

类Liu系统在水声微弱信号检测中的应用研究

刘剑鸣 杨霞 高跃龙 刘福才

Application of similar Liu system in underwater weak signal detection

Liu Jian-Ming Yang Xia Gao Yue-Long Liu Fu-Cai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 070501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.070501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于非完整二维相空间分量置换的混沌检测方法

[A chaotic signal detection method based on the component permutation of the incomplete two-dimensional phasespace](#)

物理学报.2016, 65(7): 070502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070502>

一类Hopf分岔系统的通用鲁棒稳定控制器设计方法

[General robust stability controller design method for a class of hopf bifurcation systems](#)

物理学报.2016, 65(6): 060502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.060502>

基于压缩感知的动态散射成像

[Imaging through dynamic scattering media with compressed sensing](#)

物理学报.2016, 65(4): 040501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.040501>

一种基于相邻数据依赖性的混沌分析方法

[A chaotic analyzing method based on the dependence of neighbor sub-sequences in the data series](#)

物理学报.2016, 65(3): 030503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030503>

一种基于模糊C均值聚类小数据量计算最大Lyapunov指数的新方法

[A novel method based on the fuzzy C-means clustering to calculate the maximal Lyapunov exponent from small data](#)

物理学报.2016, 65(2): 020502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.020502>

类Liu系统在水声微弱信号检测中的应用研究

刘剑鸣[†] 杨霞 高跃龙 刘福才

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2015年11月14日收到; 2016年1月12日收到修改稿)

利用三阶混沌系统构造了一种新的微弱信号检测系统——类Liu系统, 对类Liu系统进行了深度的理论分析. 类Liu系统中, 当输入待测信号幅值大于某临界值时, 系统可达到平衡点 S_0 , S_0 中系统变量 x 平衡于摄动力信号, 系统变量 y, z 收敛于零态, 且 S_0 对应的Lyapunov指数小于零. 通过Matlab仿真、Multisim电路仿真以及实际电路证明了类Liu系统的周期态收敛性及广域检测性, 解决了传统Duffing系统进行微弱信号检测时周期态不收敛、只能进行窄域检测等问题, 同时谱级信噪比范围仍可达 -46.57 dB. 类Liu系统采用了全新的设计理念, 具有较高的实用价值, 对未来海洋物联网中的水声通信有一定参考价值.

关键词: 类Liu系统, Duffing系统, 混沌电路, 微弱信号检测

PACS: 05.45.-a, 05.45.Gg, 05.45.Ac, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.65.070501

1 引言

水声通信是当今的一个研究热点^[1], 其关键技术是强噪声背景下的微弱水声信号检测. 相比于自相关法、取样积分法、傅里叶变换法、小波变换法等微弱信号检测方法, 混沌凭借其对于微弱信号的敏感性以及对噪声的强免疫性在微弱信号检测领域更具潜力, 混沌系统信噪比理论上可以达到 -100 dB甚至更低.

至今微弱信号检测领域的主导仍旧是非自治的Duffing系统的共振原理. Birx和Pipenberg于1992年首次利用混沌振子对微弱信号进行检测试验, 采用复映射前向反馈神经网络法进行了弱信号检测, 信噪比达 -12 dB^[2], 自此, 大量学者陆续展开对Duffing系统微弱信号检测性能的研究, 并且致力于提高Duffing系统的检测能力. 文献^[3]对Duffing系统进行了微弱正弦信号检测的数值研究, 描述了Duffing振子的分岔规律; 文献^[4]仿真实验证实Duffing系统可检测低至 1 nV的正弦信号, 信噪比可达 -90 dB, 并提出将自相关器与Duffing系统相结合的方法进行弱信号检测, 从而进一步降低

信噪比门限; 文献^[5]针对弱信号幅值与相位的检测, 提出反向补偿幅值检测法、三分对称相位检测法和基于Duffing振子幅值的最大似然参量估计方法, 进一步完善了Duffing系统的弱信号检测能力, 提高了检测可行性; 文献^[6]对Duffing振子进行了修正, 得到了性能更稳定、抗噪性更强的新模型; 文献^[7]提出联合卡尔曼增益递推方程判别Duffing状态; 文献^[8]研究了基于Duffing振子的逆向相变的信号检测方法, 该方法计算量小, 且具有较好的实时性; 文献^[9]对Duffing方程进行改进, 使其能够检测高频信号, 并设计电路进行了分析. 大量学者对Duffing系统的阈值多变、动态响应不确定、噪声免疫力不确定^[10]等局限性进行了研究, 均取得了相应成果. 但经过多年完善的Duffing系统在微弱信号检测方面仍有以下两点局限性: 1) Duffing系统周期态不收敛, Duffing由临界混沌状态变为大周期状态的实时转化现象并不明显, 且实际电路中也不能有效地进行相应的电平转换, 从而无法达到精准信号检测以及通信的目的; 2) Duffing系统只可进行窄域检测, 当同频强信号进入系统后, 系统便折回混沌状态, 给微弱信号检测带来不便. 以

[†] 通信作者. E-mail: jm_liu06@126.com

上问题都严重影响了微弱信号检测的精度以及准确度. 因此研究非 Duffing 混沌系统对微弱信号的敏感度是一项极其重要的课题.

针对非 Duffing 系统的弱信号检测方面的研究很少. Choe 等 [11] 利用参数的非共振激励原理对 Lorenz 系统实现了混沌抑制, 使得某一参量收敛于零态, 达到了微弱信号检测的目的; 文献 [12] 运用相同的方法实现了对 Chen 系统的混沌抑制. 上述两项研究均是对于参数抑制, 即将高频周期激励信号加入参数中, 使得参数处于受控状态, 从而进行微弱信号检测, 但由于计算过程近似程度较大, 使得受控稳定性较差, 且两个研究均未论述其电路实现状态. 事实上, 该方法应用电路过于复杂, 极大地影响了实际检测的精确度. 文献 [13] 提出利用 Rössler 方程与比例微分结合控制的方法实现微弱信号的检测, 该方法可增强系统混沌进入周期态的稳定性, 但仍未解决收敛性与窄域性等问题; 文献 [14] 构造了类 Lorenz 系统, 利用两个控制项将系统的混沌状态控制到周期态, 但其本质仍为对系统参数的控制, 且两个控制项要求的匹配度高, 周期现象不明显, 实际电路难以实现. 并且, 上述几类对非 Duffing 系统的微弱信号检测研究均未解决 Duffing 系统中周期态不收敛和窄域检测等问题.

针对以上各问题, 本文设计了一种新的微弱信号检测系统——类 Liu 系统. 类 Liu 系统主要利用了混沌系统的非反馈控制方法, 即选择一个合适正确的外部摄动来达到混沌抑制的目的. 类 Liu 系统检测完全利用系统本身的特性, 不依赖于外界匹配度. 其检测到微弱信号时状态变量 y, z 可收敛于零, 且在所需有效检测范围内混沌到大周期状态的阈值点惟一, 即可进行广域检测. 本文对类 Liu 系统进行了 Matlab 及电路仿真, 最后制作了实际电路, 证实了系统的合理性与可行性. 类 Liu 系统可经文献 [9] 中扩展后适用于高频系统.

2 传统 Duffing 系统微弱信号检测特性

传统 Duffing-Homes 系统方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -ky + x - x^3 + r \cos(\omega t), \end{cases} \quad (1)$$

其中, k 是阻尼系数, $r \cos(\omega t)$ 为周期策动力.

2.1 窄域检测

当 $k = 5$ 时, 系统 Lyapunov 指数图如图 1 所示. 由图 1 可知: Duffing 系统临界值选取为 0.8 左右, 当检测到 6 V 左右以下同频信号时, 系统可进入大周期态; 而检测到 6—14 V 的同频强信号时, 系统则重新进入混沌态. 说明系统只能进行窄域检测, 这在微弱信号检测应用中是一个弊端.

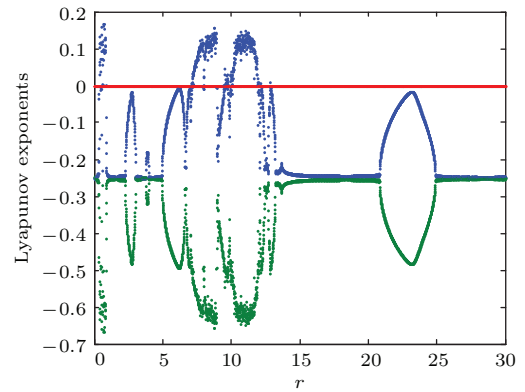


图 1 (网刊彩色) Duffing 系统 Lyapunov 指数图
Fig. 1. (color online) Lyapunov index of Duffing system.

2.2 周期态不收敛

设置 Duffing 系统到临界值状态, 策动力 r_a 为 0.826595 V. 2 s 时, 加入同频的待测信号 r_x 为 0.000001 V, 系统变量 x 的时序图如图 2 所示.

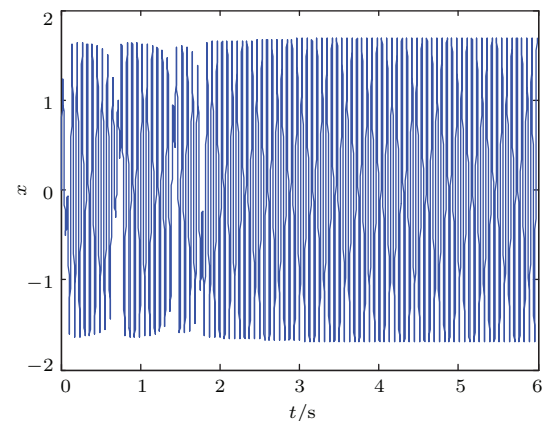


图 2 Duffing 系统加入弱信号的 x 时序图
Fig. 2. Time sequence of x in weak signal in Duffing system.

由图 2 可知, 加入待测微弱信号之前系统处于临界混沌状态, 加入待测微弱信号之后系统处于大周期态, 系统状态转化前后幅值均处于同级范围, 实际工程应用检测中只能通过肉眼、依据经验观测,

而无法通过测量得出是否检测到待测信号的结论. 这也限制了 Duffing 系统在微弱信号检测中的应用.

3 类 Liu 系统的动力学特性

2006 年, Liu 提出了一种自治混沌系统^[15], 基于该混沌系统, 结合混沌系统的非反馈控制方法, 本文将周期信号作为摄动提出了一种新的混沌微

弱信号检测系统——类 Liu 系统.

类 Liu 系统结构为

$$\begin{cases} \dot{x} = a(z - x + r_a \cos(\omega t) + r_x \cos(\omega t) \\ \quad + S_n(t)) - yz, \\ \dot{y} = by + xz, \\ \dot{z} = -4xy - cz. \end{cases} \quad (2)$$

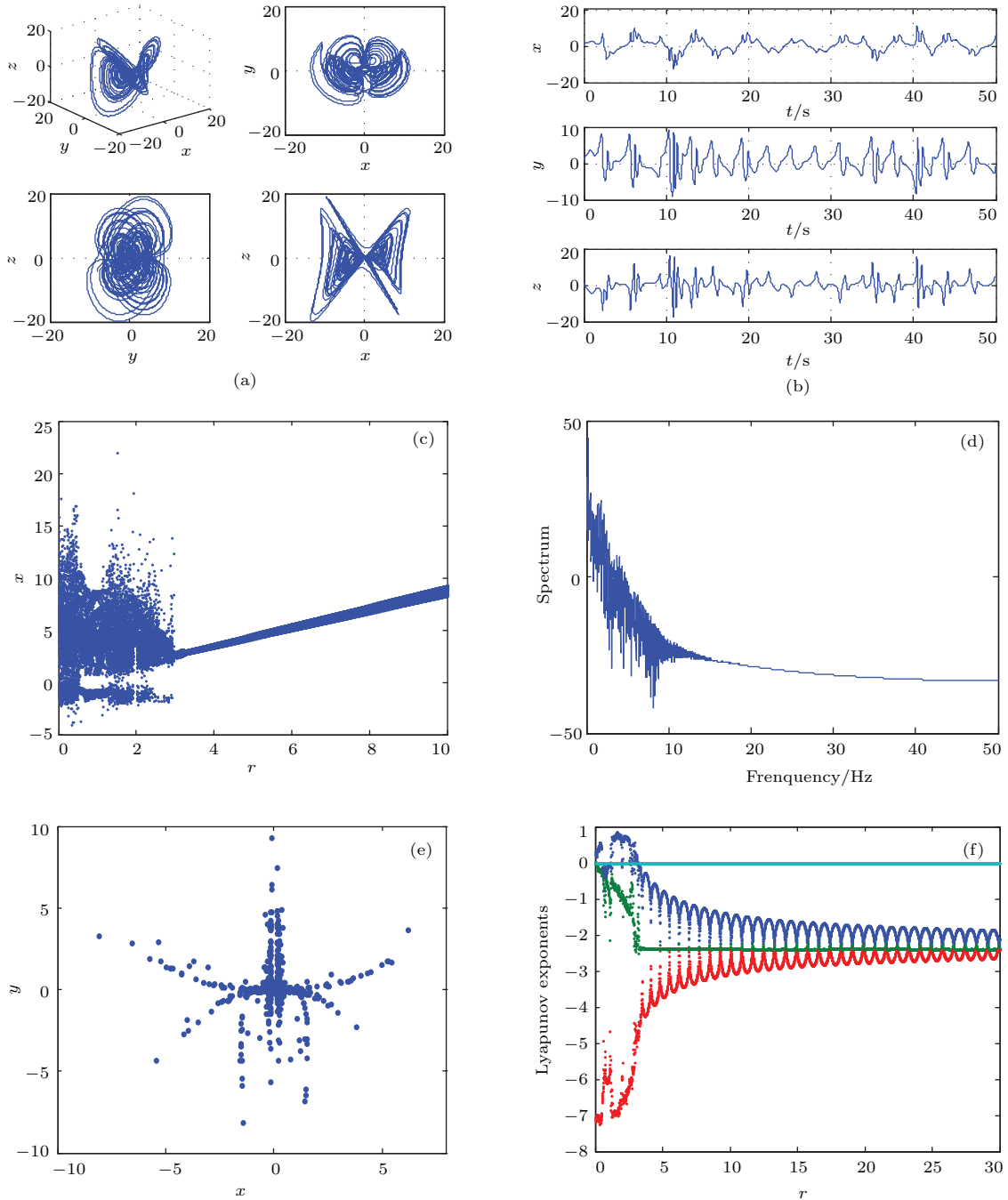


图3 (网刊彩色)类 Liu 系统的混沌特性 (a) 相图; (b) 时序图; (c) 分岔图; (d) 功率谱图; (e) 庞加莱映射图; (f) Lyapunov 指数图

Fig. 3. (color online) Chaotic characteristics of simila Liu system: (a) Phase trajectory; (b) time series diagram; (c) bifurcation diagram; (d) power spectrum; (e) Poincaré map; (f) Lyapunov index.

为了证明检测系统的可信度, 类Liu系统中取 $a = 2.4, b = 2.5, c = 7, r = 1.8$. 由类Liu系统的相图(图3(a))、时序图(图3(b))、分岔图(图3(c))、功率谱图(图3(d))、庞加莱图(图3(e))、Lyapunov指数图(图3(f))可看出, 系统的时序图无序, 功率谱连续, 庞加莱映射图中有成片的、分形的密集离散点, Lyapunov指数大于零, 可说明类Liu系统是混沌系统.

由图3(c)和图3(f)可知, 类Liu系统的分岔图和Lyapunov指数图是相符合的. 系统在 $r \in [0, 0.5)$ 时为混沌状态, $r \in [0.5, 1.2)$ 时为大周期态, $r \in [1.2, 3]$ 时基本全部为混沌态, Lyapunov指数中 r 为2左右的周期态范围极小, 经过大量仿真验证, 在2.0001—2.0002左右, $r \in (3, 30]$ 为大周期, 此后一直为大周期. 此性质表明类Liu系统的微弱信号检测为广域检测.

3.1 耗散性及吸引子存在性

对(2)式求导, 得

$$\begin{aligned} \nabla V &= \partial \dot{x}/x + \partial \dot{y}/y + \partial \dot{z}/z \\ &= -a + b - c. \end{aligned} \quad (3)$$

当 $a - b + c > 0$, (2)式是耗散的, 且类Liu系统以指数形式收敛于:

$$\frac{dV}{dt} = e^{-(a-b+c)}. \quad (4)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, (2)式中参数变化轨迹的每个个体元以指数率 $-(a - b + c)$ 收缩到零, 所有系统轨迹线最终会被限制在一个体积为零的集合上, 系统的渐近运动将固定在一个吸引子上.

3.2 平衡点特征分析

为了叙述方便, 定义输入信号为 X , 且为了分析系统的普适性, 本文以 X 为整体对系统进行分析. 则类Liu系统方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = a(z - x + X) - yz, \\ \dot{y} = by + xz, \\ \dot{z} = -4xy - cz. \end{cases} \quad (5)$$

令方程右边等于零, 即

$$\begin{cases} a(z - x + X) - yz = 0, \\ by + xz = 0, \\ -4xy - cz = 0. \end{cases} \quad (6)$$

令 $a = 2.4, b = 2.5, c = 7$ 解得系统的平衡点之一为 $S_0 = (X, 0, 0)$, 由于其与摄动量有关, 因此称之为广义平衡点. 可以发现, 系统输出 y 和 z 可以归为零, 可为微弱信号检测的现象观测提供有利点.

系统在平衡点 $S_0 = (X, 0, 0)$ 的 Jacobian 矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} -a & 0 & a \\ 0 & b & X \\ 0 & -4X & -c \end{bmatrix}, \quad (7)$$

系统的特征矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} -a - \lambda & 0 & a \\ 0 & b - \lambda & X \\ 0 & -4X & -c - \lambda \end{bmatrix}. \quad (8)$$

令 $|J - \lambda I| = 0$, 可得

$$(a + \lambda)(\lambda^2 - (b - c)\lambda - bc + 4X^2) = 0. \quad (9)$$

特征方程有3个解为 $\lambda_1 = -a, \lambda_{2,3} = \frac{1}{2} \left[b - c \pm \sqrt{(b - c)^2 - (16X^2 - 4bc)} \right]$, 根据 Routh-Hurwitz 稳定性判据, 当 $a > 0, b < c, X^2 > bc/4$ 时, 系统稳定于平衡点 $S_0 = (X, 0, 0)$.

令 $X = r \cos(\omega t)$, 则当 $a > 0, b < c, r^2 \cos^2(\omega t) > bc/4$, 即 $a > 0, b < c, r^2(1 + \cos(2\omega t)) > bc/2$ 时, 系统稳定于平衡点 $S_0 = (r \cos(\omega t), 0, 0)$. 非线性系统中, 根据平均法定义, 系统可分为由系统频率决定的慢变系统以及由高频信号决定的快变系统, 系统整体趋势则是由慢变系统主导, 而实际检测系统中输入信号频率较高, ω 值较大, 基本为输入的快变系统扰动, 它仅驱使系统局部振荡, 因此在普适系统计算中, 可将快变量的系统取平均值做近似计算, 近似系统整体中快变扰动 $\cos(2\omega t)$ 为0. 则可以近似得出 $a > 0, b < c, r > \sqrt{bc/2}$ 时, 系统稳定于平衡点 S_0 .

本系统中 $b = 2.5, c = 7$, 因此当 $r > 2.95804$ 时, 系统稳定于平衡点 S_0 .

3.3 Lyapunov 指数特征分析

Lyapunov 指数可以表征系统运动的特征, 它沿某一方向取值的正负和大小, 表示长时间系统在吸引子中相邻轨道沿该方向平均发散或收敛的快慢程度.

当系统的Lyapunov指数为正时,系统在相空间中相邻轨道间平均指数率发散,系统处于混沌状态.将初始条件取为一个无穷小的三维椭圆球.设此椭圆球第*i*个坐标方向半轴长为 $\|\sigma x_i(x_0, t)\|$,系统第*i*个Lyapunov指数为

$$\sigma_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\delta x_i(x_0, t)\|}{\|\delta x(x_0, 0)\|} \quad (i = 1, 2, 3). \quad (10)$$

计算Lyapunov指数时,需将系统转化为自治方程,令 $q = wt$,由于频率*w*的数值对于混沌状态影响可忽略,因此令 $w = 1$,便于计算.则有

$$\begin{cases} \dot{x} = a(z - x + r \cos q) - yz, \\ \dot{y} = by + xz, \\ \dot{z} = -4xy - cz, \\ \dot{q} = 1. \end{cases} \quad (11)$$

系统Jacobian矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} -a & -z & a - y & -ar \sin q \\ z & b & x & 0 \\ -4y & -4x & -c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

令 $x(0) = x_0, y(0) = y_0, z(0) = z_0, q(0) = 0$,则有 $\dot{X}(t) = J(t)X(t), X(0) = I_4$,其中, $X(t)$ 是 $\dot{x}(t)$ 的基础解空间,对其进行QR分解^[16]:

$$X(t) = Q(t)R(t), \quad \dot{X} = \dot{Q}R + Q\dot{R} = AQR. \quad (13)$$

(13)式左乘 Q^T 右乘 R^{-1} 得

$$Q^T\dot{Q} - Q^T A Q = -\dot{R}R^{-1}. \quad (14)$$

$\dot{R}R^{-1}$ 为上三角矩阵,由于 $Q^T Q = I$,因此 $Q^T\dot{Q}$ 为斜对称矩阵,可得到

$$Q^T\dot{Q} = H(t, Q), \quad (15)$$

其中

$$H_{ij} = \begin{cases} (Q^T A Q)_{ij}, & i < j, \\ 0, & i = j, \\ -(Q^T A Q)_{ji}, & i > j. \end{cases} \quad (16)$$

由于 $Q^T Q = I$,因此

$$\dot{Q}(t) = Q(t)H(t, Q(t)), \quad (17)$$

$$\dot{R} = (Q^T A Q - Q^T\dot{Q})R, \quad (18)$$

$$(\text{diag})\dot{R} = (\text{diag})(Q^T A Q)(\text{diag})R, \quad (19)$$

即

$$\dot{R}_{ii} = (Q^T A Q)_{ii}R_{ii}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (20)$$

$$l_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln R_{ii}(t). \quad (21)$$

对 $\ln(R_{ii}(t))$ 求导,

$$\dot{\ln}(R_{ii}(t)) = \frac{\dot{R}_{ii}(t)}{R_{ii}(t)}, \quad (22)$$

对两边同时积分,得

$$\ln(R_{ii}(t)) = \int_0^t (Q^T(t)J(t)Q(t))_{ii} dt, \quad (23)$$

进而得到

$$l_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t (Q^T(t)J(t)Q(t))_{ii} dt, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (24)$$

基于Jacobian矩阵解算方法解得:当系统处于平衡点 $S_0 = (r \cos(wt), 0, 0)$ 时,最大Lyapunov指数为 $l_{\max} = -\varepsilon(r) |\cos(r/\sigma)|$,其中 σ 是一正数,且

$$\varepsilon(r) = \begin{cases} M(r), & 0 < r < N, \\ m, & r > N. \end{cases} \quad (25)$$

$M(r)$ 为一个不规则递减函数, m 基本为某一正值, N 为一正实数.由于将自治系统变为非自治系统,因此系统总有一个Lyapunov指数恒为零.因此,当 $r > \sqrt{bc}/2$ 时,系统近似稳定与平衡点,且最大Lyapunov指数值总小于零.

4 类Liu系统的仿真分析

4.1 周期态收敛性

由以上理论分析可知,系统最终平衡点为

$$S_0 = (r_a \cos(wt) + r_x \cos(wt) + S_n(t), 0, 0).$$

以下仿真中,取系统参数为 $a = 2.4, b = 2.5, c = 7$,为了与实际工程系统符合,取初始状态 $x(0) = y(0) = z(0) = 0$,使用四阶Runge-Kutta法进行求解,设定仿真步长为 10^{-5} .

1) 设置驱动状态为临界状态,即设置*r*为3.0554325,2—3 s时加入幅值为0.000001的待测信号,则系统状态相应时序图如图4所示.由图4可知,加入待测信号后系统状态变量*x*值瞬时收敛到一正弦周期信号,即上述推算出的输入策动力正弦信号,*y*值和*z*值瞬时收敛于零.相比于Duffing系

统, 类Liu 系统变化到大周期的现象比Duffing 系统更为明显, 对工程中微弱信号的检测极为有利.

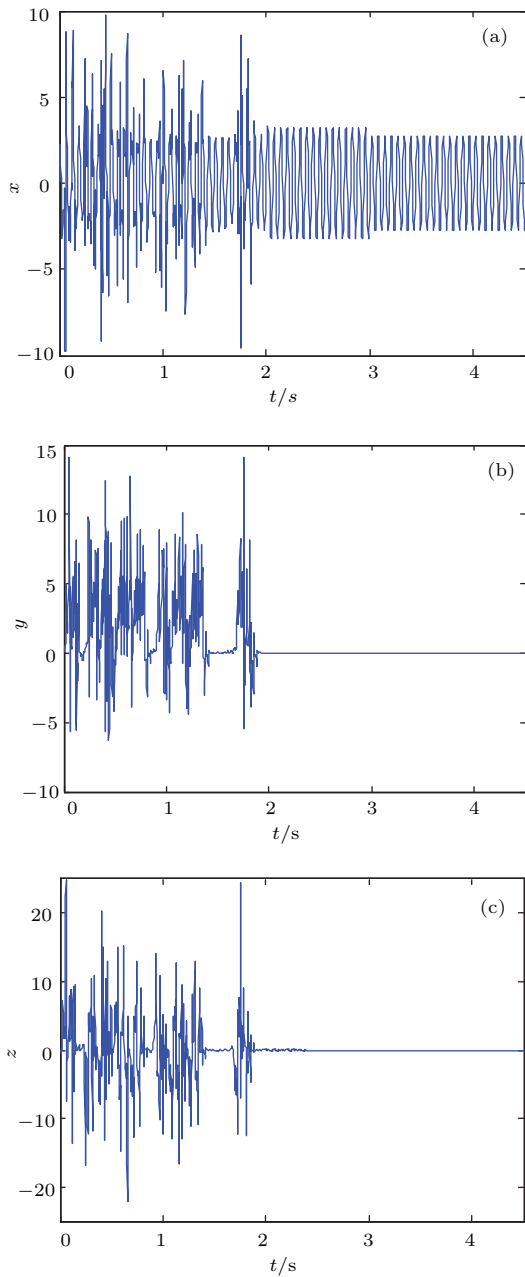


图4 加入待测信号后系统各变量的时序图 (a) x 时序图; (b) y 时序图; (c) z 时序图
Fig. 4. Time series of the system variables after adding the unknown signal: (a) Time sequence diagram of x ; (b) time sequence diagram of y ; (c) time sequence diagram of z .

2) 在仿真1) 的基础上加入噪声功率为0.00001 的高斯白噪声, 仿真结果如图5 所示.

由图5 可知, 加入的高斯白噪声并不影响Liu 复合系统的弱信号检测, 系统 y 变量依旧收敛于零. 因此, 类Liu 系统对噪声有较好的免疫力. 考虑到系统中待测信号为窄带信号与宽带噪声, 为了真实

体现系统的噪声免疫能力, 采用谱级信噪比计算方式. 此时, 系统谱级信噪比 SNR 为 -46.57 dB.

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum(abs(x(f))^2)}{\sum(abs(n(f))^2)} = -46.57 \text{ dB}.$$

3) 若实际应用环境中噪声较小, 检测到的信号幅值与策动力幅值相差较大时, 根据 x 状态变量最终稳定到的状态来求出驱动信号幅值与待测信号幅值. 即可以依据图形检测平衡状态的峰值点差值, 求出输入的待测信号的幅值, 这样的方法不再需要调节临界值点则可以计算出待测信号幅值. 同时, 可根据状态变量 y 和 z 是否稳定到零点, 验证是否检测到微弱信号.

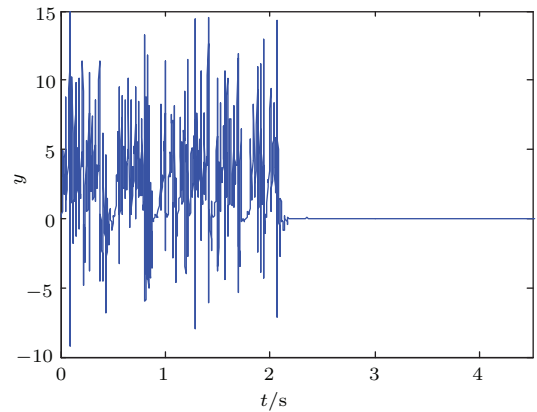


图5 加入高斯白噪声后系统 y 的时序图
Fig. 5. Time sequence diagram of y after joining Gauss white noise.

4.2 广域检测性

由类Liu 系统的Lyapunov 指数图(图3(f)) 可得知: 类Liu 系统在微弱信号检测系统中是广域可测的.

将类Liu 系统设置到临界状态, 此时, r 为 3.056956, 加入幅值分别为 0.001 V(图6(a)) 和 7 V 的同频待测信号(图6(b)), 类Liu 系统中的状态变量 y 的时序图均如图6(c) 所示. 说明类Liu 系统可进行广域检测.

4.3 不同包络微弱信号检测

设置系统到临界状态, 在 4—5 s 时加入同频的、信号幅值为高斯分布(图7(a))、指数分布(图7(b))、瑞利分布(图7(c)) 的待测信号, 系统 y 的时序图如图8 所示. 说明类Liu 系统可检测幅值随机变化的同频正弦信号, 加大了系统的微弱信号检测范围.

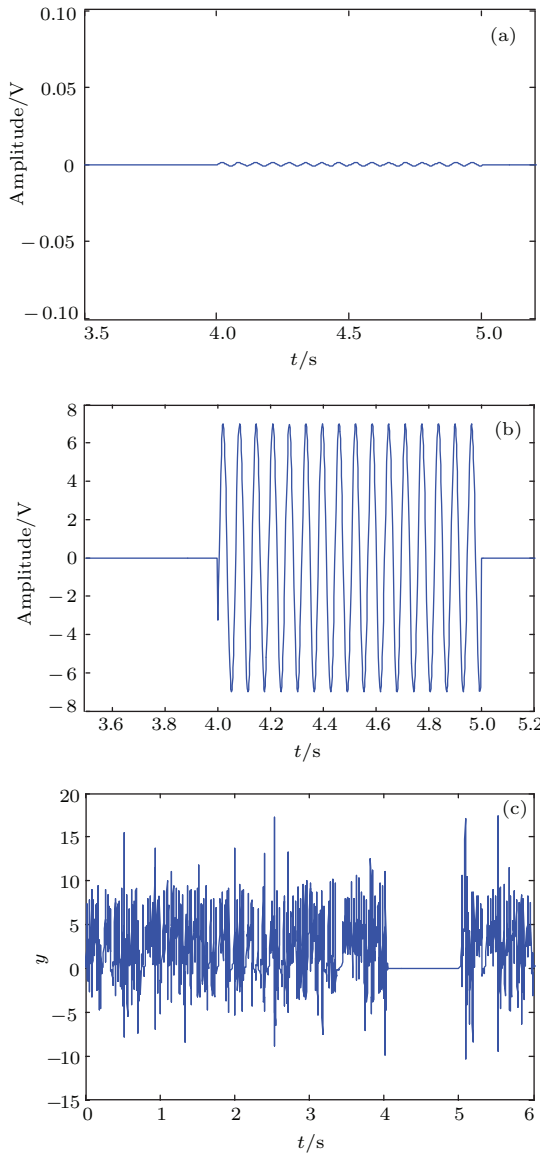


图6 (a) 幅值为0.001 V的弱正弦信号; (b) 幅值为7 V的强正弦信号; (c) 加入强弱信号后 y 的响应时序图
 Fig. 6. (a) Sinusoidal signal with the amplitude of 0.001 V; (b) sinusoidal signal with the amplitude of 7 V; (c) time sequence diagram of the y after adding the signal.

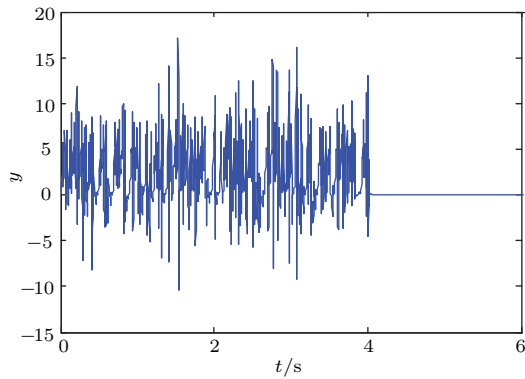


图8 类Liu系统 y 的时序响应图
 Fig. 8. Time sequence response of the y of the Liu composite system.

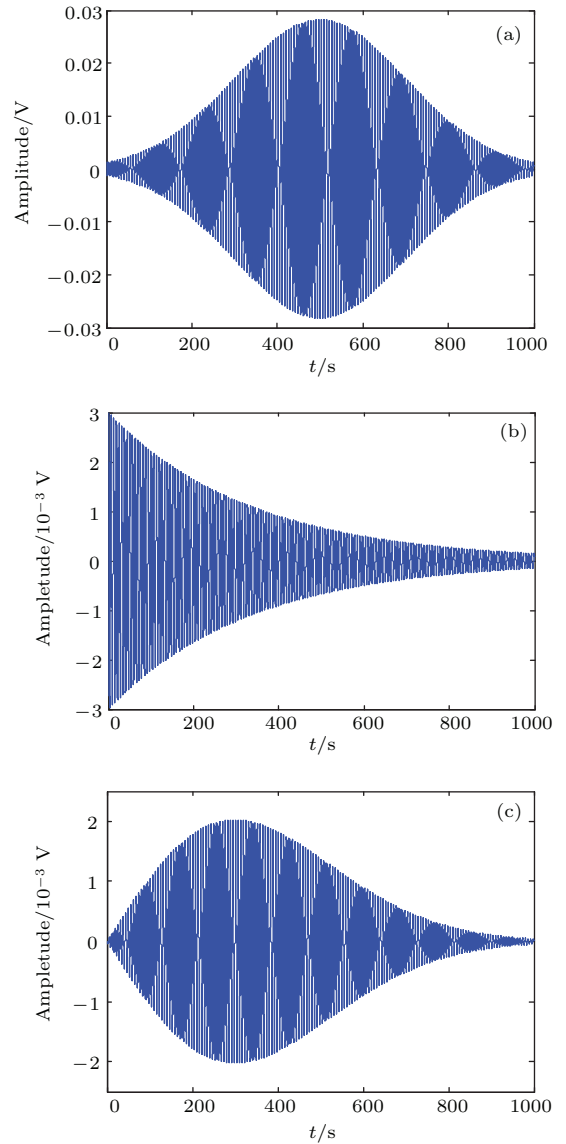


图7 不同包络的信号 (a) 高斯分布包络图; (b) 指数分布包络图; (c) 瑞利分布包络图
 Fig. 7. Signals with different envelope: (a) Gauss distribution; (b) exponential distribution; (c) Rayleigh distribution.

5 类Liu系统的电路设计

5.1 电路设计

类Liu系统的Multisim电路仿真图如图9所示. 为了更接近真实电路效果, 整个电路全部使用真实电路器件搭建, 运算放大器选择偏置电流为2—100 pA, 输入失调电压为2—9 mV的ADTL084, 乘法器选择精确度较高的AD734, 电容选择漏电小的薄膜电容. 全部芯片均为 ± 15 V供电, 为搭建实际电路提供便利. 仿真中使用单刀开关模拟待测信号的加入.

根据电路原理以及器件特性, 可得到电路的数学方程如 (26) 式所示:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \left(\frac{R_3}{R_2 R_5 C_1} z - \frac{R_3 R_7}{R_6 R_4 R_5 C_1} x \right. \\ \quad \left. + \frac{R_3}{R_{26} R_5 C_1} r \cos(\omega t) \right) \\ \quad - \frac{R_3}{R_1 R_5 C_1} yz, \\ \frac{dy}{dt} = \frac{R_9}{R_{10} R_{11} C_2} y + \frac{R_9}{R_8 R_{11} C_2} xz, \\ \frac{dz}{dt} = -\frac{R_{14}}{R_{12} R_{15} C_3} xy - \frac{R_{17} R_{14}}{R_{16} R_{13} R_{15} C_3} z. \end{cases} \quad (26)$$

对比原系统, 即可得到各阻容值: $R_{17} = 7 \text{ k}\Omega$, $R_{26} = R_{27} = 100 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 24 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 2.4 \text{ k}\Omega$, $R_{14} = 40 \text{ k}\Omega$, $R_{17} = 7 \text{ k}\Omega$, $R_3 = R_{10} = 4 \text{ k}\Omega$, $R_{12} = R_8 = 1 \text{ k}\Omega$; $C_1 = C_2 = C_3 = 1 \text{ }\mu\text{F}$; $R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R_9 = R_{11} = R_{21} = R_{18} = R_{19} = R_{20} = R_{15} = R_{16} = R_{22} = 100 \text{ k}\Omega$; $R_{23} = R_{24} = R_{25} = 1 \text{ M}\Omega$. 其中, R_{23} , R_{24} , R_{25} 是零漂电阻.

状态调整: 1) 为了使输入级正常工作, 限制输入电压; 2) 加入偏置直流电阻, 使运放输入级放大器工作在线性区; 3) 加入直流平衡电阻以及零漂电阻, 防止运放饱和以及电路输出发散.

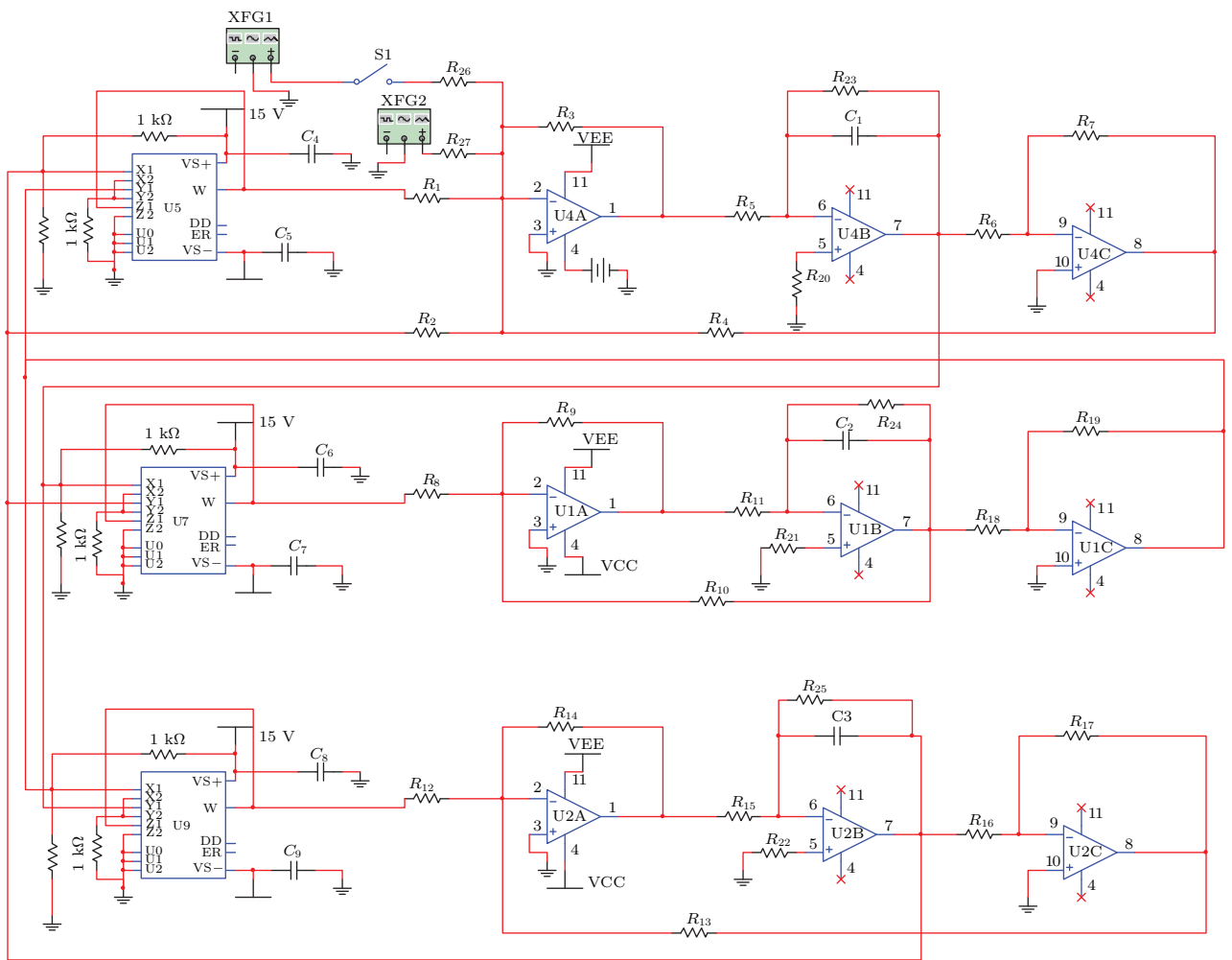


图9 类Liu系统电路设计

Fig. 9. Circuit design of similar Liu system.

5.2 实际电路搭建及实验结果

实际电路板调试如图 10 所示.

1) 首先调节系统处于临界混沌状态, 实际实验

受函数发生器的精度限制, 且考虑实际检测应留有一定裕度, 实验中最终调节策动力幅值为 3.016 V, 此时系统如图 11 (a) 所示, 为典型的混沌态.

2) 加入 0.001 V 同频待测信号, 此待测信号由

分压电路模拟, 结果如图 11 (b) 所示. 系统输入待测正弦信号后迅速进入大周期, y 和 z 值基本收敛于零, 但不完全为零, 归因于理论分析中求平衡点时有近似过程, 且实际电路中受各电路元器件影响所致. 证明类 Liu 系统的周期态收敛性.

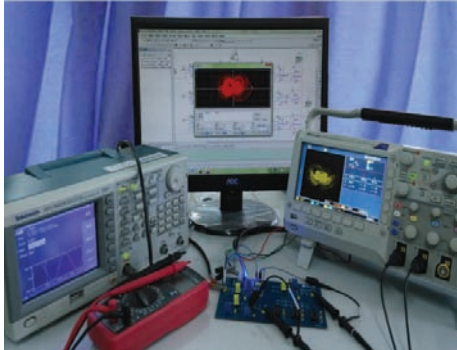


图 10 类 Liu 系统电路板调试

Fig. 10. Circuit board debugging of similar Liu system.

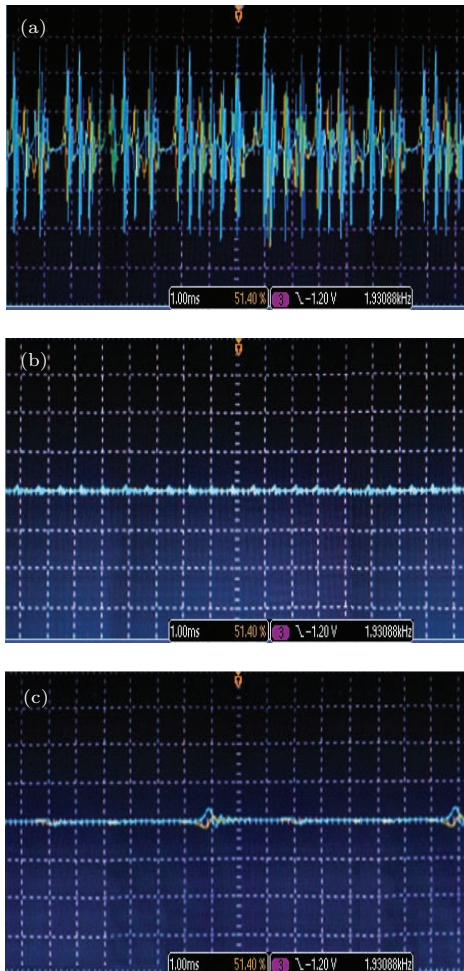


图 11 (网刊彩色) 实际电路截图 (a) 混沌状态 y 和 z 波形; (b) 加入弱信号后 y 与 z 波形; (c) 加入强信号后 y 与 z 波形
Fig. 11. (color online) Screenshots of actual circuit: (a) Wave of y and z in chaotic state; (b) wave of y and z after adding weak signal; (c) wave of y and z after adding big signal.

3) 加入 7 V 同频待测信号, 结果如图 11 (c) 所示. 系统输入待测正弦信号后迅速进入大周期, y 和 z 值仍基本收敛于零. 证明类 Liu 系统的广域检测性.

实际电路调试结果证明类 Liu 系统可作为一种新的水声微弱信号检测系统.

表 1 微弱信号检测系统性能对比

Table 1. Performance comparison of weak signal detection system.

	锁相放大器	Duffing 系统	类 Liu 系统
所用电子元器件	极多	少	较少
检测阈值	-	多个	惟一
检测频率精确度	99%	95%	95%
检测现象是否明显	一般	一般	明显 (y, z 收敛到零)
谱级信噪比	-23.38 dB	-50.26 dB	-46.57 dB
价格	昂贵	适中	适中
计算复杂度	高	低	低
是否适合通信	较不适合	适合	适合

6 结 论

本文利用三阶混沌系统构造了一种新的微弱信号检测系统, 并对系统进行了深度的理论分析. 系统输入信号幅值大于某临界值之后会达到一个平衡点 S_0 , 此平衡状态中 x 变量平衡于输入策动力正弦信号, y, z 变量收敛于零, 且平衡点对应的 Lyapunov 指数小于零. 由分析可得, 类 Liu 系统由混沌临界状态进入大周期状态的阈值点惟一, 且大周期状态 y, z 变量收敛于零. 类 Liu 系统检测完全利用系统本身特性, 不依赖于外界匹配度, 上述各性质使得该系统的微弱信号检测性能大幅提升.

类 Liu 系统克服了 Duffing 系统在微弱信号检测中遇到的周期态无收敛性、只能进行窄域检测等两个问题, 且谱级信噪比范围可达 -46.57 dB. 通过仿真及实际电路调试可知, 类 Liu 系统非常适合于水声微弱信号检测, 且实际电路相对文献 [12, 14] 中非共振参数法复杂度低. 类 Liu 系统在实际工程应用中可对混沌态与周期态加以开关器件进行电平转换, 抛弃人类的主观因素, 检测精度可达到更高水平.

锁相放大器、Duffing 系统和类 Liu 系统的微弱信号检测性能对比列于表 1. 通过对比证明了类

Liu 系统在微弱信号检测领域的优越性, 有着较高的工程应用价值, 在未来海洋物联网中水声微弱信号检测领域可发挥重要作用.

参考文献

- [1] Chitre M, Shahabudeen S, Stojanovic M 2008 *Marine Technol. Sci. J.* **42** 103
- [2] Birx D L, Pipenberg S J 1992 *Int. Joint Conf. Neural Networks* **2** 881
- [3] Wang G Y, Chen D J, Lin J Y, Chen X 1999 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **46** 440
- [4] Nie C Y, Shi Y W, Liu Z Z 2002 *Trans. China Electrotech. Soc.* **17** 87 (in Chinese) [聂春燕, 石要武, 刘振泽 2002 电工技术学报 **17** 87]
- [5] Shang Q F, Qiao H Z, Yin C Q 2005 *Chin. J. Sci. Instrum.* **26** 1271 (in Chinese) [尚秋峰, 乔宏志, 尹成群 2005 仪器仪表学报 **26** 1271]
- [6] Li Y, Yang B J, Yuan Y, Liu X H 2007 *Chin. Phys. B* **16** 1072
- [7] Rui G S, Zhang Y, Miao J, Zhang S, Shi T 2012 *Acta Electron. Sin.* **40** 1269 (in Chinese) [芮国胜, 张洋, 苗俊, 张嵩, 史特 2012 电子学报 **40** 1269]
- [8] Liu H B, Wu D W, Jin W, Wang Y Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 050501 (in Chinese) [刘海波, 吴德伟, 金伟, 王永庆 2013 物理学报 **62** 050501]
- [9] Hu W J, Liu Z Z, Li Z H 2011 *Electric Machines and Control* **15** 80 (in Chinese) [胡文静, 刘志珍, 厉志辉 2011 电机与控制学报 **15** 80]
- [10] Zeng Z Z, Zhou Y, Hu K 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 070505 (in Chinese) [曾喆昭, 周勇, 胡凯 2015 物理学报 **64** 070505]
- [11] Choe C U, Hohne K, Benner H, Kivshar Y S 2005 *Phys. Rev. E* **72** 036206
- [12] Wang M J, Zeng Y C, Xie C Q, Zhu G F, Tang S H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 180502 (in Chinese) [王梦蛟, 曾以成, 谢常清, 朱高峰, 唐淑红 2012 物理学报 **61** 180502]
- [13] Xu Y C, Yang C L, Qu X D 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030516
- [14] Zhou F, Shen M N 2014 *Machinery* **41** 5 (in Chinese) [周芳, 沈媚娜 2014 机械 **41** 5]
- [15] Liu C X 2006 *Far East J. Dyn. Sys.* **8** 51
- [16] Mcdonald E J, Higham D J 2001 *Electron. Trans. Numer. Anal.* **12** 234

Application of similar Liu system in underwater weak signal detection

Liu Jian-Ming[†] Yang Xia Gao Yue-Long Liu Fu-Cai

(*Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

(Received 14 November 2015; revised manuscript received 12 January 2016)

Abstract

Weak signal detection is a vital technology in underwater acoustic communication with strong noise background. In this area, non-autonomous Duffing system is still widely used, and a lot of researches focus on enhancing the ability to detect weak signal and to find out the detection limitation of the Duffing system. Moreover, great achievements have already made. But problems still exist such as non-convergence of the periodic state of the Duffing system and its narrow detection domain. Unfortunately, researches on weak signal detection by using other systems are still rare. In order to solve the above problems, a new three-dimensional similar Liu chaotic system for weak signal detection is proposed. A thorough theoretical analysis for the similar Liu chaotic system is given, and its equilibrium point and the Lyapunov index are deduced and analyzed in detail. The major conclusion is that the variable x of the new system becomes a deformation signal when the input signal amplitude is greater than a certain critical value, the variables y and z converge to zero, and the Lyapunov exponents are less than zero at the same time. This means that no matter how strong the input signal is, the detection can be achieved by using a similar Liu chaotic system as long as its amplitude exceeds the threshold value. The periodic convergence and wide area detection of the similar Liu chaotic system are proved by the Matlab simulation, the Multisim circuit simulation, and the actual circuit test. This new system solves the two problems of the period convergence and narrow detection domain for the traditional Duffing system. The periodic state and chaotic state are easy to distinguish when detected. The periodic state can be maintained when the signal amplitude changes from short distance to long distance in a new system. The spectral signal-to-noise ratio range increases up to -46.57 dB in the similar Liu chaotic system. The characteristics of the new system are only effected by its structure and parameters. The system does not rely on the external factors, and it can be extended. By using some switching devices, the conversion between the chaotic state and periodic state can be realized in the practical engineering applications with a higher detection accuracy. The new design concept of the similar Liu chaotic system shows a very high practical value. It will lay a certain foundation for the underwater acoustic communication of the ocean internet of things in the future.

Keywords: similar Liu system, Duffing system, chaotic circuit, weak signal detection

PACS: 05.45.-a, 05.45.Gg, 05.45.Ac, 02.60.Cb

DOI: [10.7498/aps.65.070501](https://doi.org/10.7498/aps.65.070501)

[†] Corresponding author. E-mail: jm_liu06@126.com