

新 SH-COS 混沌弱信号检测系统设计^①

宋菲菲^② 魏自明 习敬伟

(燕山大学电气工程学院自动化系 秦皇岛 066004)

摘 要 将混沌理论应用于弱信号检测,设计了一种由三维混沌和余弦函数合成的全新的混沌弱信号检测系统——SH-COS 系统,并对其进行了动力学特性的理论分析,用 Matlab 及 Multisim 进行了电路仿真分析。与目前广泛探讨的 Duffing 混沌弱信号检测系统以及锁相放大器的性能相比,新设计的混沌弱信号检测系统抗噪性能强、检测精度高,而且具有信号检测的广域多样性,弥补了检测系统混沌与大周期状态难以区分、大周期状态不稳定等不足。新系统输出的大周期态具有收敛性,仿真对比结果验证了设计方法的正确性,进一步改善了混沌系统的弱信号检测性能,使定量检测成为可能,因而更适合应用于实际工程领域。

关键词 弱信号检测, Duffing 系统, 高阶混沌系统, 混沌电路, Matlab 仿真

0 引言

相比于传统的自相关法、傅立叶变换法、小波变换法等微弱信号检测方法,混沌弱信号检测(利用混沌理论进行弱信号检测)方法越来越得到人们的重视,对其研究也随之更加深入^[1]。自 1963 年 Lorenz 发现三维自治混沌系统后,越来越多的混沌系统被发现,比如 Chen、Lv、Liu、Qi 等混沌系统^[2]。1992 年, Bix 和 Pipenberg 首次利用混沌振子对微弱信号进行检测,混沌振子由于对微弱周期信号有敏感性而且有良好的抗噪性能,因而在弱信号检测领域占有举足轻重的位置,而且利用混沌振子对未知信号参量进行估计,从精度和信号识别能力上看,都比以往基于统计学理论所提出的频谱方法、高阶统计量等要好^[3,4]。

目前广泛研究的混沌弱信号检测系统为 Duffing 系统。很多学者对 Duffing 系统进行了研究并且取得了显著的研究成果。聂春燕等^[5]提出将混沌弱信号检测方法与自相关算法相结合,但其在滤去

噪声的同时有用信号也随之受到损失;尚秋峰等^[6]提出了基于 Duffing 振子和 ML 的微弱信号幅值估计新方法,但实现步骤较复杂且实时性差;王冠宇等^[7]提出 Duffing 振子微弱信号检测的统计特性研究方法,但仅对其做大量理论分析缺乏实验验证。还有一些学者对 Duffing 系统的阈值特性、动态响应、抗干扰性能等进行了研究^[8],但迄今为止 Duffing 系统还存在一些问题仍未解决,如系统在被测信号消失后无法自动恢复混沌态,混沌与大周期状态难以区分,以及大周期状态不稳定等,因而限制了其在弱信号检测领域的应用。为了改进 Duffing 混沌弱信号检测系统的这些不足,本文设计了一种新的用于弱信号检测的混沌系统,即新的 SH-COS 混沌系统,并通过理论分析、Matlab 及 Multisim 电路仿真证明了其良好的弱信号检测特性^[9]。

1 Duffing 弱信号检测系统存在的问题

Duffing 系统是目前混沌弱信号检测研究领域

① 863 计划(AA806XXX)资助项目。
② 女,1992 年生,硕士生;研究方向:混沌通讯,计算机控制;联系人,E-mail: wjyljy2011@126.com
(收稿日期:2016-08-13)

中使用最广泛的系统,其动力学方程为

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

其中 k 为阻尼比, $r \cos(wt)$ 为周期策动力, r 为周期策动幅值, w 为角频率。

混沌弱信号检测系统在实际工程使用时应具备如下性能:

- (1) 系统输出对被测周期信号幅值变化敏感;
- (2) 系统中包含用于测量周期信号的余弦函数;
- (3) 具有较强的抗干扰能力;
- (4) 比传统弱信号检测电路使用的元器件数量少;
- (5) 被测信号消失后,系统快速回到混沌状态;
- (6) 系统输出进入大周期状态后,随着被测信号幅值增大,周期状态维持不变;
- (7) 系统输出的混沌与大周期状态易于区分。

经过分析发现, Duffing 混沌弱信号检测系统无法满足上述的第(5)、第(6)和第(7)项^[10-12]。

2 新 SH-COS 混沌弱信号检测系统

为了克服 Duffing 弱信号检测系统存在的不足,需要设计全新的混沌弱信号检测系统。首先通过 Melnikov 函数确定三维混沌系统产生混沌的条件,然后按照非线性的反馈控制方法,考虑到反馈的形式与作用,将余弦函数当做外部激励部分插入到三维混沌系统中,将外部激励部分作为桥梁,将三维混沌系统和余弦函数合成为一种新混沌系统,最后调节作为周期策动力的余弦函数和非线性恢复力的三维混沌系统参数,最终得到一种新的 SH-COS 混沌弱信号检测系统。在新设计的 SH-COS 混沌系统中,原三维混沌系统的性能起主导作用,新混沌系统的性能主要由其决定。引入的外部激励 COS 函数对系统特性变化影响较小并且是可控的。这样,通过适当调节原三维混沌系统和外加参数可以克服 Duffing 混沌弱信号检测系统的不足,进而得到一种新的满足微弱信号检测要求的新 SH-COS 混沌检测系统。

在王光义等^[13]的三维自治混沌系统基础上,本文设计出一种全新的三维非自治混沌弱信号检测系统(简称为 SH-COS)。该系统检测到微弱信号时,状态变量 y 和 z 的输出收敛于零,且在弱信号检测范围内系统输出由混沌状态变为大周期状态的阈值点具有惟一性,即可广域检测。新设计的 SH-COS 混沌弱信号检测系统的动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = -x + y + yz + r \cos(wt) \\ \dot{y} = y - xz \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (2)$$

2.1 耗散性和混沌吸引子分析

根据 $\Delta V = \frac{\partial \dot{x}}{x} + \frac{\partial \dot{y}}{y} + \frac{\partial \dot{z}}{z} = -1 + 1 - b$, 取 $b = 3.4 > 0$, 因此系统(2)是耗散的,且以如下的指数形式收敛:

$$\frac{dv}{dt} = e^{-b} \quad (3)$$

即体积元在 $t \rightarrow \infty$ 时刻收缩为零体积元。这就是说,当 $t \rightarrow \infty$ 时,包含系统轨迹的每个体积元以指数率 $-b$ 收缩到零。因此,所有系统轨迹线最终会被限制在一个体积为零的集合上,且它的渐进运动固定在一个吸引子上。

2.2 平衡点及稳定性分析

令方程(2)右边等于零,得到

$$\begin{cases} -x + y + yz + r \cos(wt) = 0 \\ y - xz = 0 \\ xy - 3.4z = 0 \end{cases} \quad (4)$$

解得系统的平衡点之一 $S_0 = (r \cos(wt), 0, 0)$, 系统在此平衡点处的雅可比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -r \cos(wt) \\ 0 & r \cos(wt) & -3.4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

系统的特征矩阵为

$$J - \lambda I = \begin{bmatrix} -1 - \lambda & 1 & 0 \\ 0 & 1 - \lambda & -r \cos(wt) \\ 0 & r \cos(wt) & -3.4 - \lambda \end{bmatrix} \quad (6)$$

令 $|J - \lambda I| = 0$, 得:

$$(\lambda^2 + 2.4\lambda - 3.4 + r^2 \cos^2(wt))(-1 + \lambda) = 0 \quad (7)$$

根据 Routh-Hurwitz 稳定性判据,系统在平衡点线性化后得到的雅可比矩阵的所有特征值都具有负实部,解得系统方程的三个解为

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -1, \lambda_{2,3} \\ &= \frac{-2.4 \pm \sqrt{2.4^2 - 4(r^2 \cos(wt)^2 - 3.4)}}{2} \end{aligned}$$

可以看到在该平衡点处有一个负实数根,两个实部为负的共轭复根,因此在 $S_0 = (r \cos(wt), 0, 0)$ 处新 SH-COS 系统是稳定的,且系统的输出项 y 和 z 最终收敛到零,为微弱信号检测的观测提供了有利条件。

2.3 混沌特性分析

取参数 $b = 3.4$,分别绘制新混沌系统的相图、时序图、功率谱图、庞加莱图、分岔图如图 1 至图 5 所示。可以看出新混沌系统功率谱连续、庞加莱图具有成片密集点,说明新 SH-COS 系统为混沌系统。

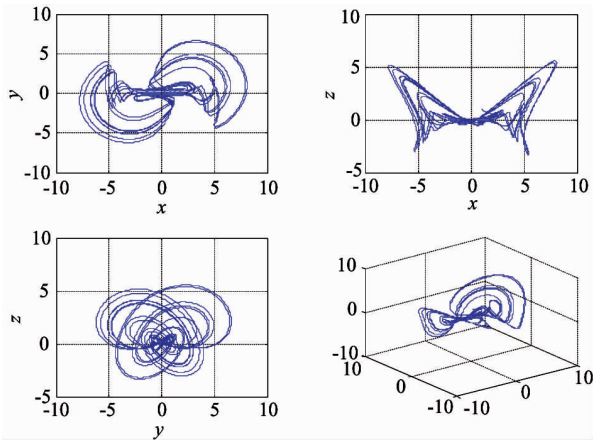


图 1 新 SH-COS 系统输出相图

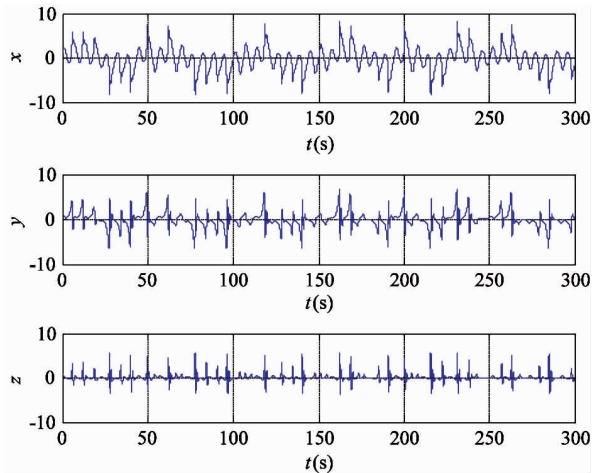


图 2 新 SH-COS 系统输出时序图

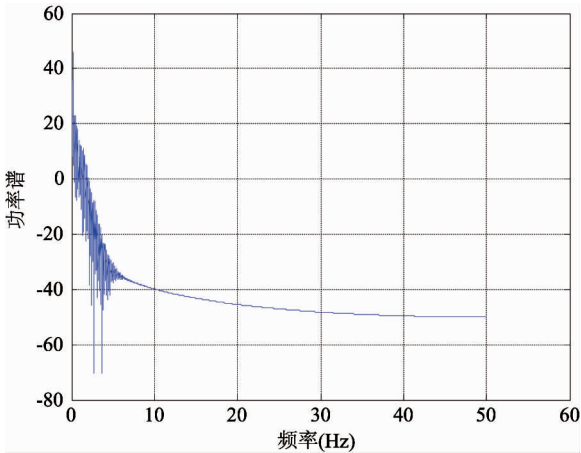


图 3 新 SH-COS 系统功率谱图

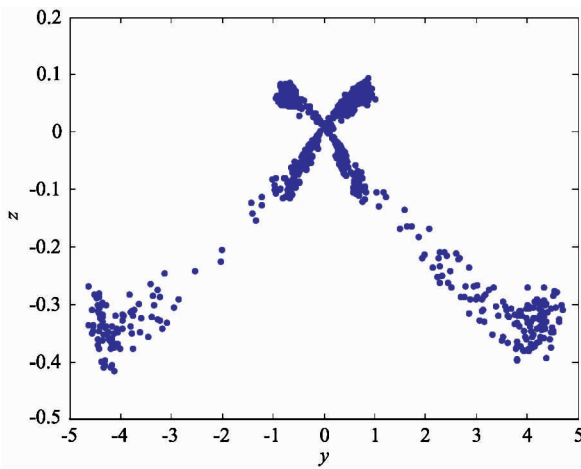


图 4 新 SH-COS 系统庞加莱截面

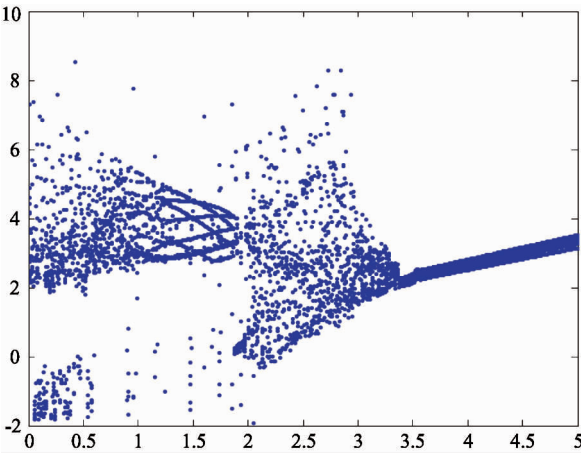


图 5 新 SH-COS 系统分岔图

由系统的分岔图可以看出,系统在 $r \in (0, 3)$ 左右为混沌状态,大于临界值后一直为大周期状态,因此可以利用混沌态到大周期态变化特点进行弱信

号检测。

2.4 电路仿真分析

采用 Multisim 12.0 软件对新混沌系统进行电路搭建及仿真分析^[14]。根据电路理论及元器件特性,新混沌系统电路方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\frac{R_3}{R_4 R_1 C_1} x + \frac{R_3}{R_5 R_1 C_1} y + \frac{R_3}{R_7 R_1 C_1} r \cos(wt) \\ &\quad + \frac{R_3}{R_6 R_1 C_1} yz \\ \dot{y} &= -\frac{R_{12}}{R_{14} R_9 C_2} y - \frac{R_{12}}{R_{13} R_9 C_2} xz \\ \dot{z} &= -\frac{R_{18}}{R_{19} R_{15} C_3} xy - \frac{R_{18}}{R_{19} R_{15} C_3} z \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $R_1 = R_9 = R_{15} = 50\text{k}\Omega$; $C_1 = C_2 = C_3 = 33\text{nF}$; $R_3 = R_{12} = R_{18} = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R_{13} = 100\text{k}\Omega$; $R_{14} = R_{19} = 100\text{k}\Omega$; $R_{20} = 29.4\text{k}\Omega$ 。

新混沌系统电路图如图 6 所示,电路仿真实验输出如图 7 所示。

可见,新设计的 SH-COS 系统确实为混沌系统。

3 与 Duffing 系统性能比较

3.1 时域性能对比

根据对混沌振子动力学分析可知,系统最终稳

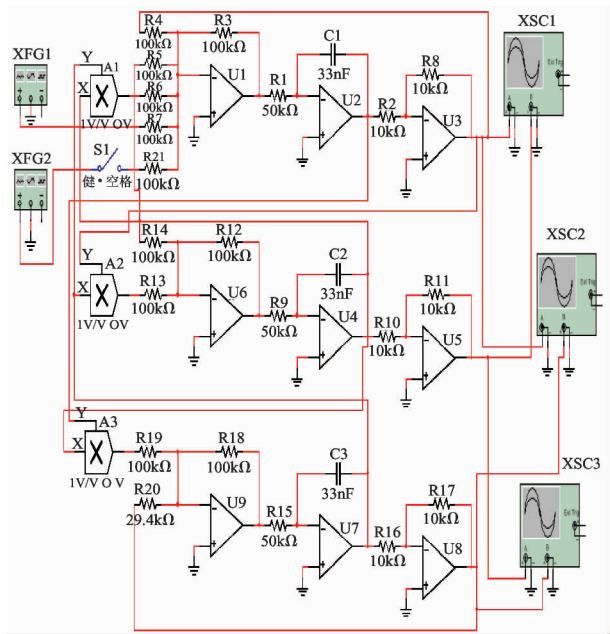
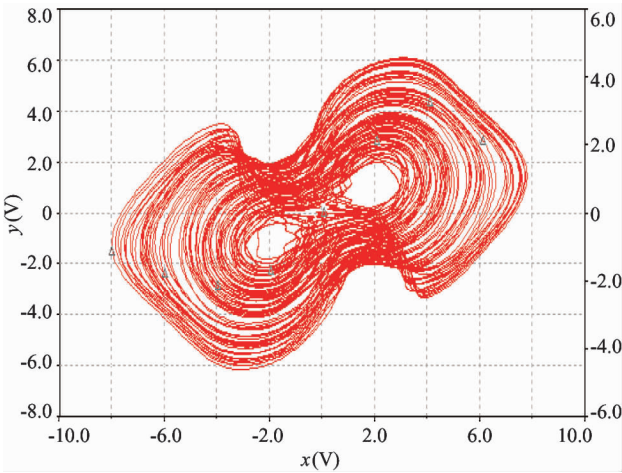
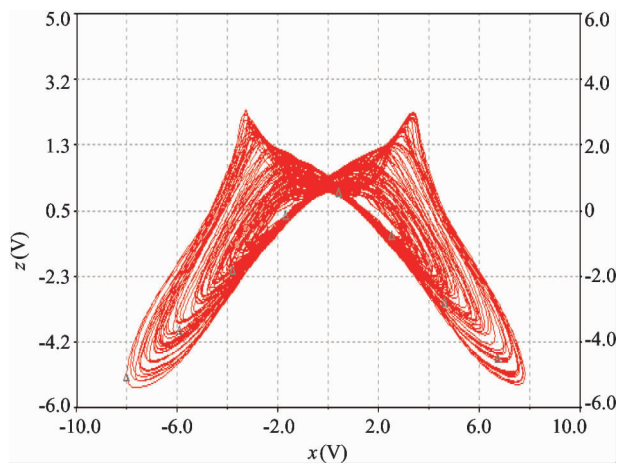


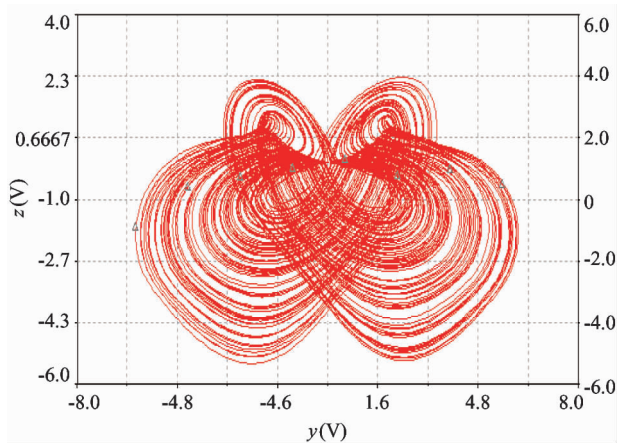
图 6 新 SH-COS 混沌系统电路图



(a) xy 相平面



(b) xz 相平面

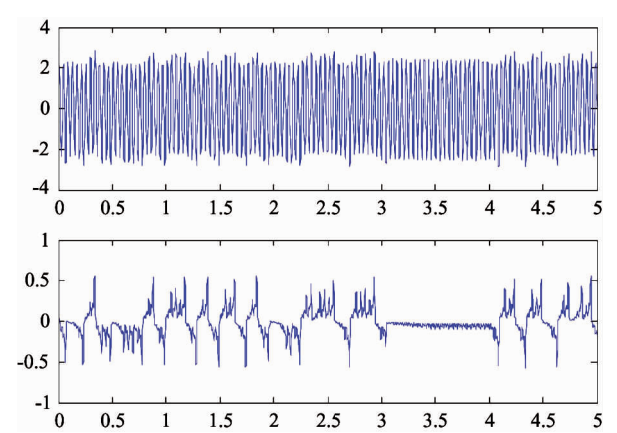


(c) yz 相平面

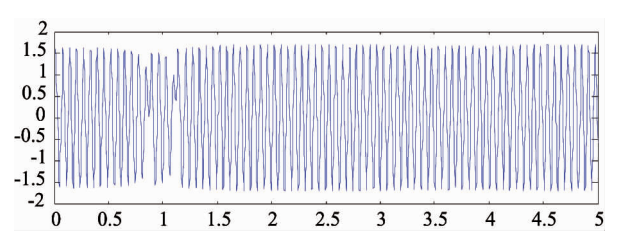
图 7 新 SH-COS 混沌系统电路仿真输出

定于平衡点处。利用四阶 Runge-Kutta 法,取参数 $b = 3.4$,初始状态为零,设置仿真步长为 0.005,将

混沌振子设置到临界状态,幅值为 $3.325, 3\text{s} \sim 4\text{s}$ 加入幅值为 0.001 的待测信号,系统时序如图 8(a) 所示。可知,新系统在临界状态加入待测信号后 x 立即变为正弦周期信号, y 则收敛于零。



(a) 新 SH-COS 系统 x, y 输出时序



(b) Duffing 系统 $x(y)$ 输出时序

图 8 时域性能对比图

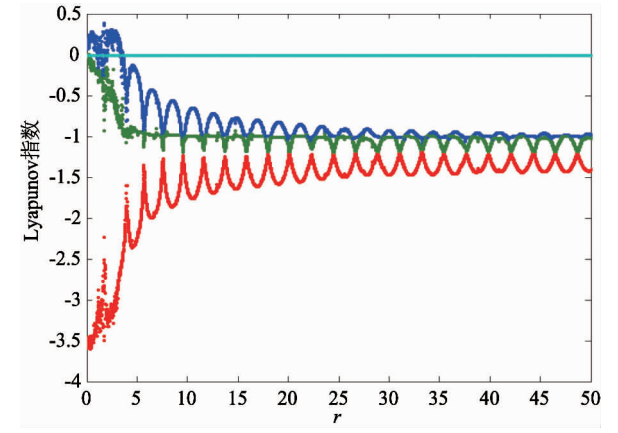
同样设置 Duffing 系统为临界状态,取策动力 $r = 0.8267$, 加入同频幅值为 0.001 的微弱检测信号的时序如图 8(b) 所示。通过仿真可见 Duffing 加入待测信号后的大周期状态与之前的混沌状态只能通过肉眼观测无法进行定量检测,对于弱信号检测具有一定的局限性。

由时域性能对比图可见, Duffing 系统输入测量信号后输出从混沌状态转变为大周期态,新混沌系统输入测量信号后,变量 y 从混沌状态转变为收敛到幅值接近为 0 ,新混沌系统的输出变化差别更明显,更容易通过电子电路实现判别,进而更加适合弱信号检测系统的定量检测。

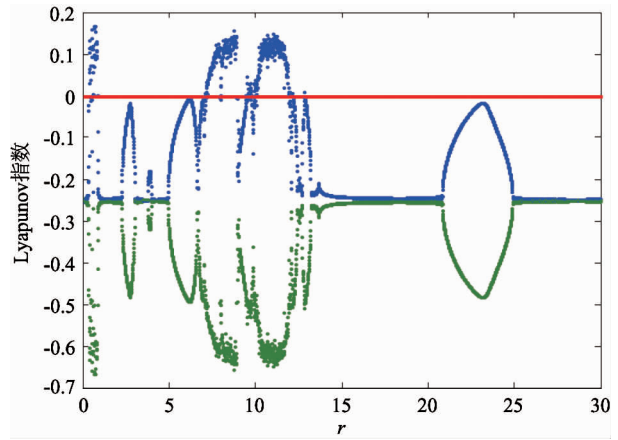
3.2 广域检测性能对比

新混沌系统的输入信号幅值 r 超过临界点后, Lyapunov 指数从正变为全负,如图 9(a),此时系统

输出由混沌状态变为大周期状态,且此后一直维持大周期不变,这就保证了新混沌系统对各种幅值的信号变化都能正常接收并检测,即可检测强、弱信号,因此说新混沌系统的检测具有广域性。



(a) 新 SH-COS 系统 Lyapunov 指数图



(b) Duffing 系统 Lyapunov 指数图

图 9 广域检测性能对比图

Duffing 系统随着待测信号幅值 r 增大输出由混沌变为大周期,然后又从大周期回到混沌,如图 9(b) 所示。这说明当 Duffing 系统接收到强弱待测信号时,系统输出有时是混沌状态有时是大周期状态,因此, Duffing 混沌系统不具有信号检测的广域性,在实际信号检测中具有一定的局限性。

经仿真实验验证,新混沌系统不仅可以检测幅值为固定常数的周期正弦信号,且对幅值为指数、高斯、瑞利分布的待测周期正弦信号同样适用,均具有收敛性和广域性。而且同样对脉冲、方波信号也有一定的检测能力,具有检测信号的多样性。

3.3 检测频率、相位精度对比

设新混沌系统策动力幅值为 3V、频率 $w = 100\text{rad/s}$, $3\text{s} \sim 4\text{s}$ 加入同频幅值为 1V 测量信号, 时序如图 10。

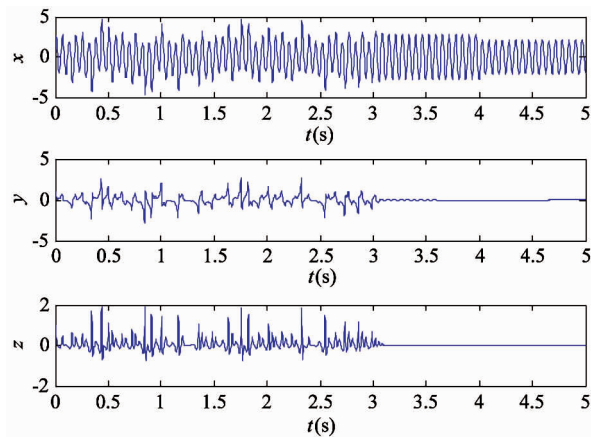


图 10 频率差为 0 时 SH-COS 系统时序图

保持其他参数不变, 增加待测信号频率值, 当频率差为 0.4rad/s 时, 可检测到信号的存在, 即新混沌系统具有收敛性; 当频率差为 0.5rad/s 时, 时序如图 11 所示, 此时无法检测信号存在。

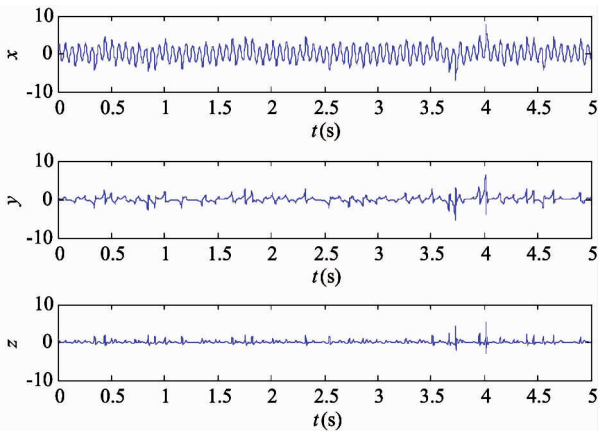


图 11 频率差为 0.5rad/s 时 SH-COS 系统时序图

因此可知, 新混沌系统的频率精度为 2.512Hz 。使用同样仿真方法得到新混沌系统相角精度为 1.3 度。

令 Duffing 系统策动力为 0.8V , $2\text{s} \sim 3\text{s}$ 时加入同频的幅值为 0.4V 的余弦信号, 经过仿真分析 Duffing 系统可检测到频率差约 96Hz 左右的信号, 相角

差约为 1.7 度左右的信号, 可见新混沌系统检测频率和相角精度都好于 Duffing 混沌系统, 能更精确地分辨待测信号是否加入, 具有一定的优越性。

3.4 谱级信噪比对比

抗白噪声干扰: 加入均值为 0, 方差为 0.01 的白噪声后新混沌系统 y 的时序输出如图 12 所示。

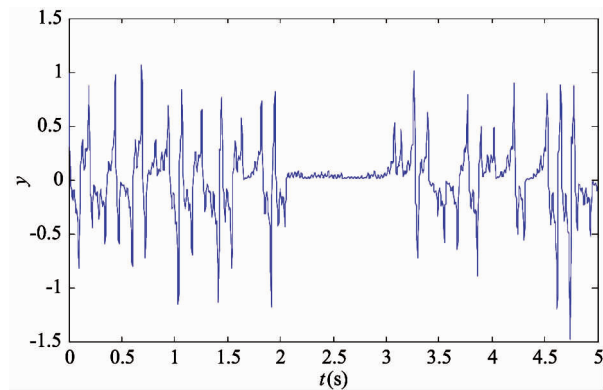


图 12 新 SH-COS 系统加入白噪声后 y 时序图

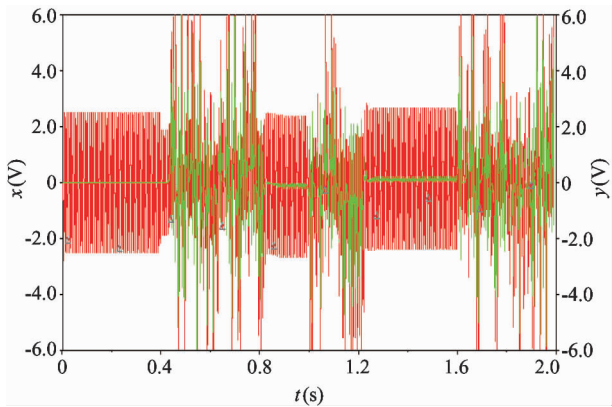
由图 12 可见, 新 SH-COS 系统仍然能检测出弱信号存在且 y 依旧收敛于零。说明新 SH-COS 系统具有抗噪声干扰能力。考虑到系统中待测信号为窄带信号与宽带噪声, 为了真实体现系统的噪声免疫能力, 采用谱级信噪比计算。加入高斯白噪声后系统谱级信噪比为

$$\begin{aligned} SNR &= 10 \log_{10} \left(\frac{\text{sum}(\text{abs}(\text{待测测信})^2)}{\text{sum}(\text{abs}(\text{噪声信号})^2)} \right) \\ &= -34.59\text{dB} \end{aligned} \quad (9)$$

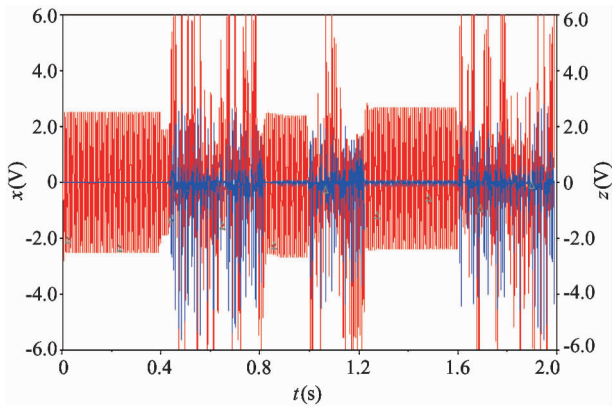
经过计算 Duffing 混沌系统的高斯白噪声谱级信噪比 SNR 为 -50.26dB 。锁相放大器谱级信噪比为 -23.38dB 。新混沌系统与 Duffing 系统高斯白噪声谱级信噪比性能相差不是很多, 和目前广泛使用的锁相放大器相比两者具有较好的抗噪声能力, 适合噪声条件下微弱信号的检测。

3.5 电路仿真对比

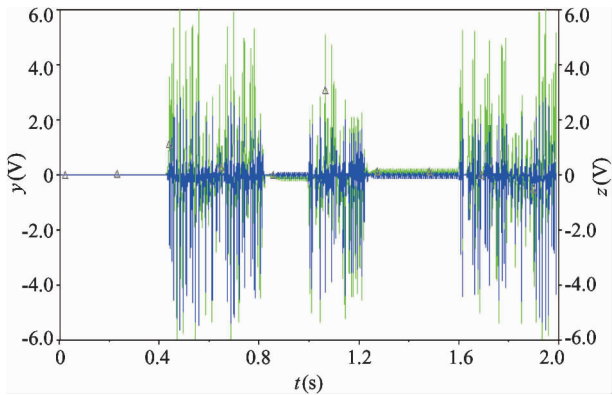
新系统加入待测信号后, 输出时序如图 13 所示。其中浅红色为 x 的轨迹, 深绿色为 y 的轨迹, 深蓝色为 z 的轨迹, 可见加入待测信号后混沌系统 x 变为周期信号, y, z 变为零, 具有收敛性, 而从以上研究我们得知 Duffing 系统加入待测信号后无明显变化, 再次证明新混沌系统良好的弱信号检测特性。



(a) x 、 y 时序



(b) x 、 z 时序



(c) y 、 z 时序

图 13 新 SH-COS 混沌系统电路仿真时序图

4 与锁相放大器性能比较

锁相放大器是当前广泛使用的常规弱信号检测方法。常规微弱信号检测方法信噪比较大、测量门限值较高、抗干扰能力弱同时设备昂贵^[15-17]。新 SH-COS 混沌系统使用全新设计思路,抗干扰能力

强、灵敏度高、元器件少。各混沌系统和锁相放大器性能比较见表 1。

表 1 各系统通信性能比较

	锁相放大器	Duffing 系统	新 SH-COS 系统
电子元件	多	少	少
信号加入后是否收敛	无	不收敛	收敛
信号消失后状态快速恢复	能	不能	能
频率精度	无	96Hz	2.512Hz
相角精度	无	1.7 度	1.3 度
高斯白噪声谱级信噪比	-23.38dB	-50.26dB	-34.59dB
测量门限电压	接近 10nV	接近 1nV	接近 1nV
体积和价格	体积大 价格贵	体积小 价格低	体积小 价格低
是否适合弱信号检测	适合	不太适合	适合

5 结 论

本文设计了一种新的 SH-COS 混沌弱信号检测系统,通过动力学理论分析和仿真分析可知其具有良好的混沌特性。与 Duffing 混沌弱信号检测系统相比,新系统具有如下的优点:(1)在弱信号加入后,变量 y 和 z 输出收敛于零,混沌态到大周期态的转变更加明显,更易于电子设备区分;(2)输出不会随着输入信号的增强出现混沌和大周期交替出现的误检测,提高信号检测范围;(3)新混沌系统的频率、相位检测精度优于 Duffing 系统。新设计的 SH-COS 混沌弱信号检测系统满足混沌弱信号检测系统实际工程应用的各项性能指标要求,本研究有助于未来混沌弱信号检测技术的实际工程应用。

参考文献

[1] 聂春燕. 混沌系统与弱信号检测. 北京: 清华大学出版社,2009. 9-59

[2] 唐良瑞,李静,樊冰等. 新三维混沌系统及其电路仿真. 计量学报,2009,58(2):785-793

- [3] Zhang X Y, Guo H X, Wang B H, et al. A new method for detecting line spectrum of ship radiated noise using Duffing oscillator. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (14):1906-1912
- [4] Fu Y Q, Wu D M, Zhang L, et al. A circular zone partition method for identifying Duffing oscillator state transition and its application to BPSK signal demodulation. *Sciences China Information Sciences*, 2011, 54 (2): 1274-1282
- [5] 聂春燕,石要武,刘振泽. 混沌系统测量 nV 级正弦信号方法的研究. *电工技术学报*,2002,17(5):87-90
- [6] 尚秋峰,乔宏志,尹成群等. 基于 Duffing 振子和 ML 的微弱信号幅值估计新方法. *仪器仪表学报*,2005,26 (12):1271-1285
- [7] 王冠宇,陈大军,林建亚等. Duffing 振子微弱信号检测方法的统计特性研究. *电子学报*,1998,26(10):38-44
- [8] 曾喆昭,周勇,胡凯. 基于扩展型 Duffing 振子的局部放电信号检测方法研究. *物理学报*, 2015, 64(7): 1-5
- [9] 路鹏,李月. 微弱正弦信号幅值混沌检测的一种改进方案. *电子学报*,2005,33(3):527-529
- [10] 周小勇. 一种具有恒 Lyapunov 指数谱的混沌系统及其电路仿真. *物理学报*,2011,60(10):1-12
- [11] 刘海波,吴德伟,戴传金等. 基于 Duffing 振子的弱正弦信号检测方法研究. *电子学报*,2013,41(1):8-12
- [12] 吴德伟,金伟,王永庆. Duffing 振子微弱信号检测方法研究. *物理学报*,2013,(62)5:42-47
- [13] 王光义,丘水生,陈辉等. 一个新的混沌系统及其电路设计与实现. *电路与系统学报*,2008,13(5):58-65
- [14] 陆安山,陆益民. 一种变形 Liu 混沌系统的分析与实现. *江西师范大学学报*,2014,38(5):468-471
- [15] 谢涛,曹军威,廉小亲. 混沌振子弱信号检测系统构成及响应速度研究. *计算机工程与应用*,2015,51(9):16-21
- [16] 范剑,赵文礼,王万强. 基于 Duffing 振子的微弱周期信号混沌检测性能研究. *物理学报*, 2013,62(18):1-6
- [17] 石敏,陈迎春,屈武. 基于改进混沌系统的微弱信号检测方法. *舰船科学技术*,2013,62(18):1-6

Design of a new SH-COS chaotic system for weak signal detection

Song Feifei, Wei Ziming, Xi Jingwei

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

The chaos theory was applied to weak signal detection, and the SH-COS, a new chaotic circuit based weak signal detection system synthesizing a 3D chaos and a COS function was designed. The SH-COS system's dynamic characteristics were theoretically analyzed, and its circuit simulation analyses were conducted with the software of Matlab and Multisim. The analyzing results show that compared with the performance of the Duffing chaos weak signal detection system that is widely discussed currently and the phase locked amplifier, the new SH-COS system has the features of strong anti noise, wide area diversity in signal detection and high detection accuracy during the measurement process, which can make up their shortcomings of unstable large periodic state and difficulty in distinguishing chaos and periodic state. The large periodic state of the new system's output is convergent, and the correctness of the design method is verified through the simulation results. This shows that the new system has the better performance in weak signal detection, and is more suitable for practical engineering applications.

Key words: weak signal detection, Duffing system, high-dimensional chaotic system, chaotic circuit, Matlab simulation