密的效果不是太理想. 高维混沌动力系统具有比较大的密钥空间, 伪随机性更好, 且信息不容易被数字滤波器滤掉. 因此, 在非线性动力学领域高维混沌系统具有很好的研究价值.

目前, 对混沌系统动力学行为的验证, 多数是应用电阻电容、集成运算放大器和模拟乘法器设计物理电路以实现混沌系统^[13-18]. 文献^[13-18]都分别提出了一个新混沌系统并分析了其动力学的基本特性, 在理论分析的基础上设计了新混沌系统的电路并进行仿真实验, 验证了系统在物理上的可实现性, 但发现用模拟器件实现混沌系统需要确定器件的参数较多且不易确定. 由于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)具有容量大和可靠性高等优点, 使得其在现代数字信号处理中有着广泛的应用. 随着FPGA技术的发展, 利用FPGA技术验证混沌系统动力学行为已成为一个热门的课题^[19-25]. 刘强等^[19]提出一种利用混沌加密算法和传统加密算

* 国家自然科学基金(批准号: 51075275)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20131402)、教育部留学回国人员科研启动基金(批准号: 20121707)和江苏省“六大人才”高峰计划资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: minfuhong@njnu.edu.cn

法的混沌加密系统, 并且采用FPGA技术进行硬件开发. Azzaz等^[20]提出一种新的切换律, 将四个不同的三维系统组合成一个新的混沌系统, 并基于FPGA技术进行了硬件实现, 该新型切换混沌系统更加有利于保密通信的应用. 文献^[21—23]采用DSP Builder设计电路, 提出了一种利用FPGA平台和电子设计自动化开发工具实现新型混沌系统的方法, 其不是根据IEEE-754标准用硬件描述语言实现混沌系统. 周武杰等^[24]结合混沌加密体制与传统密码体制, 设计了基于IEEE-754标准和FPGA技术的混沌数字通信系统. 文献^[25]利用IEEE-754标准和模块化设计理念, 提出了一种基于FPGA的通用混沌信号发生器和超混沌信号发生器硬件实现的新方法. 目前, 在已有的相关研究成果中, 利用IEEE-754标准和模块化设计理念实现混沌系统动力学行为的文献并不多.

本文将IEEE-754标准和模块化设计理念应用到新的超混沌系统, 并基于FPGA完成硬件实现. 以四阶变形蔡氏系统模型^[26]为基础, 将系统中的四个变量按照定量关系与第五个变量组成一个新的微分方程, 从而构建出一个新的五维变形蔡氏混沌系统, 通过分析系统的基本动力学特性, 证实了新混沌系统吸引子的存在性. 此外, 对新五维变形蔡氏混沌系统的数学模型进行离散化处理, 并基于

QUARTUS II9.0软件和FPGA硬件平台, 完成对新五维变形蔡氏混沌系统动力学行为的硬件实现, 证实了该系统在物理上的可实现性.

2 新混沌系统的基本分析

2.1 数学模型

本文提出的新五维变形蔡氏混沌系统的数学模型为

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a(y - m_0x + m_1f(x)), \\ \frac{dy}{dt} &= x - y + z, \\ \frac{dz}{dt} &= -14.7y + 0.17w, \\ \frac{dw}{dt} &= -0.01(z + w), \\ \frac{dq}{dt} &= -2.5x - 0.01y - 5z + 0.003w - q, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 非线性函数 $f(x) = 0.5(|x + 1| - |x - 1|)$; m_0, m_1, a 为实常数. 当参数 $m_0 = 0.256, m_1 = 0.4, a = 10$ 时, 此系统存在一个典型的混沌吸引子如图 1 所示.

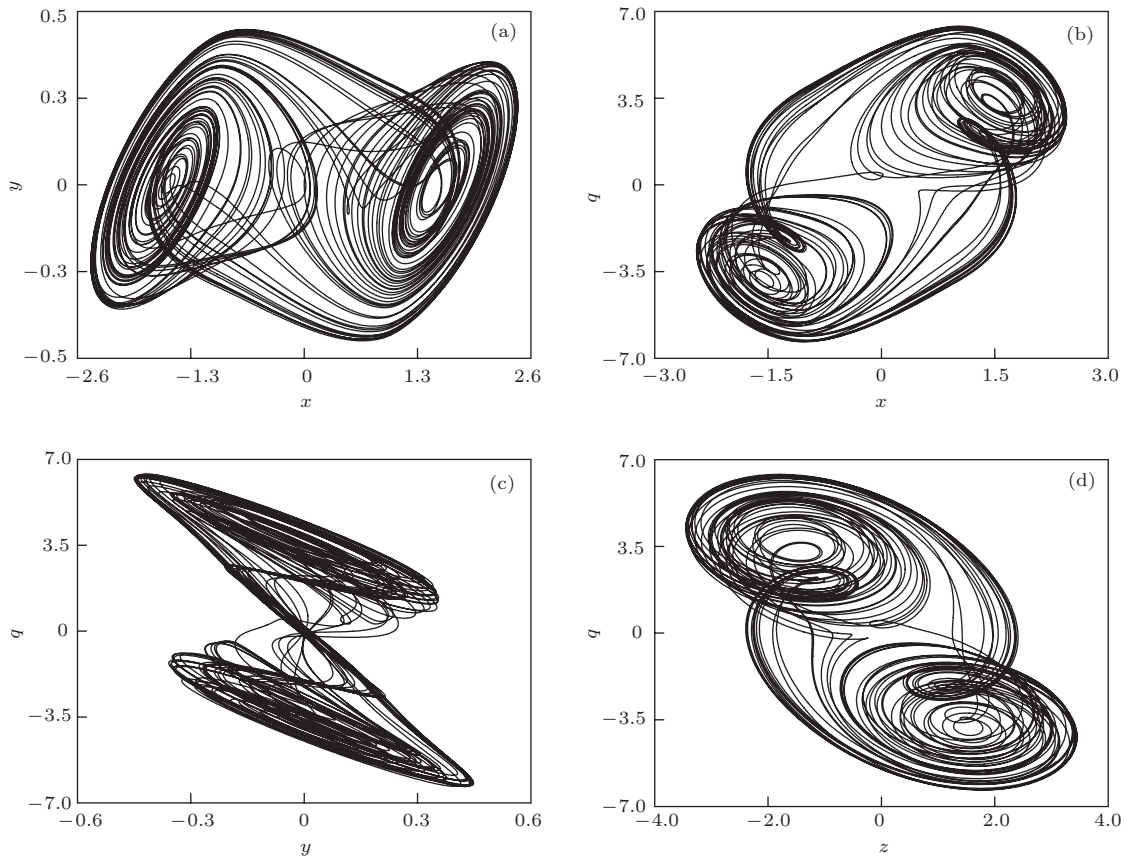


图 1 系统 (1) 的典型混沌吸引子 (a) x - y 相图; (b) x - q 相图; (c) y - q 相图; (d) z - q 相图

2.2 基本动力学特性

系统(1)的非线性函数 $f(x)$ 将相空间划分为三个区域, 分别为

$$\begin{aligned} D_1 &= \{(x, y, z, w, q) | x > 1\}, \\ D_0 &= \{(x, y, z, w, q) | -1 \leq x \leq 1\}, \\ D_{-1} &= \{(x, y, z, w, q) | x < -1\}. \end{aligned} \quad (2)$$

在各个线性区域中, $f(x)$ 可表示为

$$\begin{aligned} f(x) &= 0.5(|x + 1| - |x - 1|) \\ &= \begin{cases} 1 & (D_1 = \{(x, y, z, w, q) | x > 1\}), \\ x & (D_0 = \{(x, y, z, w, q) | -1 \leq x \leq 1\}), \\ -1 & (D_{-1} = \{(x, y, z, w, q) | x < -1\}), \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

平衡点方程为

$$a(y - m_0x + m_1f(x)) = 0,$$

$$\mathbf{J}_0(x_Q) = \begin{bmatrix} -2.56 + 4\partial f(x)/\partial x & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -14.7 & 0 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0 & -0.01 & -0.01 & 0 \\ -2.5 & -0.01 & -5 & 0.003 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在三个平衡点处对应的 Jacobi 矩阵分别为

$$\mathbf{J}(D_1) = \mathbf{J}(D_{-1}) = \begin{bmatrix} -2.56 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -14.7 & 0 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0 & -0.01 & -0.01 & 0 \\ -2.5 & -0.01 & -5 & 0.003 & -1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{J}(D_0) = \begin{bmatrix} 1.44 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -14.7 & 0 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0 & -0.01 & -0.01 & 0 \\ -2.5 & -0.01 & -5 & 0.003 & -1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

为了求平衡点 $O = (0, 0, 0, 0, 0)$ 所对应的特征值, 令

$$\det(\mathbf{J}(D_0) - \mathbf{E}) = 0, \quad (8)$$

其中 \mathbf{E} 为单位矩阵. 从而得到平衡点 $O = (0, 0, 0, 0, 0)$ 对应的特征值为 $\lambda_1 = -1$, $\lambda_2 = -1.033 + 2.716i$, $\lambda_3 = -1.033 - 2.716i$, $\lambda_4 = 2.507$,

$$\begin{aligned} x - y + z &= 0, \\ -14.7y + 0.17w &= 0, \\ -0.01(z + w) &= 0, \\ -2.5x - 0.01y - 5z + 0.003w - q &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

利用(3)和(4)式得到的平衡点的计算结果列于表1.

表1 三分段相空间时五维变形蔡氏混沌系统的平衡点

线性区域	$f(x)$	平衡点
D_1	1	$P^+ = (1.64, 0.02, -1.62, 4, 1.62)$
D_0	x	$O = (0, 0, 0, 0, 0)$
D_{-1}	-1	$P^- = (-1.64, -0.02, 1.62, -4, -1.62)$

将系统(1)在平衡点附近线性化, 得到 Jacobi 矩阵为

$\lambda_5 = -0.011$. 这里 λ_1 和 λ_5 为负实根, λ_4 为正实根, λ_2 和 λ_3 为负实部的共轭复根. 因此, 平衡点 $O = (0, 0, 0, 0, 0)$ 是一个不稳定的鞍焦点. 对于平衡点 P^+ 和 P^- , 采用同样的方法求得对应的特征值为 $\lambda'_1 = -1$, $\lambda'_2 = -4.057$, $\lambda'_3 = 0.248 + 3.036i$, $\lambda'_4 = 0.248 - 3.036i$, $\lambda'_5 = -0.01$. 这里 λ'_1 , λ'_2 和

λ_5 为负实根, λ_3 和 λ_4 是正实部的共轭复根. 因此, 平衡点 P^+ 和 P^- 是两个不稳定的鞍焦点. 根据上述对于平衡点稳定性的分析可知, 系统 (1) 的三个平衡点都是不稳定的, 满足该系统存在混沌特性的条件.

2.3 系统参数的影响

随着系统参数的改变, 系统平衡点的稳定性将会发生变化, 从而使系统处于不同的状态. 通过对 Lyapunov 指数 (LE) 谱和分岔图的分析, 可以直观地表明各个系统参数改变时系统状态的变化情况. 这里讨论改变参数 a 对系统 (1) 状态的影响, 该系统随参数 a 变化的 LE 谱和分岔图如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 在参数 a 发生变化条件下, 当系统呈现周期运动时, 所有 LE 都小于零, 而当系统处于混沌运动时, 系统存在一个或者两个正的 LE.

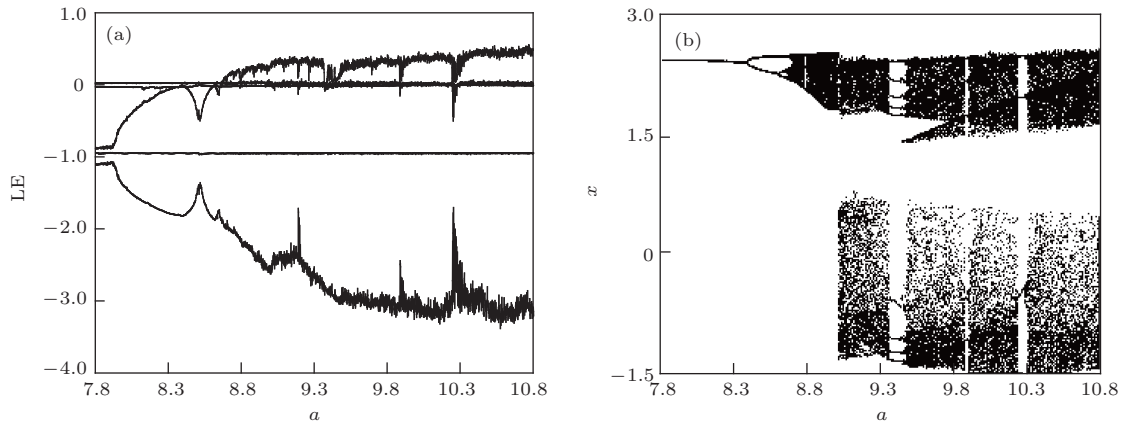


图2 系统 (1) 随参数 a 变化的 LE 谱和分岔图 (a) LE 谱; (b) 分岔图

3 五维变形蔡氏混沌系统的 FPGA 硬件实现

目前, 混沌系统主要运用模拟电路产生混沌信号, 对利用 IEEE-754 标准和模块化设计理念在 FPGA 上实现混沌系统动力学行为的研究鲜少. 为了直观地呈现和验证新混沌系统的动力学行为, 下面基于 ALTERA 公司开发的 QUARTUS II 9.0 软件和 CYCLONE 系列 FPGA 芯片进行混沌系统动力学行为硬件实现. 首先, 利用欧拉算法对五维变形蔡氏系统作离散化处理, 得到离散化后的差分方程为

$$x(n) = (1 - \Delta T a m_0)x(n-1) + \Delta T a y(n-1) + 0.5 \Delta T a m_1 [|x(n-1)|$$

为了清晰地呈现五维变形蔡氏系统随参数 a 变化由倍周期进入混沌的过程, 图 3 给出了该系统随参数 a 变化的局部分岔图, 图 4 给出了系统 (1) 随参数 a 变化的运动相图. 由图 3 可知, 当 $a = 8.37$ 时, 系统 (1) 处于 1 周期运动状态如图 4(a) 所示, 并且在参数 $a = 8.374$ 时系统 (1) 开始进入 2 周期运动状态. 当 $a = 8.51$ 时, 系统 (1) 处于 2 周期运动状态如图 4(b) 所示, 在参数 $a = 8.61$ 处, 系统 (1) 开始进入 4 周期运动状态. 当 $a = 8.63$ 时, 系统 (1) 处于 4 周期运动状态如图 4(c) 所示, 并且在参数 $a = 8.657$ 时系统 (1) 开始进入 8 周期运动状态. 当 $a = 8.667$ 时, 系统 (1) 处于 8 周期运动状态如图 4(d) 所示, 而在参数 $a = 8.67$ 处, 系统 (1) 开始进入混沌运动状态. 当 $a = 8.75$ 时, 系统 (1) 处于单涡卷混沌运动状态如图 4(e) 所示. 上述分析展现了当参数 a 变化时新五维变形蔡氏系统由倍周期进入混沌的演化过程.

$$+ 1| - |x(n-1) - 1|],$$

$$y(n) = \Delta T x(n-1) + (1 - \Delta T)y(n-1) + \Delta T z(n-1),$$

$$z(n) = -14.7 \Delta T y(n-1) + z(n-1) + 0.17 \Delta T w(n-1),$$

$$w(n) = -0.01 \Delta T z(n-1) + (1 - 0.01 \Delta T)w(n-1),$$

$$q(n) = -2.5 \Delta T x(n-1) - 0.01 \Delta T y(n-1) - 5 \Delta T z(n-1) + 0.003 \Delta T w(n-1) + (1 - \Delta T)q(n-1), \quad (9)$$

其中, 参数 $m_0 = 0.256$, $m_1 = 0.4$, $a = 10$, ΔT 为离散化的取样时间. 这里通过新混沌系统的硬件实验选取 $\Delta T = 0.002$.

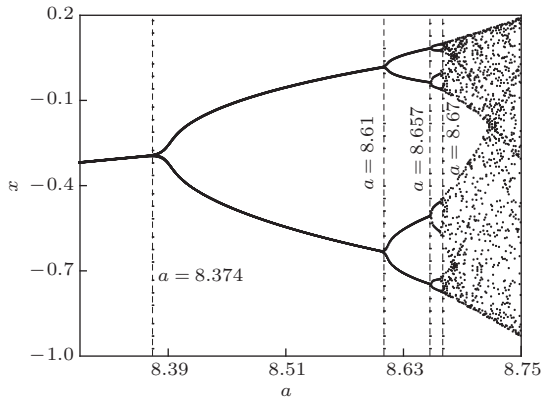


图3 系统(1)的倍周期分岔图

对于混沌序列的计算, 由于受到数字系统字长的限制, 无论采用何种浮点运算精度, 通过数字设计所得到的混沌序列只能是对实际连续混沌系统的一种逼近. 在设计系统(1)时统一采用32位单精度浮点数算法, 在IEEE-754标准下单精度格式所对应的公式为 $(-1)^S \times (1 + M) \times 2^{(E-B)}$, 其中, B 为偏移值 (单精度取127); S 表示符号位 (1代表负数, 0代表正数); E 为阶码, 表示指数位 (单精度8位); M 为尾位, 表示有效数字位 (单精度23位).

下面给出设计混沌系统所需的主要浮点数运算模块, 并根据运算模块功能进行性能验证. 首先,

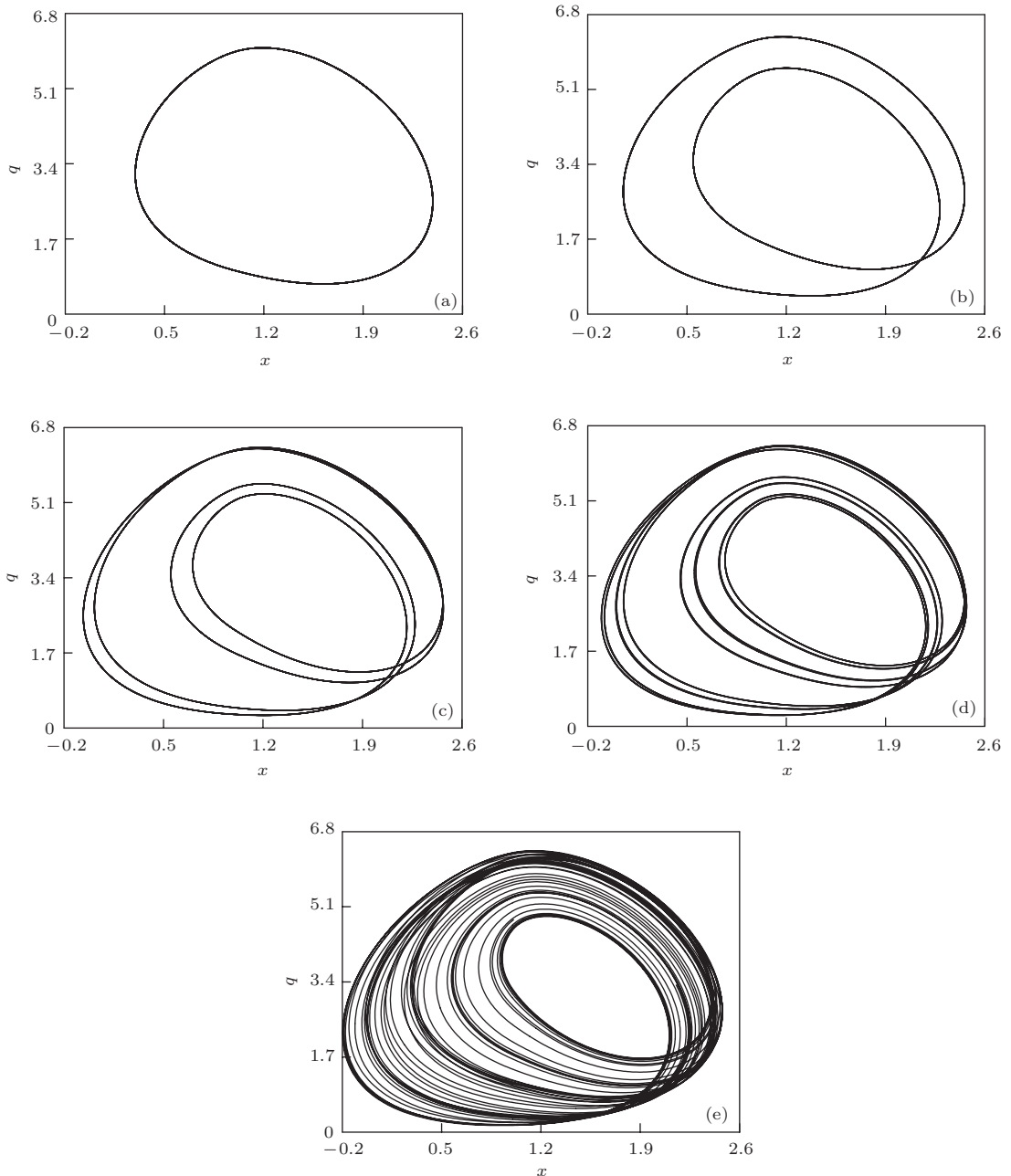


图4 系统(1)随参数 a 变化的运动相图 (a) 1 周期 $x-q$ 相图; (b) 2 周期 $x-q$ 相图; (c) 4 周期 $x-q$ 相图; (d) 8 周期 $x-q$ 相图; (e) 单涡卷混沌 $x-q$ 相图

根据IEEE-754标准以及浮点数加法运算规则编写Verilog程序,经QUARTUS II 9.0软件编译后得到32位浮点数加法器模块F_ADD1如图5(a)所示.这里driver表示驱动信号,clk表示时钟信号,rst表示复位信号,inst和inst1分别表示第一个模块的标号和第二个模块的标号,INPUT表示输入.当取输入值 $f_a = 40000000$ (单精度格式表示形式), $f_b = 40000000$, $f_{a2} = 40000000$ 时,浮点数加法器模块输出 $f_{out} = 40C00000$,在QUARTUS II 9.0软件下三个浮点数相加的时序仿真波形如图5(b)所示,验证了32位浮点数加法器

模块的正确性.然后,根据浮点乘法运算规则编写Verilog程序,经QUARTUS II 9.0软件编译后得到32位浮点数乘法器模块F_MUL如图6(a)所示.当取输入值 $f_a = 40000000$, $f_b = 40000000$, $f_{b2} = 40000000$ 时,浮点数乘法器模块输出 $f_{out} = 41000000$,在QUARTUS II 9.0软件下三个浮点数相乘的时序仿真波形如图6(b)所示,表明32位浮点数乘法器模块具有正确的浮点乘法功能.当遇到两个乘积项相加时,需要控制两个乘法器模块都运算结束后再执行加法运算,因此设计了一个延时触发CHENGXIN模块,如图7所示.

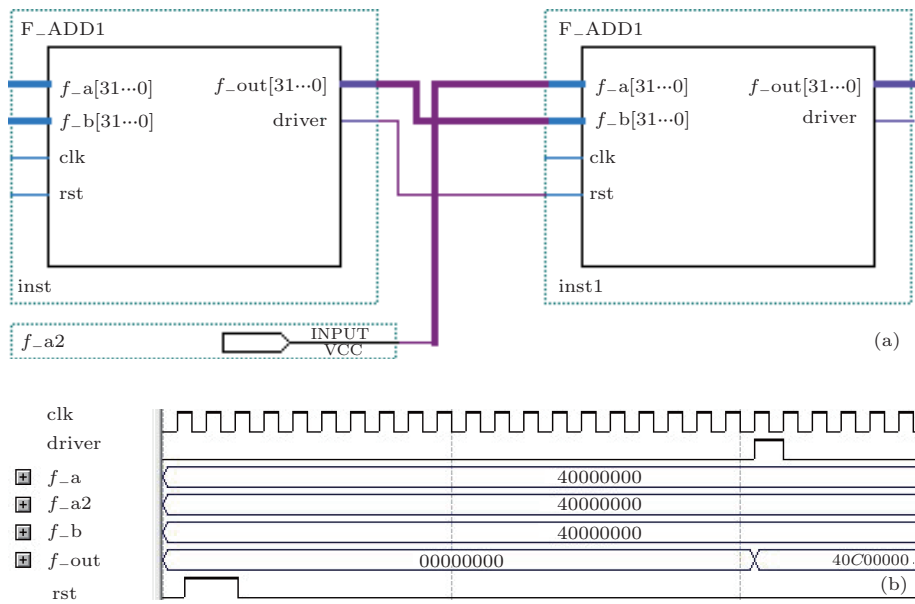


图5 32位浮点数加法器模块图及时序波形图 (a) 浮点数加法器模块图; (b) 仿真时序波形图

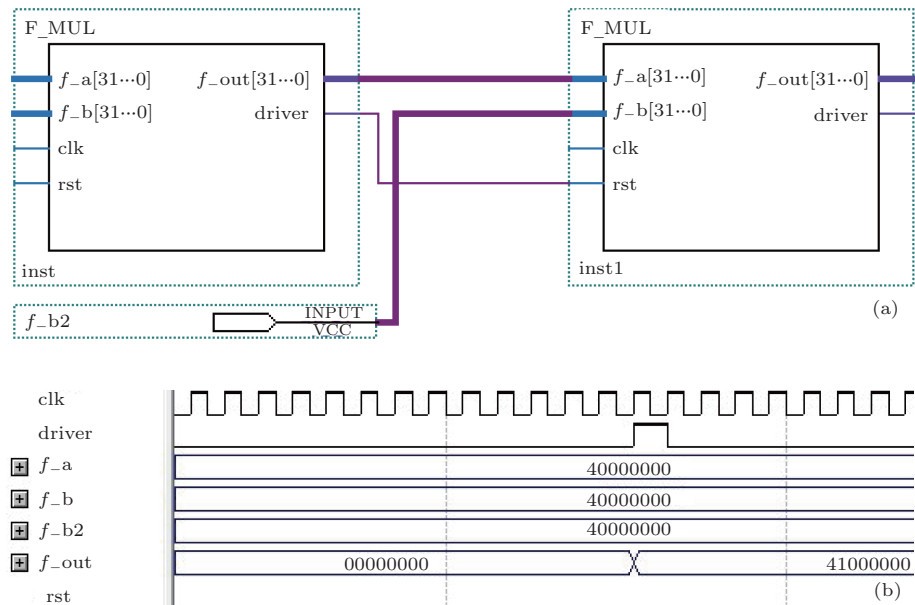


图6 32位浮点数乘法器模块图及时序波形图 (a) 浮点数乘法器模块图; (b) 仿真时序波形图

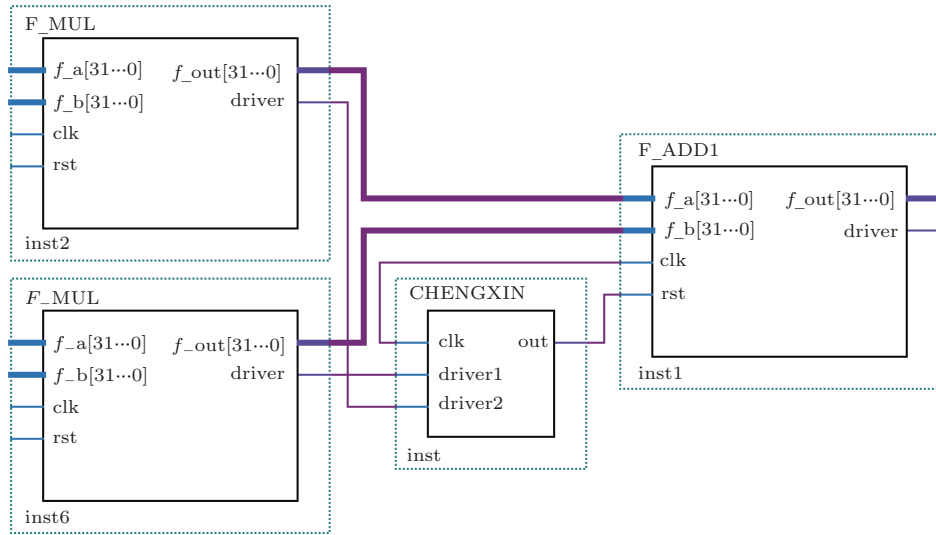


图7 实现两个乘积项相加的结构图

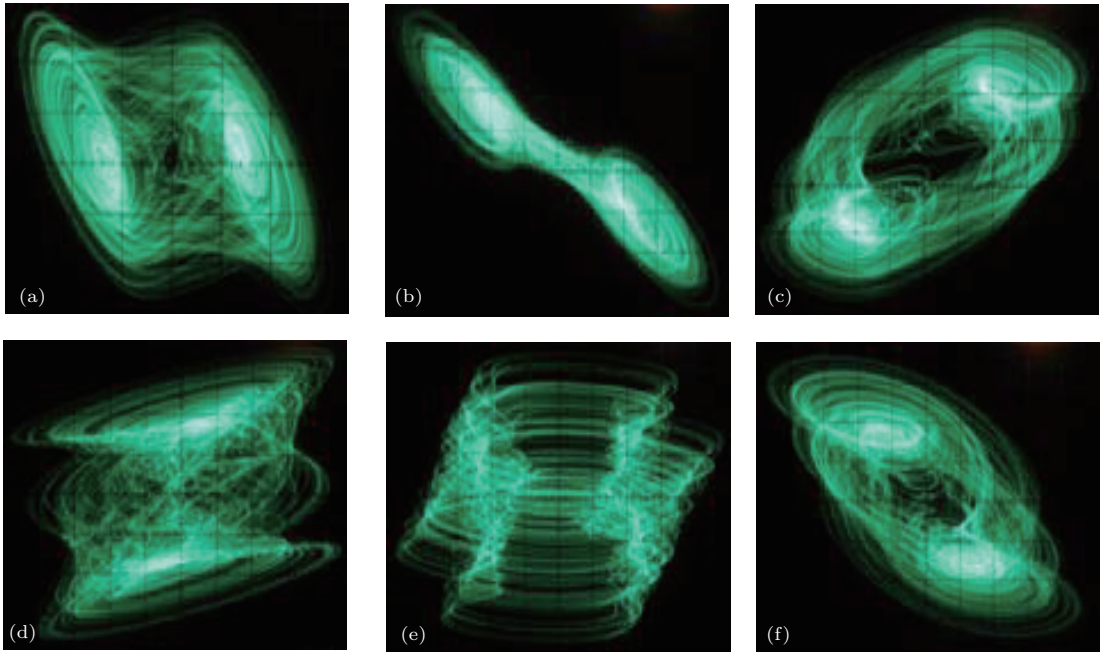


图8 五维变形蔡氏系统混沌吸引子的FPGA硬件实现结果 (a) $x-y$ 相图; (b) $x-z$ 相图; (c) $x-q$ 相图; (d) $y-q$ 相图; (e) $z-w$ 相图; (f) $z-q$ 相图

根据五维变形蔡氏系统变量组成关系, 基于QUARTUS II 9.0软件, 充分利用浮点数加法器模块、浮点数乘法器模块、延迟触发模块、初始值与迭代运算模块以及浮点数正负绝对值运算模块实现五维变形蔡氏系统的构建. 进一步, 将FPGA输出的数字信号转换为模拟信号, 通过示波器得到五维变形蔡氏系统模拟结果如图8所示, 该系统呈现复杂的混沌运动, 硬件模拟结果与图1数值仿真结果一致, 验证了新五维变形蔡氏系统的动力学行为. 通过上述理论分析和仿真实验证实了本文提出的非线性系统具有新的混沌运动特性, 并具有一切混沌系统的共有特性.

4 结 论

本文构建了一个新的五维变形蔡氏系统, 讨论了系统随参数 a 变化的动力学特性, 分析了新五维变形蔡氏系统由倍周期进入混沌的演化过程. 根据新混沌系统的数学模型和欧拉算法, 对五维变形蔡氏系统进行离散化处理, 并基于QUARTUS II 9.0软件和FPGA硬件平台, 完成了对新五维变形蔡氏系统混沌吸引子的硬件实现, 证实了该系统在物理上的可实现性. 这突破了以往用模拟电路产生混沌吸引子的方法, 为进一步研究基于FPGA的五维混沌系统的同步、控制及其在保密通信中的应用打下

了坚实的基础。

参考文献

- [1] Chen G, Dong X 1998 *From Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and Applications* (Singapore: World Scientific)
- [2] Chen G R, Ueta T 1999 *Int. J. Bifur. Chaos* **9** 1465
- [3] Lü J H, Chen G R 2002 *Int. J. Bifur. Chaos* **12** 659
- [4] Yu F, Wang C H, Yin J W, Xu H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 020506 (in Chinese)[余飞, 王春华, 尹晋文, 徐浩 2012 物理学报 **61** 020506]
- [5] Liu C X, Liu T, Liu L, Liu K 2004 *Chaos Solitons. Fract.* **22** 1031
- [6] Luo M W, Luo X H, Li H Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 020512 (in Chinese)[罗明伟, 罗小华, 李华青 2013 物理学报 **62** 020512]
- [7] Shao S Y, Min F H, Ma M L, Wang E R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 130504 (in Chinese)[邵书义, 闵富红, 马美玲, 王恩荣 2013 物理学报 **62** 130504]
- [8] Hua C C, Yang B, Ouyang G X, Guan X P 2005 *Phys. Lett. A* **342** 305
- [9] Wang Z, Huang X, Li Y X, Song X N 2013 *Chin. Phys. B* **22** 010504
- [10] Guan Z H, Huang F J, Guan W J 2005 *Phys. Lett. A* **346** 153
- [11] Wang X Y, Luan D P 2013 *Commun. Nonlin. Sci. Numer. Simulat.* **18** 3075
- [12] Jin J 2012 *Opt. Lasers Eng.* **50** 1836
- [13] Zhou X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 030504 (in Chinese)[周小勇 2012 物理学报 **61** 030504]
- [14] Li C L, Yu S M, Luo X S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 110502 (in Chinese)[李春来, 禹思敏, 罗晓曙 2012 物理学报 **61** 110502]
- [15] Feng C W, Cai L, Kang Q, Zhang L S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 030503 (in Chinese)[冯朝文, 蔡理, 康强, 张立森 2011 物理学报 **60** 030503]
- [16] Wang G Y, Qiu S S, Li H W, Li C F, Zheng Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2872
- [17] Kim D, Chang P H, Kim S H 2013 *Nonlin. Dyn.* **73** 1883
- [18] Abooe A, Yaghini-Bonabi H A, Jahed-Motlagh M R 2013 *Commun. Nonlin. Sci. Numer. Simulat.* **18** 1235
- [19] Liu Q, Fang J Q, Zhao G, Li Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 130508 (in Chinese)[刘强, 方锦清, 赵耿, 李永 2012 物理学报 **61** 130508]
- [20] Azzaz M S, Tanougast C, Sadoudi S, Fellah R, Dandache A 2013 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* **18** 1792
- [21] Wang Z L 2008 *Comput. Eng. Appl.* **44** 84 (in Chinese)[王忠林 2008 计算机工程与应用 **44** 84]
- [22] Wang Z L, Wang G Y 2009 *Comput. Eng. Des.* **30** 3365 (in Chinese)[王忠林, 王光义 2009 计算机工程与设计 **30** 3365]
- [23] Wang G Y, Bao X L, Wang Z L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3596
- [24] Zhou W J, Yu S M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 113 (in Chinese)[周武杰, 禹思敏 2009 物理学报 **58** 113]
- [25] Zhou W J, Yu S M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4738 (in Chinese)[周武杰, 禹思敏 2008 物理学报 **57** 4738]
- [26] Yin Y Z 1996 *Int. J. Bifurc. Chaos* **6** 2101

Implementation of a new chaotic system based on field programmable gate array*

Shao Shu-Yi¹⁾ Min Fu-Hong^{1)†} Wu Xue-Hong¹⁾ Zhang Xin-Guo²⁾

1) (School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

2) (School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(Received 21 November 2013; revised manuscript received 03 December 2013)

Abstract

A new five-dimensional modified Chua's system is proposed and its dynamic properties are investigated through numerical simulations, the stabilization of equilibrium points, bifurcation diagrams, and Lyapunov exponent spectrum. The different dynamic behaviors of the new system are analyzed with system parameters changed. Based on the mathematical model of the new system and the digital processing technology, the five-dimensional modified Chua's system is discretized. According to IEEE-754 standard and module-based design idea, basic floating-point operational modules are designed. Furthermore, the chaotic attractors of the five-dimensional modified Chua's system are realized by field programmable gate array. The investigation results show that the chaotic system is different from the existing chaotic systems. It also shows a good agreement between numerical simulation and hardware implementation, which proves the existence and realizability of the new chaotic system.

Keywords: chaotic system, dynamical behavior, field programmable gate array implementation

PACS: 05.45.-a, 05.45.Pq

DOI: [10.7498/aps.63.060501](https://doi.org/10.7498/aps.63.060501)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51075275), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20131402), the Scientific Research Starting Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of Ministry of Education, China (Grant No. 20121707), and the "Summit of the Six Top Talents" Program of Jiangsu Province, China.

† Corresponding author. E-mail: minfuhong@njnu.edu.cn