

改进检测周期脉冲信号的非线性随机共振系统

方秀宁¹, 李健^{1,2}, 向林¹, 倪强¹

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 西南交通大学信息编码与传输四川省重点实验室, 成都 610031)

摘要:在利用非线性随机共振系统检测周期脉冲信号的研究中,通常采用的非线性系统为双稳态系统。针对双稳态系统的两个结构参数不易调节,误差较大,限制了系统检测性能的提高。为了优化系统,提高系统检测性能,提出采用只有一个结构参数且具有积分放大作用的单稳态系统。通过分析信号频谱,对比信号幅值,证实结构参数取较小值的单稳态系统具有积分作用,易于调节。Matlab、Monte - Carlo 仿真验证具有积分特性的单稳态系统可获得更佳检测效果。

关键词:检测;随机共振;单稳态;周期脉冲信号;非线性系统

中图分类号:TP202⁺⁷

文献标识码:A

引言

传统的信号检测方法都是从去除噪声,从而提高信噪比出发。而自从上个世纪 80 年代意大利人 Benzi^[1-2] 等人在研究地球古气象问题时提出了随机共振(SR)被应用在信号检测领域后。人们欣喜的发现这是一种完全不同于传统信号检测的新方法,它将微弱周期信号与噪声送入非线性系统中,通过调节噪声强度或者非线性系统结构参数,使三者达到一种协调作用,类似物理上的“共振”,从而使噪声能量向信号转移,实现信噪比的提高^[3]。

随机共振最早被发现存在于双稳态非线性系统中,随着深入的研究,单稳态非线性系统中同样存在随机共振现象^[4-5]。当前应用双稳态非线性系统检测信号时,通常采用的是参数调节法^[6],由于双稳态系统有两个结构参数(a,b),文献[6]指出需要先固定一个结构参数 b,然后调节另一个结构参数 a,虽然这种方法能够实现随机共振,但是检测速率太低,误差较大,很难实现最佳随机共振。文献[7]提出了自适应随机共振,虽然能够实现最佳随机共振,但是由于被检测信号的差异性,每检测一次信号,就需要从新自适应搜索能够实现最佳共振的 a,b 值,检测速率低。本文采用只有一个结构参数

的单稳态非线性系统,简化了电路设计。同时当单稳态非线性系统的结构参数为较小值时,不仅具有积分放大作用,能够大幅度提升周期脉冲信号的幅值,提高信号检测性能,而且在检测不同信噪比信号时,只需微调结构参数取值,即可取得较佳的共振效果,检测速率大大提高。

本文从 Langevin 方程出发,分析周期脉冲信号分别应用双、单稳态系统检测,其在不同结构参数值的情况下,输出信号幅值变化,说明单稳态随机共振系统具有积分放大作用,并通过 Monte - Carlo 仿真,得到双、单稳态的检测性能对比表。

1 系统理论

随机共振产生需要三个必需条件:微弱周期信号、噪声、非线性系统。原理框图如图 1。

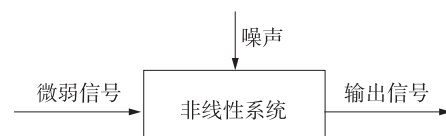


图 1 随机共振原理框图

描述随机共振的 Langevin 方程如下:

收稿日期:2011-05-20

基金项目:四川省应用基础研究项目(2008JY0048);西南交通大学信息编码与传输四川省重点实验室开发研究基金(LF08007)

作者简介:方秀宁(1987-),男,山东枣庄人,硕士生,主要从事信号检测方面的研究。

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{dU(x)}{x} + s(t) + \Gamma(t) \tag{1}$$

其中 x 为系统输出, $U(x)$ 为双稳势函数, 当 a 取值逐渐减小, 双稳态逐渐变为单稳态如图 2, $P(x)$ 为单稳势函数。

$$U(x) = -\frac{ax^2}{2} + \frac{bx^4}{4}, P(x) = \frac{bx^4}{4} \tag{2}$$

a, b 为非线性系统结构参数, $s(t)$ 为微弱周期脉冲信号, 幅值 $A = 0.05$, 频率 $f = 0.01 \text{ Hz}$, 占空比 $\tau = 0.5$ 如图 3(a), 即

$$s(t) = \begin{cases} A & t \in [nT, nT + 0.5T] \\ -A & t \in [nT + 0.5T, (n+1)T] \end{cases} = \begin{cases} 0.05 & t \in [100n, nT + 50] \\ -0.05 & t \in [100n + 50, (n+1)100] \end{cases}$$

$\Gamma(t)$ 是均值为 0, 噪声强度为 D 的高斯分布白噪声。

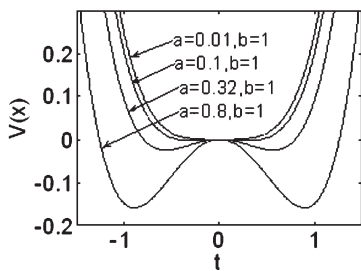


图 2 $b = 1, a$ 取不同值时双稳势渐变成单稳图

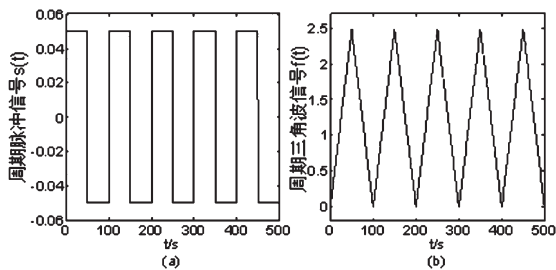


图 3 (a) 周期脉冲信号, (b) 周期三角波信号

当质点在微弱周期信号和噪声的叠加作用之下, 质点可以周期性按频率 f 越过图 2 中双势阱之间的势垒, 使得微弱周期信号能量增强的现象称为双稳态随机共振(阱间共振)。当信号、噪声和非线性系统达到某种匹配, 只能在单阱之间进行周期性的运动称为单稳态随机共振。

2 单稳态非线性系统积分放大特性

由于噪声是随机力, 不利于准确分析系统特性, 因此在下面的讨论中, 把噪声摘掉, 分析双、单稳态系统特性。

2.1 双稳态模型

令 $\Gamma(t) = 0$ 时, 方程(1)变为

$$\frac{dx}{dt} - (ax - bx^3) = s(t) \tag{3}$$

当 $a \neq 0, b \neq 0$ 时系统为双稳态系统, 将周期脉冲信号 $s(t)$ 送入不加噪声的双稳态系统中, 根据参数调节法, 结构参数 $b = 1$, 调节 a 取不同值时, 输出信号图形如图 4。

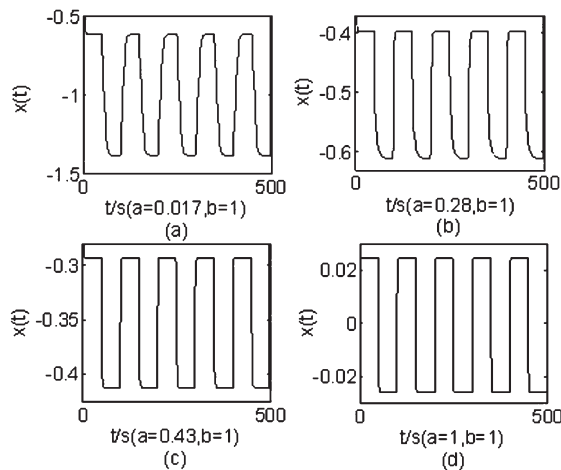


图 4 $b = 1$, 调节 a 取不同值时输出信号时域波形图

从图 4 可以看出: 1、周期脉冲信号送入双稳态系统其输出信号幅值(峰-峰值)随着 a 取值不断增大而不断减小, 由于随着 a 取值不断加大, 系统由单稳态系统逐渐变为双稳态系统。2、 a 取较小值时输出信号近似为周期三角波信号如图 4(a), 随着 a 取值不断增大, 输出信号逐渐近似为周期脉冲信号如图 4(c)(d)。

2.2 单稳态模型

在实际系统中, 在物理、化学以及生物领域, 存在着许多单稳态系统^[8]。Vilar JMG 和 Rubi JM 研究了一类单稳态系统并发现了随机共振现象。令双稳态系统中的结构参数 $a = 0, b \neq 0$ 变成了单稳态系统。因此方程(1)变为

$$\frac{dx}{dt} + bx^3 = s(t) \tag{4}$$

对比方程(4)和(3)可知, 单稳态系统比双稳态系统少一个结构参数, 实际电路设计更加简洁。

将周期脉冲信号 $s(t)$ 送入不加噪声的单稳态系统, 调节 b 取不同值时, 输出信号图形如图 5。当 $b = 0$ 时方程(4)变为一阶积分函数 $\frac{dx}{dt} = s(t)$, 输出信号为周期三角波信号如图 3(b)。图 3(b)中信号是由图 3(a)经过一阶积分得来的。而图 5 中当 b 取较小值时, 输出信号

近似为周期三角波信号且幅值较大。可见 b 取较小值的单稳态系统具有积分特性。

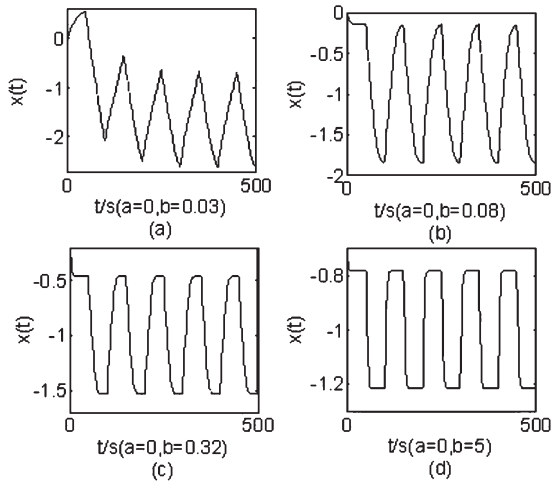


图 5 $a=0$, 调节 b 取不同值时输出信号时域波形图

从图 5 可知:由于 b 取较小值的单稳态系统具有积分特性,故而输出信号近似为周期三角波信号,此时输出信号幅值相对较大;而当 b 不断加大,单稳态系统逐渐丧失积分特性,输出信号趋近为周期脉冲信号,此时输出信号幅值逐渐变小。

2.3 信号频谱分析

将幅值 $A = 0.05$, 频率 $f = 0.01$ Hz, 占空比 $\tau = 0.5$, 信噪比为 -22 db 的周期脉冲信号分别送入双稳态系统和单稳态系统。为了两个系统结果对比更准确,分别调节两个系统的结构参数使系统为相对最佳共振。此时双稳态系统结构参数 $a=0.43, b=1$ 如图 4(c), 单稳态系统结构参数为 $a=0, b=0.03$ 如图 5(a)。

由于添加噪声后无法对输出信号时域波形做频谱分析,故只分别对 $a=0.43, b=1$ 和 $a=0, b=0.03$ 这两种情况不加噪声时输出信号时域波形(如图 4(c)和图 5(a))做频谱分析^[9]。

为了便于分析,将图 4(c)对应波形整体上移变为周期脉冲信号如下

$$f(t) = \begin{cases} A & t \in [nT, nT + 0.5T] \\ -A & t \in [nT + 0.5T, (n+1)T] \end{cases}$$

$$= \begin{cases} 0.06 & t \in [nT, nT + 0.5T] \\ -0.06 & t \in [nT + 0.5T, (n+1)T] \end{cases}, \text{故其}$$

周期脉冲信号的傅里叶变换为

$$F_{mai}(\omega) = \pi A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(Sa\left(\frac{n\pi}{2}\right)e^{-j\frac{n\pi}{2}} - Sa\left(\frac{n\pi}{2}\right)e^{-j\frac{3n\pi}{2}} \right) \delta(\omega - n\omega_1) \dots \quad (5)$$

为了便于分析,将图 5(a)对应波形整体上移变为周期

三角波信号

$$f(t) = \begin{cases} Bx & t \in [nT, nT + 0.5T] \\ -Bx + BT & t \in [nT + 0.5T, (n+1)T] \end{cases}$$

$$= \begin{cases} 0.046x & t \in [nT, nT + 0.5T] \\ -0.046x + 4.6 & t \in [nT + 0.5T, (n+1)T] \end{cases}$$

其傅里叶变换为

$$F_{san}(\omega) = \frac{\pi BT}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Sa^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) e^{-j\frac{n\pi}{2}} \delta(\omega - n\omega_1) \quad (6)$$

故 $a = 0, b = 0.03$ 对应图 4(c) 输出信号频域幅值与 $a = 0.43, b = 1$ 对应图 5(a) 输出信号频域幅值之比为 $\frac{2BT}{\frac{\pi}{4A}} = 12.5$ 。综上可知,结构参数取较小值的单稳态系统具有积分放大作用,因而应用于周期脉冲信号检测时,可以大幅度的提升输出信号的幅值,而双稳态系统则没有积分放大作用。

3 性能指标

3.1 信噪比提升值

信噪比是随机共振常用的性能评价指标,其输出信噪比定义为:输出信号功率谱中信号频率处的幅值与同频背景噪声之比,表达式为:

$$SNR = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \int_{\omega-\Delta\omega}^{\omega+\Delta\omega} S(\omega) d\omega / S_N(\omega)$$

其中 $S(\omega)$ 表示信号功率谱密度, $S_N(\omega)$ 为噪声在信号频率附近的强度大小。本文为了更直观的反应被检测信号具体信噪比提高了多少,采用信噪比提升值(信噪比提升值 = 输出信噪比 - 输入信噪比)。

3.2 检测率

如果一个系统可以获得很高的信噪比提升值,但是进行 100 次检测,只能检测出一二十次,这种系统显然是不能应用于实际工程的。因此从信号检测应用的角度,提出采用检测率来评价一个系统的实用性。检测率指重复进行多次检测,被检测信号频谱值为所有频谱值中最大值的概率。

3.3 相对幅值

在系统检测的输出信号频域图中,被检测信号的幅值(最大值)仅比第二高度幅值大一点,这显然是不利于观测的,因此相对幅值也是反应系统检测性能的一个指标。相对幅值是指在输出信号频域图中,被检测信号的幅值(最大值)与第二高度幅值之间的差值如图 6 和图 7。

4 实验仿真与数值分析

图 6 与图 7 为将信噪比为 -22 db 的周期脉冲信号

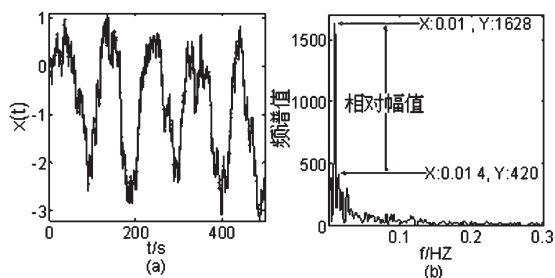


图6 单稳态系统输出信号时域图与频域图

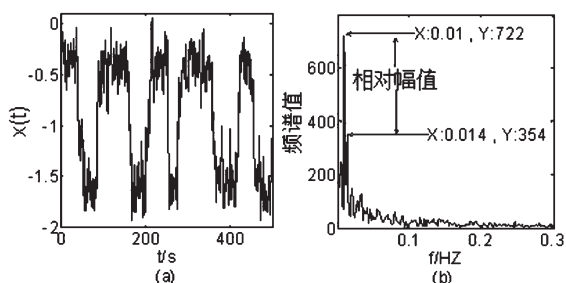


图7 双稳态系统输出信号时域图与频域图

分别应用单稳态系统和双稳态系统检测后输出信号的时域图与频域图。从图6输出信号时域图可看出,加入噪声后输出信号时域图近似为周期三角波信号,而频域图中被检测信号0.01 Hz的幅值为1628。从图7输出信号时域图可看出,加入噪声后输出信号时域图近似为周期脉冲信号,而频域图中被检测信号0.01 Hz的幅值为722。对比图6和图7不难看出,应用单稳态系统检测输出信号幅值比应用双稳态系统要大的多,更容易被检测出来。

将幅值 $A = 0.05$, 频率 $f = 0.01$ Hz, 占空比 $\tau = 0.5$ 的周期脉冲信号分别送入单稳态随机共振系统和双稳态随机共振系统。在输入信噪比相同的情况下,取 $a = 0$, 调节 b 为最佳值,使单稳态系统处于最佳共振状态;取 $b = 1$, 调节 a 为最佳值,使双稳态系统处于最佳共振状态。通过对比相对幅值、信噪比提升值、检测率三个指标,来看单稳态系统和双稳态系统在检测周期脉冲信号时的优劣如表1。

从表1可知,在相同输入信噪比的情况下,结构参数取较小值的单稳态系统由于对周期脉冲信号具有积分作用,使得相对于双稳态系统,输出信号相对幅值提高了近1.5倍,信噪比提升值平均提高约2.3db,检测率平均提高约10%。同时也可知,不同输入信噪比双稳态系统的结构参数 a 最佳值相差很大,每检测一次信号,均需花费大量时间来寻找较佳共振值。而单稳态系统的结构参数 b 最佳值则相差不大,只需微调即可实现最

表1 表1 单稳态系统与双稳态系统进行1000次仿真结果对比

单稳态输入 SNR	b 最佳值 (a=0)	相对幅值均值	信噪比提升值均值	检测率
-20db	0.022	498.0	29.8	94%
-22db	0.030	437.2	31.1	86.4%
-24db	0.040	366.0	32.1	73.5%
-26db	0.045	287.1	33.4	59.6%
-28db	0.035	300.3	34.8	45.1%
-30db	0.036	256.0	36.6	41.5%
双稳态输入 SNR	a 最佳值 (b=1)	相对幅值均值	信噪比提升值均值	检测率
-20db	0.34	270.0	28.3	88.9%
-22db	0.43	232.0	29.1	73.3%
-24db	0.56	208.8	29.9	53.9%
-26db	0.62	168.6	31.3	47.3%
-28db	0.72	140.0	32.6	35.1%
-30db	0.8	106.5	35.3	22.3%

佳共振,信号检测更加快捷。综上所述,利用随机共振现象检测周期脉冲信号,应用结构参数取较小值的单稳态系统,其检测效果优于双稳态系统。

5 结论

本文指出了以往利用随机共振现象检测周期脉冲信号时,所选用的双稳态非线性系统,电路结构复杂,结构参数不易调节,较难达到最佳共振,导致信号检测性能不佳等缺点。提出了采用具有积分放大作用,结构简单的单稳态系统进行周期脉冲信号检测。通过对比电路结构图,证实了单稳态系统电路结构更加简洁。通过仿真证明,应用结构参数取较小值的单稳态系统可以进一步提高周期脉冲信号的检测性能,提高信号检测速率。本文的研究成果为利用随机共振现象检测微弱信号选择非线性系统提供一些新的思路。

参考文献:

- [1] Benzi R, Suter A, Vulpiana A. The mechanism of stochastic resonance[J]. *Phys. A: Math. Gen.*, 1981, 14(11): 453-457.
- [2] Benzi R, Parisi G, Stuenkel A. A theory of stochastic resonance in climatic change[J]. *SIAM Journal on applied mathematics*, 1983, 43(3).
- [3] 杨祥龙, 汪乐宇. 一种强噪声背景下弱信号检测的非线性方法[J]. *电子与信息学报*, 2002, 24(6): 811-815.
- [4] 冷永刚, 王太勇, 郭炎, 等. 基于双稳态随机共振的信息检测[J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(5): 734-739.
- [5] 杨定新, 胡莺庆. 随机共振在微弱信号检测中的数

- 值仿真[J].国防科技大学学报,2003,25(6):91-94.
- [6] Xu B,Duan F,Bao R. Stochastic resonance with turning system paramters:the application of bistable systems in signal processing[J].Chaos,Solitons & Fractals,2002,13(4):633-644.
- [7] 赵文礼,田帆,邵柳东.自适应随机共振技术在微弱信号测量中的应用[J].仪器仪表学报,2007,28(10):1787-1791.
- [8] 郭峰.随机共振及其在微弱信号检测中的应用[D].电子科技大学,2007.
- [9] 郑君里.信号与系统[M].北京;高等教育出版社,2000.

Improved Nonlinear Stochastic Resonance System of Detecting the Periodical Pulse Signal

FANG Xiu-ning¹, LI Jian^{1,2}, XIANG Lin¹, NI Qiang¹

(1. School of Electronic and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Information Coding and Transmisson of Key Laboratory in Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: During the study of using the nonlinear stochastic resonance system to detect the periodic pulse signal, the bistable nonlinear system is usually used. Bistable system has two structural parameters which are not easy to be adjusted, which result in big error and limit to improve the system detection performance. In order to optimize the system, improve the system detection performance and pose to use the single system which has a structural parameters and integral function. Through analysing signal spectrum, contrasting signal amplitude, the result confirmed that the single system has integral effect which structure parameters took smaller value. Matlab and Monte-Carlo simulation indicates that the single stable nonlinear system can get better detection performance which has integral function.

Key words: detection; stochastic resonance; single stable system; periodic pulse signal; the nonlinear system