

一个新的混沌系统的构建与实现*

李春来^{1)3)†} 禹思敏¹⁾ 罗晓曙¹⁾²⁾

1) (广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

2) (广西师范大学电子工程学院, 桂林 541004)

3) (湖南理工学院物理与电子学院, 岳阳 414006)

(2011 年 10 月 11 日收到; 2011 年 10 月 24 日收到修改稿)

参考 Chen 系统和 Liu 系统的构建模式, 对 Lorenz 系统进行改造, 构建一个新的三维自治混沌系统. 讨论了平衡点的性质, 给出了系统的功率谱图、Poincare 截面图, 并利用分岔图和 Lyapunov 指数谱详细分析了各参数变化对系统动力学行为的影响. 研究发现, 交叉乘积项参数 d 和平方项参数 e 变化时, 系统的 Lyapunov 指数谱保持恒定, 且参数 d 具有全局非线性调幅功能, 参数 e 具有局部非线性调幅功能. 另外, 设计了该混沌系统的模拟电路, 实验结果证实了混沌系统的可实现性.

关键词: 混沌系统, 恒 Lyapunov 指数谱, 非线性调幅, 电路实现

PACS: 05.45.-a

1 引言

Lorenz 系统^[1]是第一个在实验中被发现的混沌模型, 在混沌学的形成和发展过程中具有不可替代的作用, 并成为混沌理论和应用研究的范例. 许多学者以 Lorenz 系统为基础提出了各种变形混沌系统. 1999 年 Chen 等^[2]采用线性反馈控制方法控制 Lorenz 系统时发现了著名的 Chen 系统; 2002 年, Lü 等^[3]发现了 Lü 混沌系统, 成为了沟通 Lorenz 系统和 Chen 系统的桥梁; 随后 Lü 等^[4]发现了连接上述三个混沌系统的统一混沌系统; 2003 年 Liu 等^[5]在 Lorenz 系统的基础上构建了具有光滑二次非线性函数的四翼混沌系统; 2004 年 Liu 等^[6]发现了含有平方项的 Liu 混沌系统; 2005 年, Qi 等^[7]等在 Lorenz 混沌系统的第一个方程上增加一个非线性项, 发现了 Qi 混沌系统. 另外, 近年来各种新混沌系统不断被提出, 如光滑多翼混沌系统^[8,9], 超混沌系统^[10-14], 恒 Lyapunov 指数谱系统^[15,16], 分数阶系统^[17]等. 新的混沌系统的不断发现和提出, 进一步促进了人们对混沌现象的认识和研究, 丰富和完善了混沌学的研究内容, 从而也提高了混沌理

论在混沌雷达通信、图像和语音信息加密、故障诊断和信号检测等方面的工程应用能力^[18].

本文参考 Chen 系统^[2]和 Liu 系统^[6]的构建模式, 对 Lorenz 系统进行改造, 构建了一个新的三维自治混沌系统, 系统包含一个交叉乘积项和一个平方项. 对系统的基本动力学行为进行了深入的研究, 包括平衡点的性质、系统的功率谱图和 Poincare 截面图, 并利用分岔图和 Lyapunov 指数谱详细分析了不同参数变化对系统动力学行为的影响. 数值仿真与理论分析发现, 交叉乘积项参数 d 和平方项参数 e 变化时, 系统的 Lyapunov 指数谱保持恒定, 即具有双参数恒 Lyapunov 指数谱特性^[15], 且具有双参数调幅特性, 即参数 d 和 e 具有非线性调幅作用. 其中 d 为全局调幅参数, 输出信号 x_1, x_2 的幅值与 d 呈幂函数关系变化, 其指数为 $-1/2$, 输出信号 x_3 的幅值与 d 也呈幂函数关系变化, 其指数为 -1 ; 平方项系数 e 为局部调幅参数, 输出信号 x_1, x_2 的幅值与 e 呈幂函数关系变化, 其指数为 $-1/2$, 而输出信号 x_3 的幅值与 e 的变化无关, 其幅值保持在同样的数值区间. 同时我们根据乘法器调幅模型, 采用乘法运算来实现混沌信号 (状态变量) 对余弦周期信号的振幅调制, 研究

* 国家自然科学基金 (批准号: 61172023, 60871025, 10862001)、广东省自然科学基金 (批准号: S2011010001018, 8151009001000060) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20114420110003) 资助的课题.

† E-mail: lichunlai33@126.com

发现, 在参数 d 和 e 的变化 (增加) 过程中, 调幅系数也随之变化 (增加), 且信息信号幅值取较大值时, 调幅系数也较大, 从而信噪比和功率利用率都较高. 这对混沌保密通信的研究具有重要指导意义. 另外, 我们设计了该混沌系统的硬件电路, 从实验中观察到了混沌吸引子, 从而证实了该混沌系统的可实现性.

2 新混沌系统的构建与基本分析

参考 Chen 系统和 Liu 系统的构建模式, 对 Lorenz 系统进行改造, 构建了一个新的三维自治混沌系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a(x_2 - x_1), \\ \dot{x}_2 = (c - a)x_1 + cx_2 - dx_1x_3, \\ \dot{x}_3 = -bx_3 + ex_2^2, \end{cases} \quad (1)$$

式中 x_1, x_2, x_3 为系统变量, a, b, c, d, e 是正的常数. 当 $a = 38, b = 3, c = 30, d = 1, e = 1$ 时, 系

统存在一个典型的混沌吸引子, 如图 1 所示. 此时系统 (1) 的三个 Lyapunov 指数为 3.68279, 0.01105, -19.76254.

2.1 连续功率谱与 Poincare 截面图

当 $a = 38, b = 3, c = 30, d = 1, e = 1$ 时, 不同系统的频谱图如图 2 所示. 计算的频谱均被单位标准化, 取大于单位谱十分之一的频谱范围作为信号的频谱带宽. 从图 2 可以看出, 新系统的连续频谱带宽大约在 0—75 kHz, 而 Lorenz 系统, Liu 系统和 Chen 系统的频谱带宽分别大约在 0—38 kHz, 0—64 kHz 和 17—75 kHz, 说明系统 (1) 是混沌系统, 且序列的频谱相对较宽.

相同参数条件下系统在两个截面上的 Poincare 截面图如图 3 所示, 可以看出, Poincare 截面上有一些成片的具有分形结构的密集点, 且吸引子的叶片清晰可见. 这进一步说明了此时系统 (1) 处于混沌态.

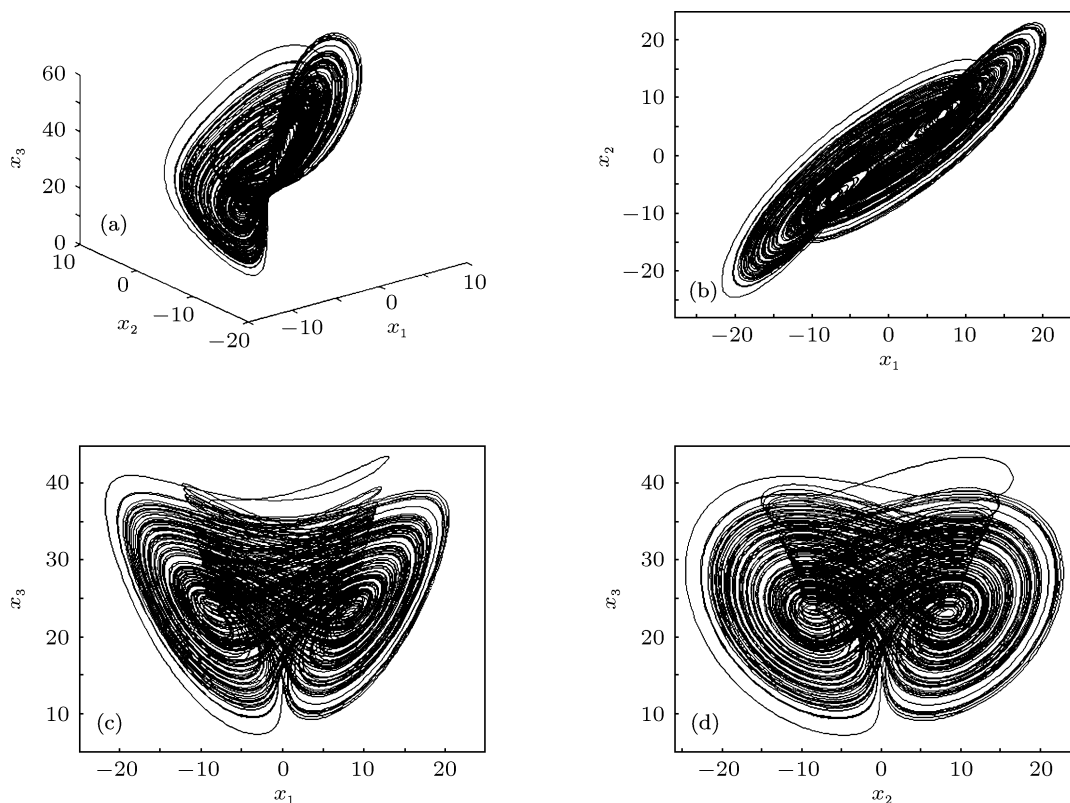


图 1 混沌系统的相图 (a) x_1 - x_2 - x_3 相图; (b) x_1 - x_2 相图; (c) x_1 - x_3 相图; (d) x_2 - x_3 相图

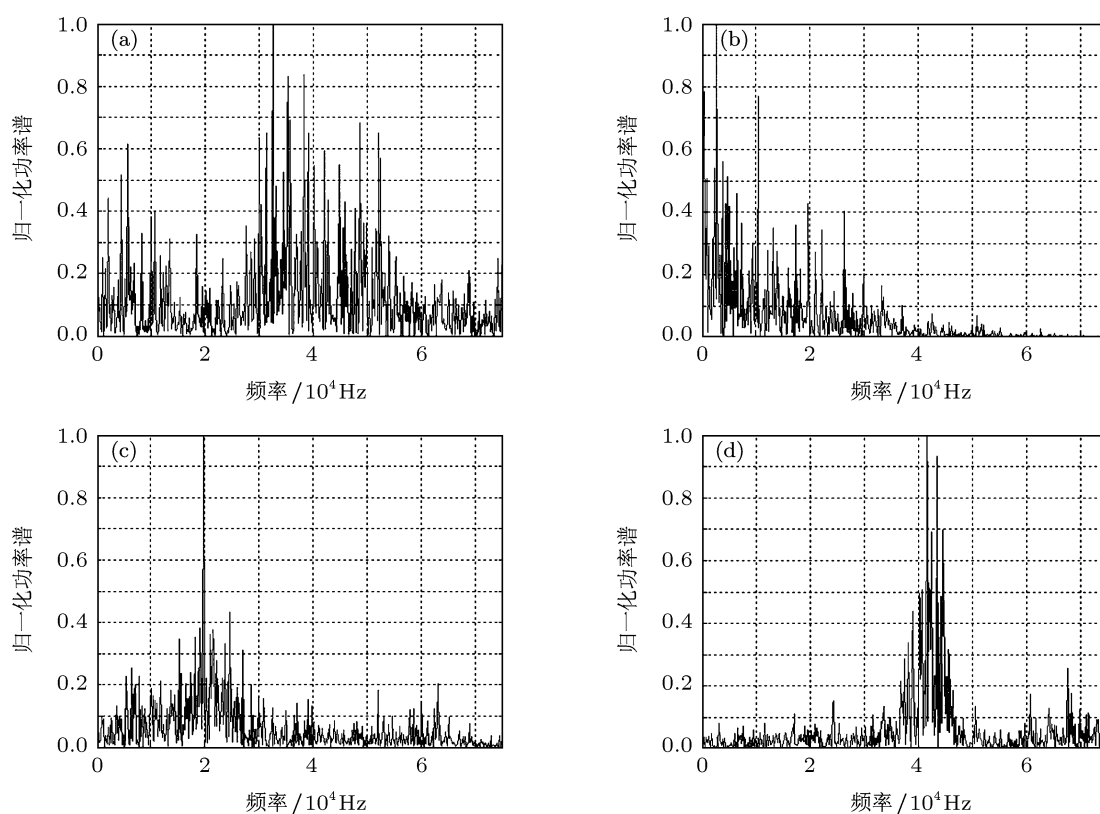


图2 $a = 38, b = 3, c = 30, d = 1, e = 1$ 时系统的连续功率谱 (a) 新系统; (b) Lorenz 系统; (c) Liu 系统; (d) Chen 系统

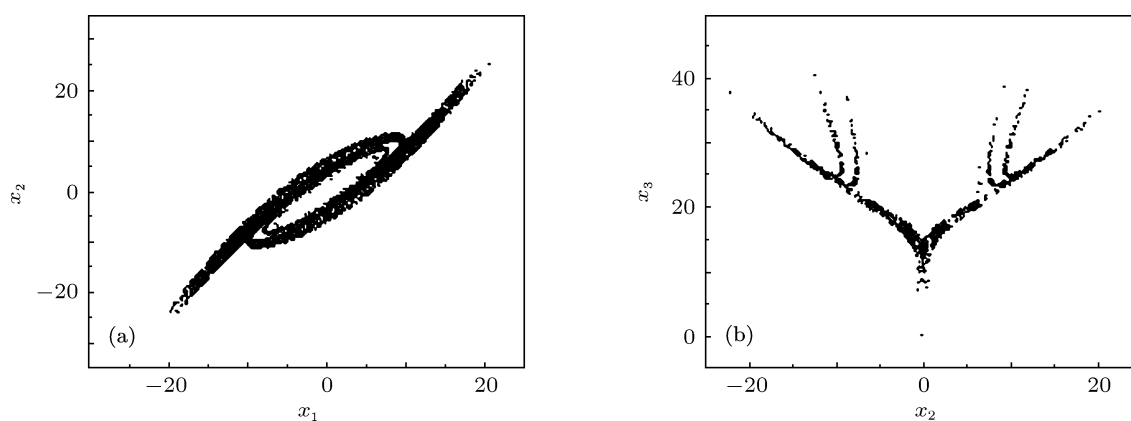


图3 $a = 38, b = 3, c = 30, d = 1, e = 1$ 时, 系统在两个截面上的 Poincaré 截面图 (a) $x_3 = 27$; (b) $x_1 = x_2$

其 Jacobian 矩阵

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c - a - dx_{30} & c & -dx_{10} \\ 0 & 2ex_{20} & -b \end{bmatrix}, \quad (2)$$

及特征多项式

$$f(\lambda) = \lambda^3 + A_2\lambda^2 + A_1\lambda + A_0, \quad (3)$$

2.2 平衡点及其稳定性

令系统 (1) 各式右边等于零, 容易得到系统的三个平衡点, 分别为 $P_0(0, 0, 0)$, $P_1(\sqrt{b(2c-a)/de}, \sqrt{b(2c-a)/de}, (2c-a)/d)$, $P_2(-\sqrt{b(2c-a)/de}, -\sqrt{b(2c-a)/de}, (2c-a)/d)$, 为保证系统存在实平衡点, 系统参数需满足 $2c - a \geq 0$.

在平衡点 (x_{10}, x_{20}, x_{30}) 处线性化系统 (1), 得

其中

$$\begin{aligned} A_2 &= a + b - c, \\ A_1 &= -ac + ab - bc + 2dex_{10}x_{20} \\ &\quad - a(c - a - dx_{30}), \\ A_0 &= -abc - ab(c - a - dx_{30}) \\ &\quad + 2adex_{10}x_{20}. \end{aligned} \quad (4)$$

根据 Routh-Hurwitz 判据, 要使平衡点稳定, 所有的特征值都必须具有负实部, 此时应满足 $A_2 > 0$, $A_1 > 0$, $A_0 > 0$, $A_2A_1 - A_0 > 0$. 因此, 当 $a = 38$, $b = 3$, $c = 30$, $d = 1$, $e = 1$ 时, 系统 (1) 在三个平衡点处的特征值都不具有负实部, P_0 , P_1 和 P_2 都是不稳定的平衡点.

3 系统参数的影响

3.1 系统的分岔分析

从系统三个方向上的 Lyapunov 指数谱 L_1 , L_2 , L_3 和分岔图可直观地分析出系统运动状态的变化

情况, 下面我们对不同参数下系统的 Lyapunov 指数谱和分岔图进行了讨论.

固定参数 $b = 3$, $c = 30$, $d = 1$, $e = 1$, 当 $a \in [31, 55]$ 时, 系统的 Lyapunov 指数谱和分岔图如图 4 所示. 由图 4 可知, 当 $a \in [31, 35.7] \cup [38.6, 38.9] \cup [45.8, 46.1]$ 时, 最大 Lyapunov 指数 L_1 为 0, 系统表现为周期运动形式, 并且系统在 $a = 35.1$ 处出现倍周期分岔; 当 $a \in (35.7, 38.6) \cup (38.9, 45.8) \cup (46.1, 51.2]$ 时, 有一个正的 Lyapunov 指数, 系统处于混沌状态; 当 $a \in (51.2, 55]$, 系统 Lyapunov 指数均小于 0, 系统为稳定状态.

固定参数 $a = 38$, $c = 30$, $d = 1$, $e = 1$, 当 $b \in [0, 12]$ 时, 系统的 Lyapunov 指数谱和分岔图如图 5 所示. 由图 5 可知, 当 $b \in [0, 2.1] \cup [2.15, 6.35]$ 时, 有一个正的 Lyapunov 指数, 系统处于混沌状态; 当 $b \in (2.1, 2.15) \cup (6.35, 12]$ 时, 最大 Lyapunov 指数为 0, 系统表现为周期运动形式, 并且系统在 $b = 7.0$ 和 10.5 处出现倍周期分岔.

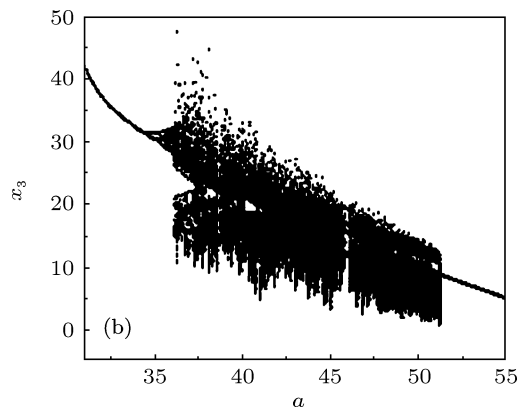
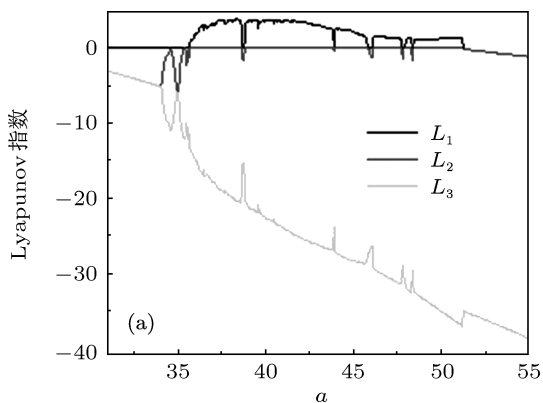


图 4 a 变化时系统 (1) 的 Lyapunov 指数谱和分岔图 (a) Lyapunov 指数谱; (b) 分岔图

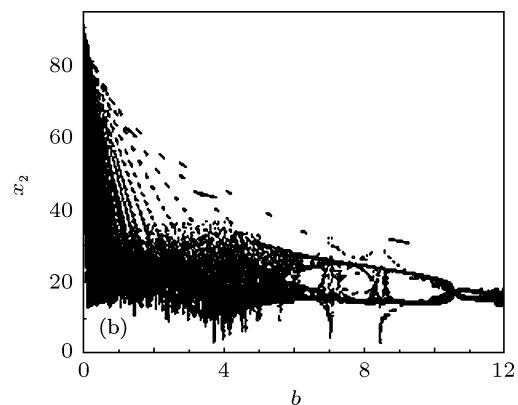
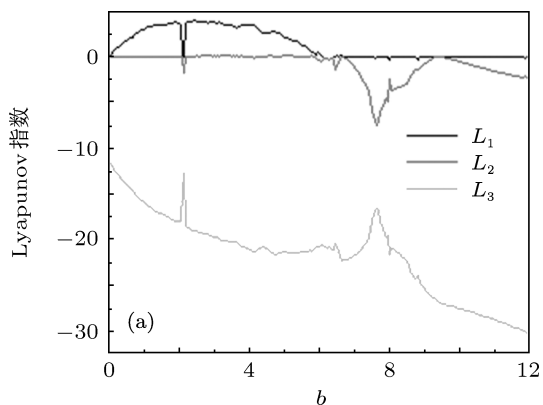
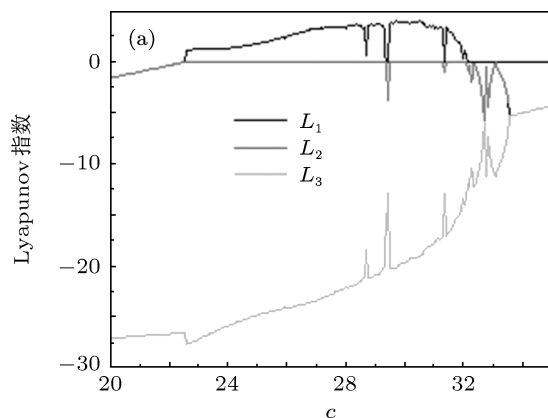


图 5 b 变化时系统 (1) 的 Lyapunov 指数谱和分岔图 (a) Lyapunov 指数谱; (b) 分岔图

固定参数 $a = 38, b = 3, d = 1, e = 1$, 当 $c \in [20, 35]$ 时, 系统的 Lyapunov 指数谱和分岔图如图 6 所示. 由图 6 可知, 当 $c \in [20, 22.5]$ 时, 系统 Lyapunov 指数均小于 0, 系统为稳定状态; 当 $c \in [29.3, 29.5] \cup [32.3, 35]$ 时, 最大 Lyapunov 指数为 0, 系统表现为周期运动形式, 并且系统在 $c = 33.55$ 处出现倍周期分岔. 在其他参数范围内, 有一个正的 Lyapunov 指数, 系统处于混沌状态.



固定参数 $a = 38, b = 3, c = 30, e = 1$, 当 $d \in [0, 40]$ 时, 系统的 Lyapunov 指数谱和分岔图如图 7 所示. 由图 7 可见, 随着 d 的变化, 系统的 Lyapunov 指数谱维持不变, 此时的 Lyapunov 指数实质就是系统在 $a = 38, b = 3, c = 30, d = 1, e = 1$ 时的 Lyapunov 指数值, 而系统的输出信号 x_1, x_2, x_3 的幅度随 d 的增大而减小.

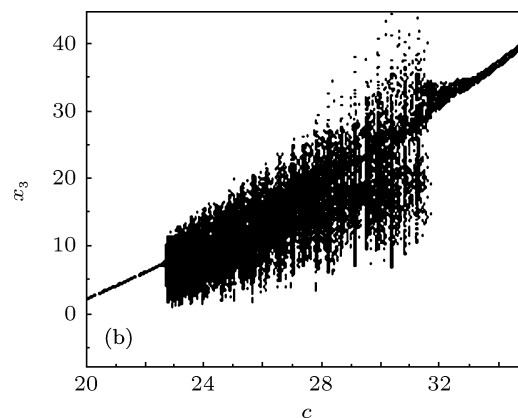


图 6 c 变化时系统 (1) 的 Lyapunov 指数谱和分岔图 (a) Lyapunov 指数谱; (b) 分岔图

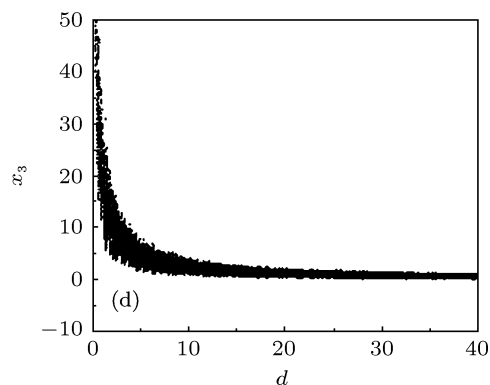
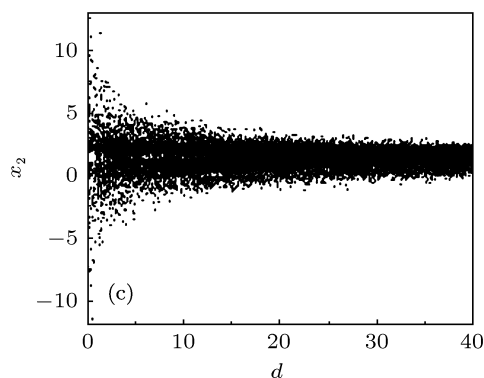
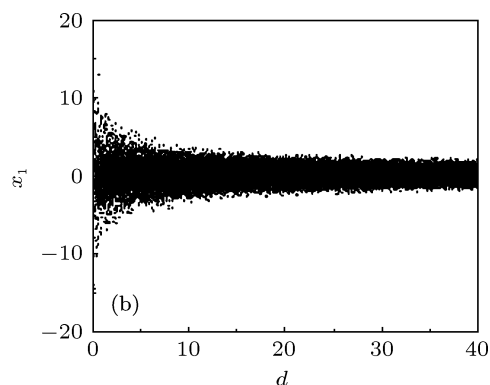
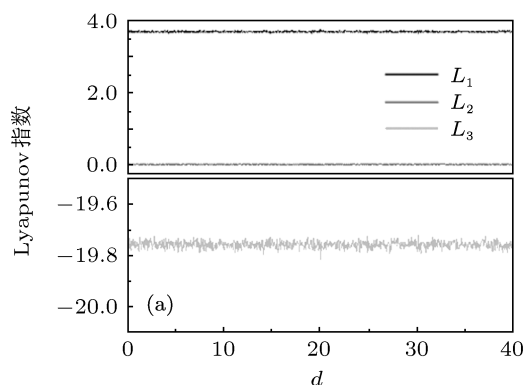


图 7 d 变化时系统 (1) 的 Lyapunov 指数谱和分岔图 (a) Lyapunov 指数谱; (b) x_1 - d 分岔图; (c) x_2 - d 分岔图; (d) x_3 - d 分岔图

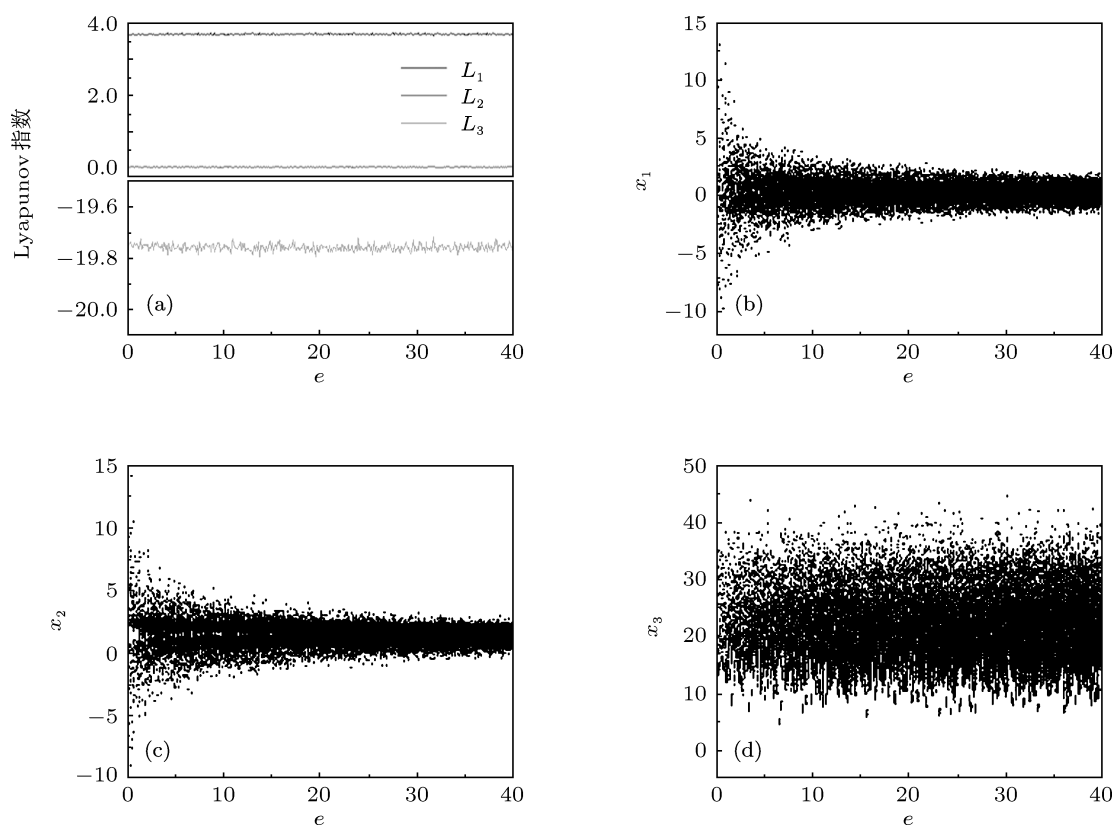


图8 e 变化时系统(1)的Lyapunov指数谱和分岔图 (a) Lyapunov指数谱; (b) x_1 - e 分岔图; (c) x_2 - e 分岔图; (d) x_3 - e 分岔图

固定参数 $a = 38, b = 3, c = 30, d = 1$, 同样地, 当 $e \in [0, 40]$ 时, 系统的Lyapunov指数谱维持不变, 系统的输出信号 x_1, x_2 的幅度随着 e 的增大而减小, 但 x_3 的幅度保持在一个固定的范围内. 这些特点可由图8的Lyapunov指数谱和分岔图得出.

3.2 双参数恒Lyapunov指数谱特性分析

由上面分析可知, 当参数 d 或 e 变化时, 系统的Lyapunov指数谱保持恒定. 事实上, 当我们将系统平衡点值代入特征多项式参数表达式(4)式时, 会消除参数 d 和 e . 例如, 将 P_0 代入, 得 $A_2 = a+b-c, A_1 = -2ac+ab-bc+a^2, A_0 = -2abc+a^2b$; 将 P_1 或 P_2 代入, 得 $A_2 = a+b-c, A_1 = -ab+3bc, A_0 = 4abc-2a^2b$. 因此, (3)式对应的特征值与参数 d 和 e 无关, d 和 e 不影响系统在相空间上的动力学特征, 即在参数 d 或 e 变化时, 系统(1)的Lyapunov指数保持不变.

3.3 双参数非线性调幅特性分析

同样由上面分析可知, 当参数 d 或 e 变化时, 系

统的输出信号幅度部分或全部发生变化, 即参数 d 和 e 具有调幅作用, 其中交叉乘积项系数 d 是全局非线性调幅参数, 平方项系数 e 是局部非线性调幅参数.

定理1 交叉乘积项系数 d 是全局调幅参数, 输出信号 x_1, x_2 的幅值与 d 呈幂函数关系变化, 其指数为 $-1/2$, 输出信号 x_3 的幅值与 d 也呈幂函数关系变化, 其指数为 -1 .

证明 令 $x_1 = \sqrt{k}x_1^*, x_2 = \sqrt{k}x_2^*, x_3 = kx_3^* (k > 0)$, 则系统(1)可变为如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1^* &= a(x_2^* - x_1^*), \\ \dot{x}_2^* &= (c - a)x_1^* + cx_2^* - dkx_1^*x_3^*, \\ \dot{x}_3^* &= -bx_3^* + ex_2^{*2}. \end{aligned} \quad (5)$$

可见, 混沌系统输出的三个状态变量的非线性调整对应于交叉乘积项系数 d 的尺度变化, d 是全局非线性调幅参数, 且输出信号 x_1, x_2 的幅值随 d 呈 $1/\sqrt{d}$ 关系变化, 即与 d 呈幂函数关系变化, 其指数为 $-1/2$, 输出信号 x_3 的幅值与 d 也呈幂函数关系变化, 其指数为 -1 .

定理2 平方项系数 e 是局部调幅参数, 输出

信号 x_1, x_2 的幅值与 e 呈幂函数关系变化, 其指数为 $-1/2$, 而输出信号 x_3 的幅值与 e 的变化无关.

证明 令 $x_1 = \sqrt{k}x_1^*, x_2 = \sqrt{k}x_2^*, x_3 = x_3^*$ ($k > 0$), 则系统 (1) 变为

$$\begin{aligned}\dot{x}_1^* &= a(x_2^* - x_1^*), \\ \dot{x}_2^* &= (c - a)x_1^* + cx_2^* - dx_1^*x_3^*, \\ \dot{x}_3^* &= -bx_3^* + ekx_2^{*2}.\end{aligned}\quad (6)$$

同理可知, 系统 (1) 的输出信号 x_1, x_2 的非线性调整对应于平方项系数 e 的尺度变化, e 是局部非线性调幅参数, 且输出信号 x_1, x_2 的幅值与 e 呈幂函数关系变化, 其指数为 $-1/2$, 而输出信号 x_3 的幅值与 e 的变化无关.

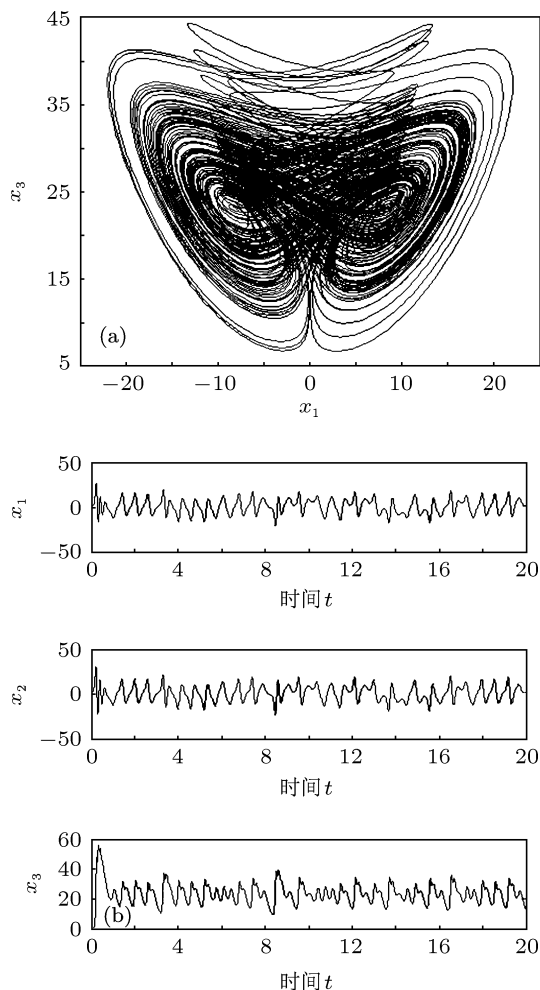


图9 $d = 1$ 时系统 (1) 相图与波形图 (a) x_1 - x_3 平面相图; (b) 波形图

作为实例说明, 我们仅考虑 d 变化时系统信号幅度的变化情况. 由图 9 和图 10 可知, 当 $d = 100$ 时, x_1, x_2 信号幅度为 $d = 1$ 时的 $1/10$, x_3 信号幅度为 $d = 1$ 时的 $1/100$, 即 x_1, x_2 信号幅度随 d 呈 $1/\sqrt{d}$ 关系变化, x_3 信号幅度随 d 呈 $1/d$ 关系变

化, 这一特点也可以由图 7 (b)—(d) 的分岔图中看出.

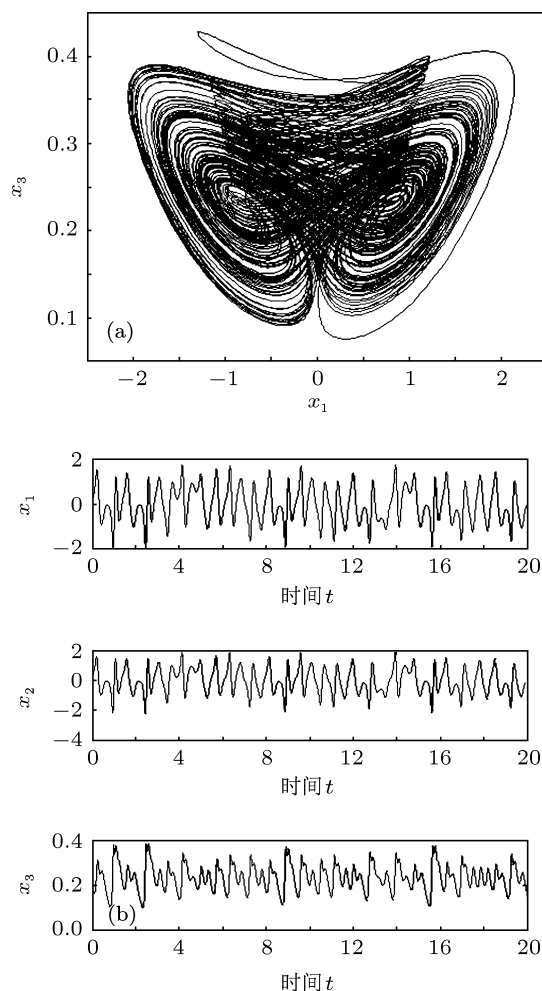


图10 $d = 100$ 时系统 (1) 相图与波形图 (a) x_1 - x_3 平面相图; (b) 波形图

3.4 调幅度特性分析

在高频通信技术中, 通常要用到振幅调制和调幅度两个重要概念. 振幅调制是指使载波振幅随调制信号瞬时值变化, 从而实现频谱迁移的过程. 调幅度 (或调幅系数, 记为 m) 是调制信号与载波信号幅度的比值, 用来衡量调幅程度. 在普通调幅中, 调幅度一般满足 $m \leq 1$, $m > 1$ 时, 会造成调制信号的失真^[19]. 在不失真条件下, 高的调幅系数可提高信噪比和功率利用率. 本文中, 我们采用乘法运算来实现振幅调制, 调制模型如图 11 所示. 设信息信号为 $m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$, 其中 t 为时间, A_m 为信号幅度, ω_m 为信号频率, 调制信号为 $A_0 + A_m \cos(\omega_m t)$, 载波信号为 $s(t) = x_i$, x_i 为系统 (1) 某一状态输出, 此时已调信号为 $[A_0 + A_m \cos(\omega_m t)]x_i$.

我们分别取调制信号为 $2.5 + 2\cos(5t)$ 和 $2.5 + \cos(5t)$, 载波信号 $s(t) = x_1$, 系统 (1) 在不同参数时的调幅度如图 12 所示. 由图 12 可知, 调幅系数随参数 d 和 e 的变化 (增加) 而变化 (增加), 且信息信号幅值取较大值时, 调幅系数也较大, 从而信噪比和功率利用率都较高. 此结论对混沌保密通信的研究具有重要指导意义.

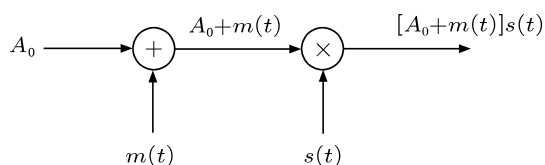
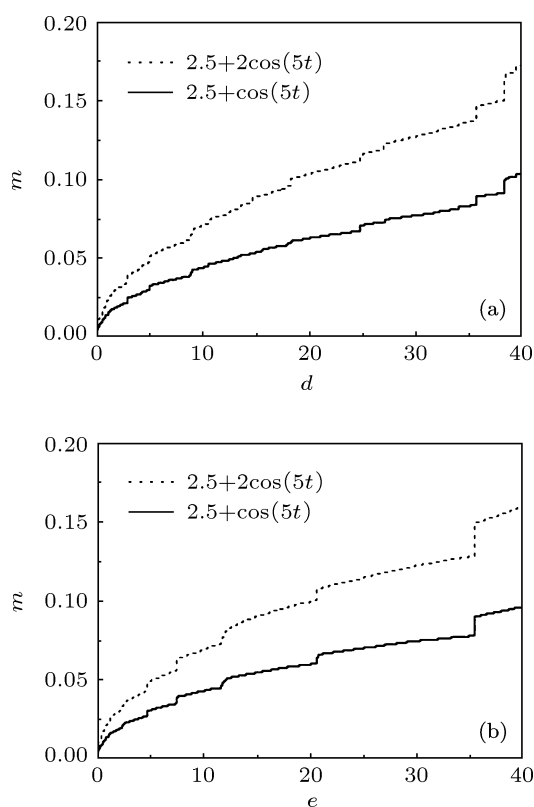


图 11 乘法器调幅模型

图 12 系统 (1) 中调幅度随不同参数的变化 (a) 参数 d ; (b) 参数 e

4 混沌系统的电路实验

采用线性电阻、线性电容、TL082 型运算放大器、AD633 型模拟乘法器设计出一个模拟电子电路, 如图 13 所示.

根据系统的电路图及电路理论, 并考虑到 AD633 的放大倍数为 0.1, 可得系统电路方程为

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{1}{R_2 C_0} x_2 - \frac{1}{R_1 C_0} x_1, \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{R_4 C_0} x_1 + \frac{1}{R_3 C_0} x_2 - \frac{1}{10 R_5 C_0} x_1 x_3, \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{R_6 C_0} x_3 + \frac{1}{10 R_7 C_0} x_2^2,\end{aligned}\quad (7)$$

其中 $R_1 - R_7$ 为电阻, C_0 为电容. 取系统参数 $a = 38, b = 3, c = 30, d = 1, e = 1$, 并取 $C_0 = 10 \text{ nF}$, 可得电路中各电阻精确值为 $R_1 = R_2 = 26.316 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 33.333 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 125 \text{ k}\Omega$, $R_5 = R_7 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_6 = 333.333 \text{ k}\Omega$. 图 14 为从示波器上观察到的结果, 可以看出电路实验结果与数值仿真结果完全相符.

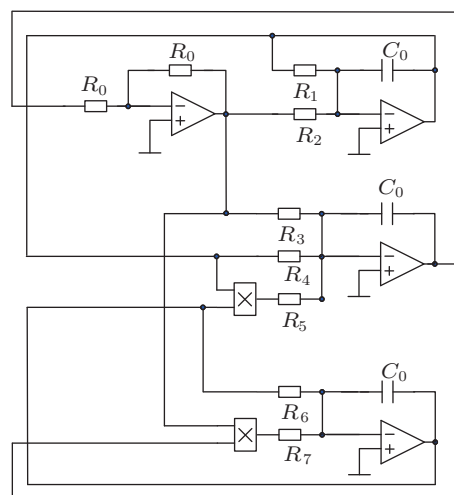
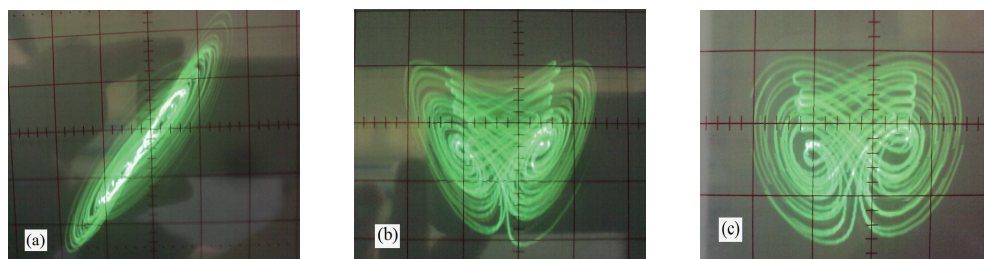


图 13 电路原理图

图 14 混沌系统 (1) 的电路实验结果 (a) x_1-x_2 平面; (b) x_1-x_3 平面; (c) x_2-x_3 平面

5 结 论

本文基于 Chen 系统和 Liu 系统的构建模式, 对 Lorenz 系统进行改造, 构建了一个新的三维自治混沌系统. 讨论了系统的基本动力学特征, 包括平衡点的性质、功率谱图、Poincare 截面图, 并利用分岔图和 Lyapunov 指数谱详细分析了不同参数变化对系统动力学行为的影响. 研究发现, 交叉乘积项参数 d 和平方项参数 e 变化时, 系统的 Lyapunov 指数谱保持恒定, 即具有双参数恒 Lyapunov 指数谱特性, 且参数 d 具有全局非线性调幅功能, 输出

信号 x_1, x_2, x_3 的幅值与 d 呈一定的幂函数关系变化; 平方项系数 e 具有局部非线性调幅功能, 输出信号 x_1, x_2 的幅值与 e 呈一定的幂函数关系变化, 而输出信号 x_3 的幅值与 e 的变化无关, 其幅值保持在恒定的数值区间. 根据乘法器调幅模型, 采用乘法运算实现混沌信号 (状态变量) 对余弦周期信号的振幅调制, 发现调幅系数随参数 d 和 e 的变化 (增加) 而变化 (增加), 且信息信号幅值取较大值时, 调幅系数也较大, 从而信噪比和功率利用率都较高, 此结论对混沌保密通信的研究具有重要指导意义.

-
- [1] Lorenz E N 1963 *J. Atmospheric Sci.* **20** 130
 - [2] Chen G R, Ueta T 1999 *Int. J. Bifur. Chaos* **9** 1465
 - [3] Lü J H, Chen G 2002 *Int. J. Bifur. Chaos* **12** 659
 - [4] Lü J H, Chen G, Cheng D 2004 *Int. J. Bifur. Chaos* **14** 1507
 - [5] Liu W B, Chen G R 2003 *Int. J. Bifur. Chaos* **13** 261
 - [6] Liu C X, Liu T, Liu L, Liu K 2004 *Chaos Soliton. Fract.* **22** 1031
 - [7] Qi G Y, Chen G R, Du S Z, Chen Z Q, Yuan Z Z 2005 *Physica A* **352** 295
 - [8] Hu G S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8139 (in Chinese) [胡国四 2009 物理学报 **58** 8139]
 - [9] Dong E Z, Chen Z P, Chen Z Q, Yuan Z Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2680
 - [10] Wang H X, Cai G L, Miao S, Tian L X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030509
 - [11] Si G Q, Cao H, Zhang Y B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 010509
 - [12] Jia H Y, Chen Z Q, Yuan Z Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 020507
 - [13] Luo X H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3304
 - [14] Liu M H, Feng J C, Tse C K 2010 *Int. J. Bifur. Chaos* **20** 1201
 - [15] Li C B, Chen S, Zhu H Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2255 (in Chinese) [李春彪, 陈谟, 朱焕强 2009 物理学报 **58** 2255]
 - [16] Li C B, Wang H K, Chen S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 783 (in Chinese) [李春彪, 王翰康, 陈谟 2010 物理学报 **59** 783]
 - [17] Zhao P D, Zhang X D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2791 (in Chinese) [赵品栋, 张晓丹 2008 物理学报 **57** 2791]
 - [18] Liu Z H 2006 *Fundamentals and Applications of Chaotic Dynamics* (Beijing: High Education Press) p18 (in Chinese) [刘宗华 2006 混沌动力学基础及其应用 (北京: 高等教育出版社) 第 18 页]
 - [19] Zhang X W 2009 *High Frequency Electronics Circuit* (Beijing: High Education Press) p480 (in Chinese) [张肃文 2009 高频电子线路 (北京: 高等教育出版社) 第 480 页]

A new chaotic system and its implementation*

Li Chun-Lai^{1)3)†} Yu Si-Min¹⁾ Luo Xiao-Shu¹⁾²⁾

1) (College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

2) (College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

3) (College of Physics and Electronics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

(Received 11 October 2011; revised manuscript received 24 October 2011)

Abstract

Based on the construction patterns of Chen and Liu chaotic systems, a new chaotic system is proposed by developing the Lorenz chaotic system. The essential features of chaotic system are analyzed via equilibrium, stability, continuous spectrum, and Poincare mapping. The different dynamic behaviors of the system are analyzed especially when each system parameter changes. It is found that when parameters d and e vary, the Lyapunov exponent spectrum keeps invariable, and there exist the functions of global nonlinear amplitude adjuster for d and partial nonlinear amplitude adjuster for e . Finally, a practical circuit is designed to implement this new chaotic system, which confirms that the chaotic system can be achieved physically.

Keywords: chaotic system, invariable Lyapunov exponent spectrum, nonlinear amplitude adjuster, circuit implementation

PACS: 05.45.-a

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61172023, 60871025, 10862001), the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. S2011010001018, 8151009001000060), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20114420110003).

† E-mail: lichunlai33@126.com