

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.016

引用格式:热依扎·海然,叶尔肯·加伦木汉,山拜·达拉拜.双模非高斯噪声背景下级联双稳态随机共振信号检测[J].电讯技术,2014,54(9):1260-1264. [Riza Hairan, Erkin Jalimhan, Senbai Dalabaev. Cascaded Bistable Stochastic Resonance Signal Detection under Dual-mode Non-Gaussian Noise Background[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9):1260-1264.]

双模非高斯噪声背景下级联双稳态随机共振信号检测^{*}

热依扎·海然^{1,**}, 叶尔肯·加伦木汉², 山拜·达拉拜¹

(1. 新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 阿勒泰广播电视大学, 新疆 阿勒泰 836500)

摘 要:针对随机共振(SR)以高斯噪声为研究背景的局限性,为了分析非高斯噪声对级联随机共振的影响且验证在双模非高斯噪声中级联随机共振的降噪及波形整形特性的可靠性,提出了级联双稳随机共振系统在双模非高斯情况下的微弱信号检测方法。输入信号在进行信号检测过程中,首先把概率密度函数作为随机共振现象的衡量指标,然后当系统处于最佳随机共振状态时,分析了非高斯参数、相关时间及噪声强度之间的关系。最后通过仿真实验,与一级 SR 相比,二级 SR 的噪声强度和相关时间的可用范围随着非高斯参数的减少不仅会得到增大,而且滤波特性、信号检测效果得到明显提高。

关键词:级联随机共振;微弱信号检测;非高斯噪声;概率密度函数

中图分类号:TN911.71 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)09-1260-05

Cascaded Bistable Stochastic Resonance Signal Detection under Dual-mode Non-Gaussian Noise Background

Riza Hairan¹, Erkin Jalimhan², Senbai Dalabaev¹

(1. College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
2. Altay Radio and TV University, Altay 836500, China)

Abstract: In terms of the limitation of stochastic resonance(SR) in a Gaussian noise under non-Gaussian noise background, and in order to analyze the effect of dual-mode non-Gaussian noise on the cascaded bistable stochastic resonance(CBSR) with the validity of suppressing noise and verify the reliability of wave shaping of CBSR under the dual-mode non-Gaussian noise environment, weak signal detection of CBSR is proposed. In input signal detection, the probability density function is taken as a measure of stochastic resonance phenomenon, then, also the relationship between the non-Gaussian parameter, the correlation time and noise strength is analyzed when the stochastic resonance is kept in an optimal state. Finally, simulation confirms that the reliable region of noise strength and correction time of the second SR is not only expended with the decrease of non-Gaussian parameter, but also filter property and detection performance are improved obviously compared with the first level SR.

Key words: cascaded stochastic resonance; weak signal detection; non-Gaussian noise; probability density function

1 引 言

随机共振(Stochastic Resonance, SR)是 Benzi^[1]等人于 1981 年研究古气象冰川问题时提出的。此后,随机共振及相关问题的研究引起了人们的广泛关注。应用随机共振原理检测强噪声中的微弱信号是一种具有实际应用价值的新技术,尤其是信息论与随机共振相结合,使得随机共振现象在信号处理、通信、雷达、生物系统、化学系统、医学图像处理和光学信号处理等若干领域得到了更广泛的研究。

近 30 年以来,随机共振理论在微弱信号检测领

^{*} 收稿日期:2014-03-06;修回日期:2014-07-14 Received date:2014-03-06;Revised date:2014-07-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971130)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 60971130)
^{**} 通讯作者:dsjhr@163.com **Corresponding author:** dsjhr@163.com

域中^[2],当非线性系统、噪声与弱信号三者之间的关系达到最佳匹配时,强噪声能量向弱信号转移,系统的输出信噪比达到最大值。但大部分研究是在不同输入信号和零均值、单位方差的高斯白噪声背景下进行的,例如参数调节随机共振^[3]、自适应随机共振^[4]及遗传、粒子群等各种多目标优化算法与随机共振相结合的弱信号检测方法^[5-6]。这些方法之所以具有较好的检测效果,是因为一般的电子设备中,以高斯噪声为背景是适合的,而且假设高斯噪声处理比较简单、方便。但这种假设不符合实际情况,由此文献[7-8]证实了对随机共振进行信号检测效果产生影响的往往是非高斯噪声。此外,从国内外有相关研究成果得知^[9],非高斯噪声可以是双模噪声,也可以是多模噪声。所以,本文提出双模非高斯噪声背景下级联随机共振微弱信号的检测方法来分析一类非高斯噪声的模型特性对典型的级联双稳态随机共振的影响,并得到了较好的信号检测效果以及级联随机共振的整形波形和低通滤波效果。

2 非高斯噪声与随机共振的简化数学模型^[10]

2.1 双模非高斯噪声

双模噪声是由非高斯噪声和高斯噪声混合而成的一种噪声,这种噪声同时兼容了非高斯和高斯噪声的特性。本文采用的非高斯噪声 $\eta(t)$ 是双模噪声中的一类模型,这种模型包括高斯噪声式中的 $\xi(t)$ 与随机振荡噪声 $F\cos\theta(t)$,其概率密度函数及统计特性为

$$P(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{8\pi\sigma}} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{(x - F\cos\theta)^2}{-2\sigma^2}\right) d\theta \quad (1)$$

上述模型的均值为

$$E(x) = \frac{F}{\pi} \int_0^{2\pi} \cos\theta \phi\left(\frac{F\cos\theta}{\sigma_0}\right) d\theta + \sigma_0 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(\frac{-F^2}{4\sigma_0}\right) I_0\left(\frac{-F^2}{4\sigma_0}\right) \quad (2)$$

方差为

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - E(x)]^2 P(x) dx = \sigma_0^2 + \frac{F^2}{2} \quad (3)$$

式(3)中的 σ 是双模非高斯噪声中的高斯分量的方差。

2.2 基本随机共振理论

考虑一个噪声来源于非高斯噪声与加性高斯共同激励时,非线性双稳态随机共振系统的势函数为如下:

$$U(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4 + x(S(t) + \eta(t)) \quad (4)$$

$$\Delta U = \frac{a^2}{4b} \quad (5)$$

式(4)中, a, b 为双稳态随机共振系统的系统结构参数,非高斯噪声 $\eta(t)$ 是均值为零、方差为 1 的高斯白噪声 $\xi(t)$ 和随机震荡信号的混合, $S(t)$ 为被测的微弱方波信号;方程(5)表示的是由两个势阱和一个势垒组成的双稳态系统。当输入信号幅值 F 和噪声强度 D 均为零时,系统有两个相同的势阱,它们在最小点 $x_m = \pm\sqrt{a/b}$ 处,它们被垒高为 ΔU 的势垒所分隔,且垒高点在 $x_b = 0$ 处,如图 1 所示。此外,有激励信号的情况下,势函数的高度会随着信号的变化而变化。

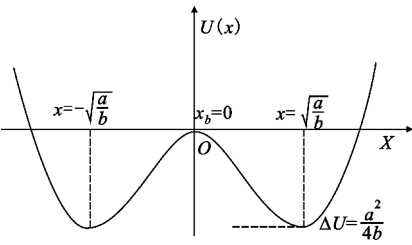


图 1 无信号时势函数的形状
Fig. 1 The shape of the potential function when no signal exists

当受到信号和噪声调制时,采用郎之万 (Langevin) 微分方程来表示非线性双稳态随机共振系统:

$$\frac{dx}{dt} = -U'(x) + \eta(t) + S(t) \quad (6)$$

根据上述定义的非高斯噪声及其相关的特性 $V_q(\eta)$ 为^[11]

$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{1}{\tau} \frac{d}{d\eta} V_q(\eta) + \frac{1}{\tau} \xi(t) \quad (7)$$

$$V_q(\eta) = \frac{D}{\tau(q-1)} \ln\left(1 + \frac{\tau}{D}(q-1) \frac{\eta^2}{2}\right) \quad (8)$$

式中, τ 是非高斯噪声的相关时间, D 为高斯白噪声强度,非高斯参数为 q 。衡量随机共振现象的指标有多种,比如:测度周期随机共振的信噪比、信噪比增益驻留时间分布;度量非周期随机共振的相关函数、相关系数等以及针对数字信号传输中的误码率、信道容量。因此,本文在脉冲信号处理中把输出信号的概率密度函数视为衡量随机共振现象的指标。定义为如下^[6,12]:

$$\langle \eta^2 \rangle = \frac{2D}{\tau(5-3q)} \quad (9)$$

$$P_q(\eta) = \begin{cases} \frac{1}{Z_q} (1 - (\frac{\eta}{\omega})^2)^{\frac{1}{1-q}}, & |\eta| < \omega \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中, Z_q 是归一化因子, $\omega = \sqrt{\frac{2D}{(1-q)\tau}}$ 。非线性双稳系统参数、噪声及信号达到某种协同时,通过观察输出信号的概率密度曲线,发现系统发生了随机共振现象,而且强噪声中检测出待测的弱信号。因为

在基带信号处理中,非线性双稳系统没有发生随机共振的时候,概率分布接近于高斯分布;而系统发生随机共振时,输出信号是源信号的准确估计,因此输出信号的概率密度分布与源信号的概率分布是一致的,且输出信号的概率密度函数完全可以视为随机共振的衡量指标。

3 非高斯噪声对级联双稳态随机共振影响

级联随机共振^[13]是随机共振系统一层一层处理传输,逐层增强微弱信号的传输,即上一层随机共振的输出视为下一层随机共振的输入,这样将会提高随机共振系统的使用范围,更进一步体现出它的降噪和整形效果,同时优化输出信号的概率密度函数值,其结构如图 2 所示。

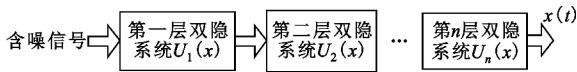


图 2 级联双稳态随机共振系统
Fig. 2 Cascaded bistable SR system

根据传统的随机共振郎之万方程可得出级联随机共振的基本模型郎之万微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -U'(x_2) + \eta(t) + s(t) \\ \frac{dx_2}{dt} = -U'(x_2) + x_1 \\ \dots \\ \frac{dx_n}{dt} = -U'(x_n) + x_{n-1} \end{cases} \quad (11)$$

为了研究方便,本文以两层串联的双稳态随机共振系统作为研究对象,也就是式(11)中 $n=2$,这类非高斯噪声中双稳态随机共振系统不仅具有良好的降噪特性与整形波形的效果,而且非高斯噪声也会影响到随机共振在强噪声中弱信号的检测能力。

4 仿真实验

为解决上述问题,本文对含非高斯噪声的方波信号进行实验仿真。在实验中,取双稳态随机共振的系统参数为 $a=1, b=1$ 及其信号参数 $A=1.8, D=0.4, f=0.01\text{ Hz}, fs=100\text{ Hz}$,非高斯噪声相关时间 $\tau=1$,参数 $q=0.65$,其输入信号、待测信号及系统输出信号波形及频谱如图 3 所示。从实验结果可知,源信号淹没在这一类非高斯噪声背景中而不能识别。为了识别出非高斯噪声中信号的信息特征,首先经过典型的 1 级双稳态随机共振来降噪,然后 1 级随机共振的输出作为 2 级的输入。结果表明,随着级联层数的增加,高频噪声部分减少,时域波形越

来越光滑,输出频谱也越来越高,从而得出级联随机共振具有良好的降噪及整形波形特性,同时还可以发现逐级随机共振输出信号频谱也得到提高。图(c)与图(e)相比,图(e)的降噪和波形平滑效果更好,该图说明非高斯噪声中级联随机共振具有良好的检测信号效果。

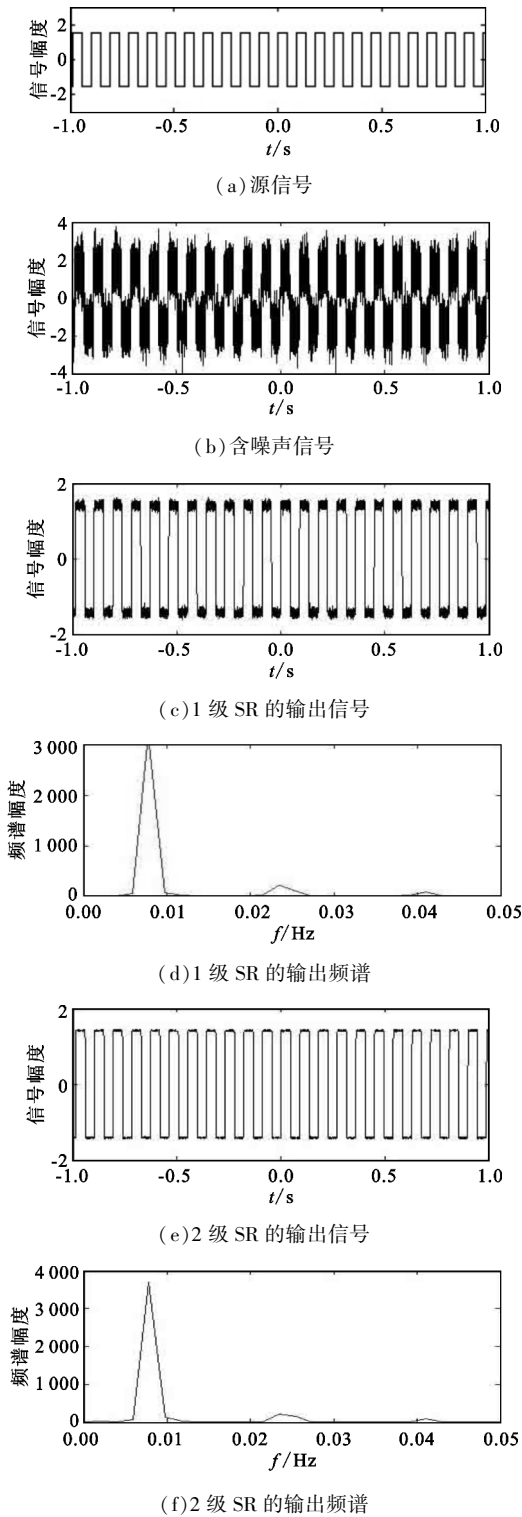


图 3 带噪信号经过级联双稳态随机共振后的信号检测效果
Fig. 3 Results of detecting noisy signal after CBSR

但是在固定的噪声相关时间 τ 和一组不同非高斯参数 q 以及固定的 q 和一组不同的噪声相关时间 τ 的情况下,概率密度函数 P 与噪声强度 D 的仿真结果如图 4 和图 5 所示。从图中得知,在非高斯噪声背景下级联双稳态随机共振与文献[8]在三势阱逻辑随机共振系统上所得到的研究成果相比,级联双稳态随机共振系统的信号检测能力同样会受到非高斯噪声的参数 q 和相关时间参数 τ 的影响。比如:当 $q < 1$ 时,噪声的噪声强度最优频带变宽且当 q 固定时,随着 τ 的增加噪声强度转移到较大的位置;而当 τ 固定时,随着 q 的增加 D 逐渐变得窄;当 $q > 1$ 时,与高斯噪声相比,非高斯噪声可以扩展最优噪声的窗口,而且随着随机共振级联数的增加,噪声强度最优值的范围更宽,同时随机共振的指标概率密度函数峰值就更高。

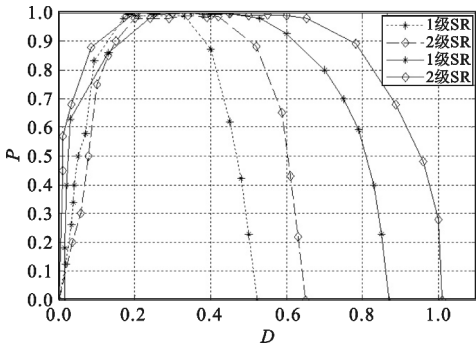


图 4 当 $q=0.65, \tau=1, 0.25$ 时, P 随 D 和 q 的变化情况(从右边开始)

Fig. 4 When $q=0.65, \tau=1$ and 0.25 , changes of P with D and q (starting from the right)

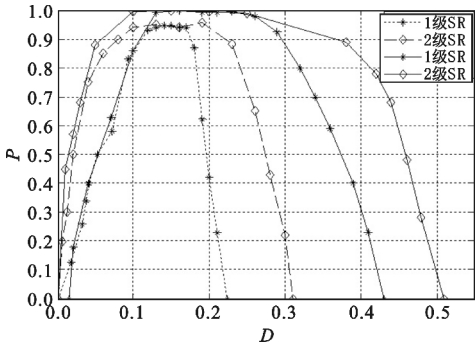


图 5 当 $\tau=2, q=1, 1.4$ 时, P 是随 D 和 q 的变化情况(从右边开始)

Fig. 5 when $\tau=2, q=1$ and 1.4 , changes of P with D and q (starting from the right)

5 结 语

根据国内外文献在这方面的研究,本文提出了

双模非高斯噪声背景下级联随机共振微弱信号的检测,通过观察概率密度函数曲线的变化来判断系统发生随机共振现象且对被非高斯淹没的方波微弱信号进行检测。实验结果验证了该方法的可靠性,通过观察仿真结果和分析输出概率密度函数曲线可知:当 $q < 1$ 时,随着 τ 和级联数的增加,噪声强度 D 的范围变宽,检测效果更好;当 $q > 1$ 时,与高斯噪声相比,在该系统中非高斯噪声可以扩展最优噪声窗口;随机共振级联数的增加不仅有利于噪声最优带宽变宽,而且强噪声中检测微弱信号效果比低级随机共振更好。

参考文献:

[1] Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1981, 14(11): 453-457.

[2] 石盛超,李广侠,李志强,等. 基于欠采样随机共振的单频微弱信号检测新方法[J]. 电讯技术, 2014, 54(5): 605-610.

SHI Sheng-chao, LI Guang-xia, LI Zhi-qiang, et al. A novel weak single frequency signal detection method based on under-sampling stochastic resonance[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5): 605-610. (in Chinese)

[3] Wu X, Jiang Z P, Reppeger D W. Enhancement of stochastic resonance by tuning system parameters and adding noise simultaneously[C]//Proceedings of American Control Conference. Minneapolis, MN: IEEE, 2006: 1-7.

[4] 于淼,郭军,王曰海. 一种盲自适应随机共振数字基带信号处理方法[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(4): 114-118.

YU Miao, GUO Jun, WANG Yue-hai. A blind adaptive stochastic resonance method of digital baseband signal processing[J]. Computer Engineering and Science, 2012, 34(4): 114-118. (in Chinese)

[5] 王晶,张庆,梁霖,等. 采用遗传算法的自适应随机共振系统微弱信号检测方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 32-36.

WANG Jing, ZHANG Qing, LIANG Lin, et al. Adaptive stochastic resonance based on genetic algorithm with application in weak signal detection[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3): 32-36. (in Chinese)

[6] 李继猛,陈雪峰,何正嘉. 采用粒子群算法的冲击信号自适应单稳态随机共振检测方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 58-63.

LI Ji-meng, CHEN Xue-feng, HE Zheng-jia. Adaptive monostable stochastic resonance based on the PSO with application in impact signal detection[J]. Journal of Me-

- chanical Engineering,2011,47(21):58-63. (in Chinese)
- [7] 张静静,靳艳飞. 非高斯噪声驱动下非对称双稳系统的平均首次穿越时间与随机共振研究[J]. 物理学报,2012,60(12):49-57.
- ZHANG Jing-jing, JIN Yan-fei. Mean first-passage time and stochastic resonance in an asymmetric bistable system driven by non-Gaussian noise [J]. Acta Physica Sinica, 2012,60(12):49-57. (in Chinese)
- [8] Zhang H, Yang T, Xu W, et al. Effects of non-Gaussian noise on logical stochastic resonance in a triple-well potential system [J]. Chaos,2012,22(4):1-8.
- [9] 山拜·达拉拜,黄玉划. 几类非高斯噪声模型的转换研究[J]. 电子学报,2004,32(7):1091-1093.
- Senbai Dalabaev, HUANG Yu-hua. Research on models transformation of Some non-Gaussian noises[J]. Acta Electronica Sinica,2004,32(7):1091-1093. (in Chinese)
- [10] 李庆华,山拜·达拉拜,邱新建,等. 非高斯背景下小波阈值算法分析[J]. 计算机应用,2012,32(9):2445-2447.
- LI Qing-hua, Senbai Dalabaev, QIU Xin-jian, et al. Wavelet threshold algorithm analysis under non-Gaussian noise background [J]. Journal of Computer Applications,2012,32(9):2445-2447. (in Chinese)
- [11] Fuentes M A, Toral R, Wio H S. Enhancement of stochastic resonance: the role of non-Gaussian noise[J]. Physic A,2001,295(2001):114-122.
- [12] 靳晓琴,许勇,张慧清. 非高斯噪声驱动下一维双稳系统的逻辑操作[J]. 物理学报,2013,62(19):129-134.

JIN Xiao-qin, XU Yong, ZHANG Hui-qing. The reliability of logical operation in a one-dimensional bistable system induced by non-Gaussian noise[J]. Acta Physica Sinica,2013,62(19):129-134. (in Chinese)

- [13] 赖志慧,冷永刚,范胜波. 级联双稳 Duffing 系统的随机共振研究[J]. 物理学报,2013,62(7):69-77.

LAI Zhi-hui, LENG Yong-gang, FAN Sheng-bo. Stochastic resonance of cascaded bistable duffing system [J]. Acta Physica Sinica,2013,62(7):69-77. (in Chinese)

作者简介:



热依扎·海然(1986—),女(哈萨克族),新疆塔城人,硕士研究生,主要研究方向为数字信号处理;

Riza Hairan(Kazakh Nationality) was born in Tacheng, Xinjiang Uygur Autonomous Region, in 1986. She is now a graduate student. Her research direction is digital signal processing.

Email:dsjhr@163.com

叶尔肯·加伦木汗,男(哈萨克族),新疆阿勒泰人,讲师,主要研究方向为电路与电子线路;

Erkin Jalimhan(Kazakh Nationality) was born in Altay, Xinjiang Uygur Autonomous Region. He is now a lecturer. His research concerns circuits and electronic circuits.

山拜·达拉拜(1959—),男(哈萨克族),新疆乌鲁木齐人,博士,教授、研究生导师,主要研究方向为数字信号处理。

Senbai Dalabaev(Kazakh Nationality) was born in Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, in 1959. He is now a professor with the Ph. D. degree and also the instructor of graduate students. His research direction is digital signal processing.