

## $\alpha$ 稳定噪声下时滞非对称单稳系统的随机共振

焦尚彬, 李佳, 张青, 谢国

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048)

**摘要:** 将  $\alpha$  稳定噪声与单稳系统相结合, 分别研究了不同  $\alpha$  稳定噪声环境下的无时滞项和有时滞项的非对称单稳系统的随机共振。利用数值仿真说明了在无时滞项和有时滞项的非对称单稳系统中均存在随机共振现象, 并讨论了  $\alpha$  稳定噪声特征指数  $\alpha$  ( $0 < \alpha \leq 2$ )、对称参数  $\beta$  ( $-1 \leq \beta \leq 1$ )、单稳系统参数  $a$ 、乘性噪声放大系数  $D$ 、非对称系数  $r$  及时滞量  $\tau$  对系统信噪比增益的影响。

**关键词:** LLC 谐振变换器; 大信号模型; 非线性系统; SSOC 调制;  $\alpha$  稳定噪声; 时滞; 非对称单稳系统; 信噪比增益

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 01-0139-09

### Stochastic Resonance in Time-delayed Asymmetric Monostable System with $\alpha$ Stable Noise

Jiao Shangbin, Li Jia, Zhang Qing, Xie Guo

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:**  $\alpha$  stable noise with monostable system was combined to investigate the stochastic resonance of the asymmetric monostable with time delay or not driven by different  $\alpha$  stable noise. The numerical simulation study shows that the stochastic resonance exists not only in the asymmetric monostable system but also in the time-delayed asymmetric monostable system. The effects of the stability index  $\alpha$  ( $0 < \alpha \leq 2$ ) and symmetric parameter  $\beta$  ( $-1 \leq \beta \leq 1$ ) of  $\alpha$  stable noise, the monostable system parameter  $a$ , the amplification factor  $D$  of multiplicative  $\alpha$  stable noise, the asymmetry parameter  $r$  and the time delay on the signal-to-noise ratio gain of the system were explored.

**Keywords:**  $\alpha$  stable noise; time delay; asymmetric monostable stochastic resonance; signal-to-noise ratio gain

## 引言

时滞系统普遍存在于自然和工程实际中, 时滞效应在许多实际问题中是必须考虑的重要因素。近年来, 时滞动力系统已成为电路、神经网络、机械等许多领域的重要研究对象。其中, 一些学者将时滞随机动力系统与噪声结合起来, 研究了时滞系统中的随机共振现象, 其中最典型的的就是时滞非线性

双稳系统中的随机共振。董小娟<sup>[1-2]</sup>分别对关联高斯噪声和非关联高斯噪声和周期信号共同作用下时滞非对称双稳系统的随机共振进行研究, 发现考虑与不考虑时滞影响时系统中的随机共振现象是不同的。非线性单稳系统广泛存在于化学、电子、物理及生物等系统中, 这些系统广泛应用于理论研究和科学实验中。有研究表明, 单稳态系统的某些特性要优于双稳态系统, 比如奇倍频现象的消除、参数调节简单方便等方面。因此, 一些学者对时滞非线性单稳系统中的随机共振进行了相关研究。马聪变等<sup>[3]</sup>运用小时滞近似与最速下降法研究了时滞单稳系统的平均首次穿越时间问题, 得到了系统平均首次穿越时间表达式, 分析了参数对平均首次



收稿日期: 2014-08-26

修回日期: 2014-11-03;

基金项目: 国家自然科学基金(61304204); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2015JM6432); 西安理工大学特色研究计划;

作者简介: 焦尚彬(1974-), 男, 四川宣汉, 博士, 教授, 研究方向为非线性控制, 智能状态检测; 李佳(1991-), 女, 陕西西安, 硕士生, 研究方向为随机共振。

穿越时间的影响。张晓燕等<sup>[4]</sup>研究了周期矩形信号和高斯白噪声作用下的时滞非对称单稳系统的随机共振,分析了非对称参数对随机共振现象的影响,同时给出了信噪比随时滞量变化的曲线图。Zhou等<sup>[5]</sup>研究了相关乘性和加性白噪声作用下的时滞非对称单稳系统的随机共振,发现系统的输出信噪比随时滞量非单调变化。

纵观已有的研究成果,无论是对于单稳系统还是双稳系统,大多都假定外界噪声是高斯噪声的情形,然而在非高斯随机激励下系统所表现出来的特征是不同的。 $\alpha$ 噪声是一类重要的非高斯噪声<sup>[6]</sup>,具有显著的脉冲特性和拖尾特性,能够更为准确的反映客观实际存在的随机扰动。因此用 $\alpha$ 稳定分布描述的 $\alpha$ 稳定噪声要比高斯噪声更具有广泛的现实代表性。李娟娟等<sup>[7]</sup>探究了Duffing系统中Lévy噪声诱导的随机共振与相转移,这里的Lévy噪声是 $\alpha$ 噪声的一个特例。Zeng等<sup>[8]</sup>研究了矩形信号和Lévy噪声共同作用下的随机共振现象。张广丽<sup>[9]</sup>和张文英等<sup>[10]</sup>则对周期信号和Lévy噪声作用下的系统的随机共振进行了相关研究。在这些关于 $\alpha$ 噪声激励下的随机共振现象的研究中,将 $\alpha$ 噪声与时滞非对称单稳系统结合起来的相关研究尚未见报道。因此本文利用数值仿真方法对周期正弦信号和 $\alpha$ 稳定噪声共同作用下的无时滞项和有时滞项的非对称单稳系统的随机共振现象进行研究,分析了 $\alpha$ 稳定噪声特征指数、对称参数、单稳系统参数、噪声放大系数、非对称系数及时滞量对随机共振效应的影响。这既尊重自然和工程实际中大多数系统都存在非对称和时滞现象的事实,又能体现单稳系统的调节参数简单的优势。论文在完善利用随机共振进行信号检测的相关理论和推进将这种方法应用在实践中具有一定的作用和意义。

## 1 随机共振模型与系统信噪比增益

$\alpha$ 稳定分布的基本理论已在文献[11]中作了详尽阐述,并且文献[12]也详细说明了 $\alpha$ 稳定分布的产生方法,故在这里只做简要介绍。 $\alpha$ 稳定分布

用特征指数 $\alpha$  ( $\alpha \in (0, 2]$ )、对称参数 $\beta$  ( $\beta \in [-1, 1]$ )、分散系数(也称尺度参数) $\sigma$  ( $\sigma \in [0, +\infty)$ )及位置参数 $\mu$  ( $\mu \in (-\infty, +\infty)$ )来表示。特征指数 $\alpha$ 决定了稳定分布概率密度函数曲线的尾部平坦度及随机过程的脉冲强度, $\alpha$ 越小,其脉冲性越强,拖尾也越厚;对称参数 $\beta$ 表明了分布曲线的对称性, $\beta = 0$ 表示为对称 $\alpha$ 稳定分布, $\beta < 0$ 说明分布偏左, $\beta > 0$ 说明分布偏右;分散系数(也称尺度参数) $\sigma$ 表明了稳定分布的离散程度,类似于高斯分布中的方差;位置参数 $\mu$ 反映了分布的具体位置,表明了分布的中心。通常记 $\alpha$ 稳定分布为 $S_\alpha(\sigma, \beta, \mu)$ 。

### 1.1 随机共振模型

时滞非对称单稳系统可以用Langevin方程描述为:

$$\begin{aligned} dx/dt = & -ax(t-\tau)^3 + r + \\ & Dx\varepsilon_\alpha(t) + \eta_\alpha(t) + F(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $a$ 为非线性单稳系统的结构参数,且 $a > 0$ ; $r$ 为非对称系数,表征系统的非对称性; $\tau$ 是系统的时滞量; $\eta_\alpha(t)$ 为加性 $\alpha$ 稳定噪声,是外噪声; $x\varepsilon_\alpha(t)$ 为乘性 $\alpha$ 稳定噪声,代表信号在传输过程中信道内部依附于信号而存在的内噪声,其分布与 $\eta_\alpha(t)$ 相同; $D$ 代表 $\varepsilon_\alpha(t)$ 的放大系数,通过改变 $D$ 可以间接地改变 $\varepsilon_\alpha(t)$ 的强度; $F(t)$ 是周期正弦信号,且 $F(t) = A\sin(2\pi ft)$ 。本文中,将加入乘性噪声的单稳系统等效为双稳系统来研究,并采用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)算进行求解,具体解法参考文献[8-12]。

### 1.2 系统信噪比增益

一个系统对信号增强和改善作用的重要衡量指标是信噪比增益,即系统输出端信噪比与输入端信噪比之比。在该指标 $>1$ 的情况下,才说明系统具有改善信噪比的作用<sup>[13-14]</sup>。假设输入信号为频率为 $f$ 的周期正弦信号,信噪比增益(SNIR)定义如下:

$$SNIR = \frac{SP(f)_{out}/NP_{out}}{SP(f)_{in}/NP_{in}} \quad (2)$$

式中:  $SP(f)_{in}$  和  $SP(f)_{out}$  分别表示共振前后有用信号的功率;  $NP_{in}$  和  $NP_{out}$  分别表示共振前后系统噪声的平均功率, 且有:

$$NP_{in} = P - SP(f)_{in};$$
$$NP_{out} = P - SP(f)_{in}。$$

(3)

式(3)中,  $P$  表示系统的总功率。

2 无时滞项时非对称单稳系统的随机共振现象

当系统无时滞项时, Langevin 方程变为:

$$dx/dt = -ax^3(t) + r + Dx\varepsilon_{\alpha}(t) + \eta_{\alpha}(t) + F(t)$$

(4)

其等效势函数为

$$V(x) = (a/4)x^4 - (D/2)\varepsilon_{\alpha}(t)x^2 - rx$$

(5)

称  $r=0$  时的势垒高度为相对势垒高度  $\Delta U$ , 则  $\Delta U = (D\varepsilon_{\alpha}(t))^2/4a$ 。由图 1 可看出, 势函数呈非对称, 当  $r$  符号相反, 绝对值相同时, 势函数呈现幅度相同的左偏和右偏。由此可以推测, 当  $r$  为绝对值相同的 2 个数时对系统的影响是一样的。

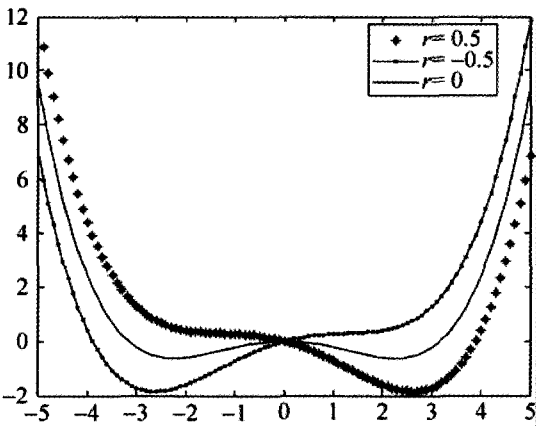
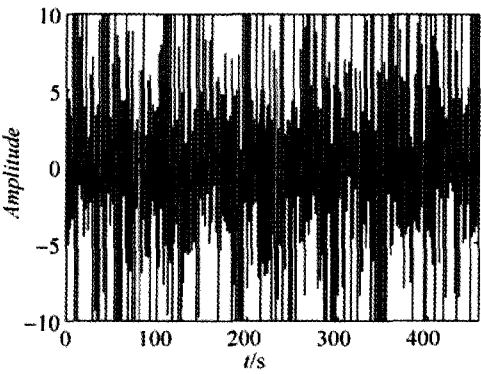
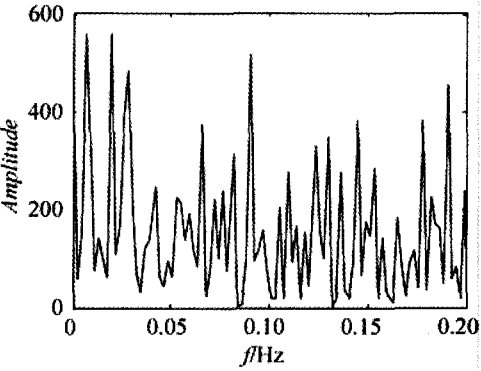


图 1 势函数曲线

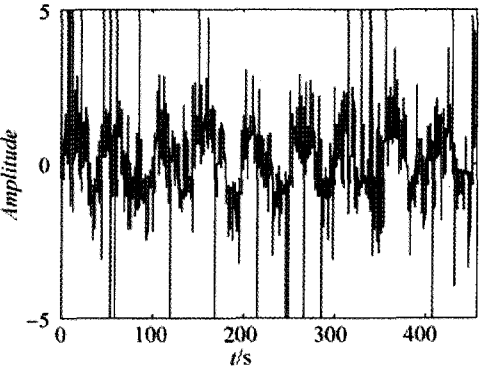
在研究随机共振现象时, 仿真中所选取的淹没在  $\alpha$  稳定噪声中的信号  $F(t) = 0.8\sin(0.04\pi t)$ , 即信号频率  $f$  为 0.02 Hz。选取采样频率  $f_s$  为 9 Hz, 乘性噪声放大系数  $D$  为 0.05, 加性噪声放大系数  $Q$  为 0.5, 非对称参数  $r$  为 0.1, 系统参数  $a$  为 0.6, 仿真结果如图 2 所示。



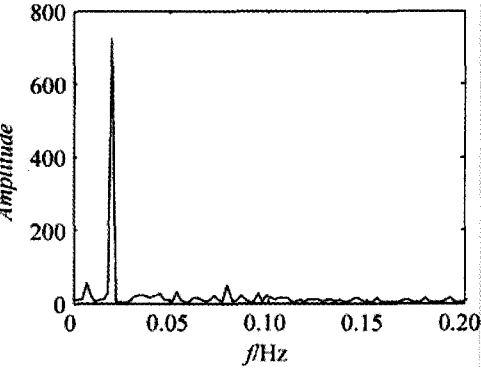
(a) 系统输入时域图



(b) 系统输入功率谱图



(c) 系统输出时域图



(d) 系统输出功率谱图

图 2 单个低频微弱信号的检测结果

从图 2(a)和图 2(b)中可以看出,有用信号完全被噪声淹没,无论从时域图还是频域图上均得不到有用信号的相关信息。经过随机共振后,由图 2(c)即系统输出时域图,可以看出经过随机共振后,信号的幅值明显增大,同时周期性也增强。从图 2(d)系统输出功率谱图可以得到信号的频率,即为 0.02 Hz。由此说明在无阻滞项的情况下利用非对称单稳系统的随机共振现象可以实现信号的有效检测。

为了明确在  $\alpha$  稳定噪声作用下非对称单稳系统中  $a$ ,  $r$  和  $D$  对系统共振输出效应的关系,下面利用数值仿真方法,分别讨论不同  $\alpha$  稳定噪声下  $a$ ,  $r$  以及  $D$  与  $SNIR$  之间的关系。

## 2.1 不同特征指数 $\alpha$ 下的随机共振

令  $\alpha$  分别为 0.5, 0.8, 1.0, 1.2 和 1.5, 其余噪声分布参数分别为  $\beta=0$ ,  $\sigma=1$ ,  $\mu=0$ ,  $F(t)$  和  $f_s$  不变。取  $a=0.6$ ,  $D=0.05$  通过仿真实验得到  $SNIR$  随  $r$  的变化曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出,当  $\alpha$  取 1.5, 1.2 和 1.0 时,  $r$ - $SNIR$  曲线基本上关于  $r=0$  对称,也就是说单稳系统对称时共振效果最好;在正半轴区域,随着  $r$  的增大,信噪比增益减小。在  $\alpha$  取 0.8 和 0.5 时,  $SNIR$  分别在  $r=0.1$  和  $r=0.4$  取得最大值,而不是  $r=0$  处,这是因为  $\alpha$  值越小,噪声的脉冲性就越强,对系统的影响越大,使得系统在  $\alpha \geq 1$  和  $\alpha < 1$  时呈现出的特性略有偏差,因此一些学者研究特征指数  $\alpha$  对系统的影响时,  $\alpha$  值仅取为 1~2,这也足以模仿系统中的大多数噪声。

固定  $D$  不变,令  $r=0.1$ , 仿真得到  $SNIR$  随系统参数  $a$  的变化曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,当  $\alpha$  取不同值时,  $a$ - $SNIR$  曲线均是非线性的,且存在一个最优值  $a$  使得  $SNIR$  取值最大,即共振效果最好,信号检测能力最强。以  $\alpha=1$  时的曲线为例,在  $a$  由 0 增大到 0.13 的过程中,由于相对势垒高度逐渐降低,粒子越过势垒所需的能量逐渐减小,粒子更容易越过势垒,因此  $a$ - $SNIR$  呈现上升

趋势;当  $a=0.13$  时,输入信号、噪声及非线性系统三者之间达到了最佳的匹配关系,系统产生了最佳的随机共振现象,  $SNIR$  达到了最大值;之后,随着  $a$  的继续增大,势垒高度仍在不断的降低,这时双势阱又逐渐变成了单势阱,粒子也将从双势阱中的周期性跃迁逐渐变为单势阱内的小幅波动,随机共振现象随之逐渐消失,故  $SNIR$  随着  $a$  的继续增大呈逐渐下降的趋势。

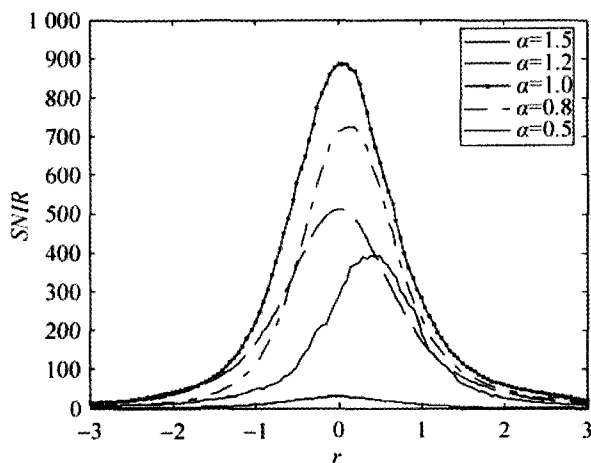


图3 不同  $\alpha$  作用下  $SNIR$  随  $r$  的变化曲线

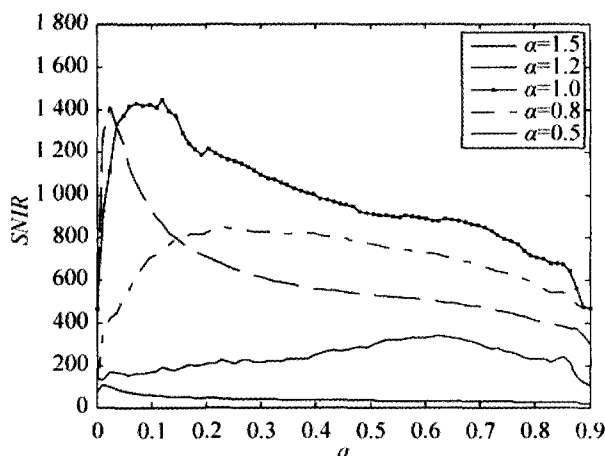


图4 不同  $\alpha$  作用下  $SNIR$  随  $a$  的变化曲线

固定  $a$  和  $r$  不变,仿真得到  $SNIR$  随  $D$  的变化曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,当  $\alpha$  取不同值时,  $SNIR$  随  $D$  的增大也都是非线性变化的,都出现了一个波峰,说明对于  $D$  而言,也存在一个最优值可使系统产生最佳的共振效应。同样以

$\alpha=1$  时的曲线为例, 在  $D$  从 0 开始逐渐增大到 0.28 的过程中, 随着乘性  $\alpha$  稳定噪声的加入, 单稳系统的势函数逐渐由单势阱变成了双势阱, 粒子也将由单势阱内的小幅波动逐渐变为双势阱中的周期性跃迁, 随机共振现象随之逐渐产生, 故  $SNIR$  随着  $D$  的增大呈逐渐上升的趋势; 当  $D=0.28$  时, 输入信号、噪声及非线性系统三者之间达到了最佳的匹配关系, 系统产生了最佳的共振效应,  $SNIR$  也达到了最大值, 此时噪声的能量被非线性系统最大化地转化为信号的能量; 当  $D$  从 0.28 开始继续增大时, 势垒高度在不断的增加, 输入信号和噪声所提供的能量不足以使粒子在两个势阱间周期性的跃迁, 共振现象随之逐渐消失, 故  $SNIR$  随着  $D$  的继续增大呈逐渐下降的趋势。

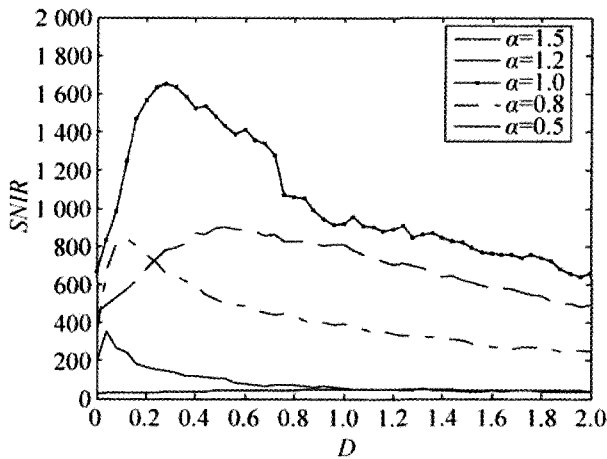


图 5 不同  $\alpha$  作用下  $SNIR$  随  $D$  的变化曲线

另外, 从图 4 和图 5 可以还得到一个共同的规律: 随着  $\alpha$  的增大,  $a$ - $SNIR$  曲线峰值位置左移,  $D$ - $SNIR$  曲线峰值位置右移。且当  $\alpha \geq 1$  时, 随着  $\alpha$  的增大,  $SNIR$  的峰值持续减小, 随机共振效应变弱; 当  $\alpha < 1$  时, 随着  $\alpha$  的减小,  $SNIR$  的峰值持续减小, 随机共振效应变弱。

## 2.2 不同对称参数 $\beta$ 下的随机共振

令  $\beta$  分别为 -1、0 和 1, 其余噪声分布参数分别为  $\alpha=1$ ,  $\sigma=1$ ,  $\mu=0$ ,  $F(t)$  和  $f_s$  不变。令  $a=0.6$ ,  $D=0.05$ , 通过仿真实验得到  $SNIR$  随  $r$

的变化曲线如图 6 所示; 固定  $D$  不变, 令  $r=0.1$ , 仿真得到  $SNIR$  随  $a$  的变化曲线如图 7 所示; 固定  $a$  和  $r$  不变, 仿真得到  $SNIR$  随  $D$  的变化曲线如图 8 所示。从图 6 可以看出, 在  $r=0$  附近,  $SNIR$  取得最大值, 说明系统对称时随机共振效果最好。从图 7~8 可以看出, 当  $\beta$  不同时,  $SNIR$  随  $a$  或  $D$  均是非线性变化的, 且存在一个最优值  $a$  或  $D$  使  $SNIR$  取得最大值, 即共振效果最好; 当  $\beta=0$  时的  $SNIR$  要高于  $\beta \neq 0$  时的  $SNIR$ , 即  $\alpha$  稳定噪声呈对称分布时单稳系统的共振输出效应要好于非对称分布时的情形。

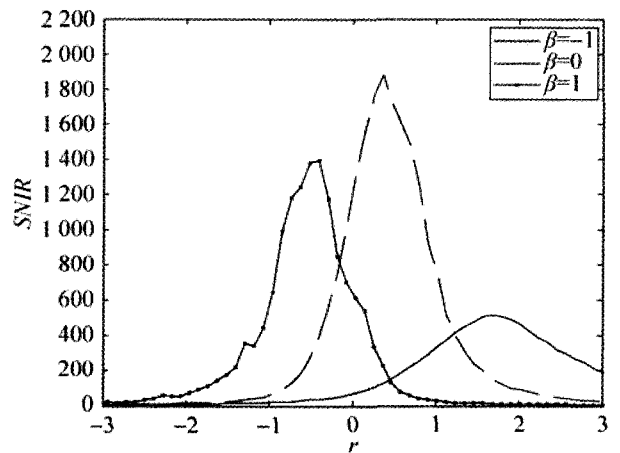


图 6 不同  $\beta$  作用下  $SNIR$  随  $r$  的变化曲线

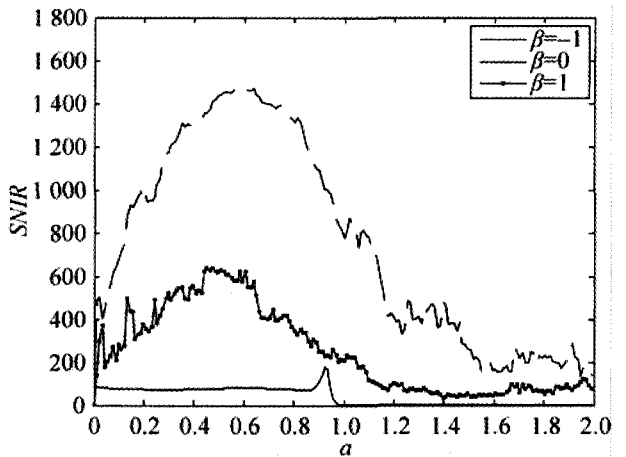


图 7 不同  $\beta$  作用下  $SNIR$  随系统参数  $a$  的变化曲线

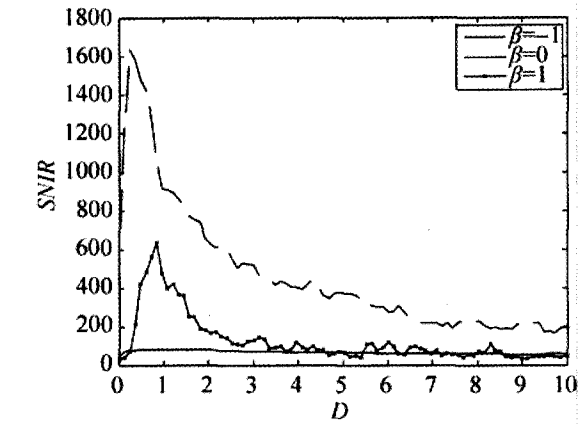


图 8 不同  $\beta$  作用下  $SNIR$  随  $D$  的变化曲线

### 3 时滞非对称单稳系统的随机共振现象

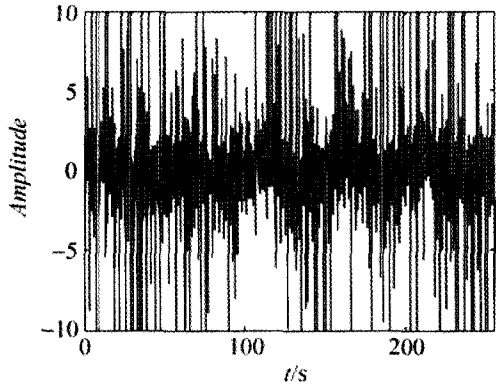
时滞非对称单稳系统可以用方程(1)来描述, 令系统参数  $a=0.1$ ,  $\tau=4/9$ , 其余参数均不变, 仿真得到时滞非对称单稳系统的随机共振现象如

图 9 所示。从图 9 中可知, 时滞非对称单稳系统中也存在随机共振现象, 经过随机共振后可以检测出信号的频率。

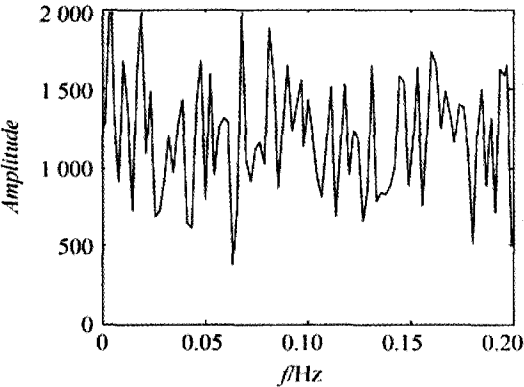
接下来主要讨论不同  $\alpha$  稳定噪声下  $r$ ,  $a$  和  $D$  对共振输出效应的作用规律以及相同噪声环境和不同滞量  $\tau$  下  $a$  和  $D$  对系统信噪比增益的影响。仿真中淹没在  $\alpha$  稳定噪声中的信号和采样频率以及加性噪声放大系数均不变。

#### 3.1 不同特征指数 $\alpha$ 下的数值仿真

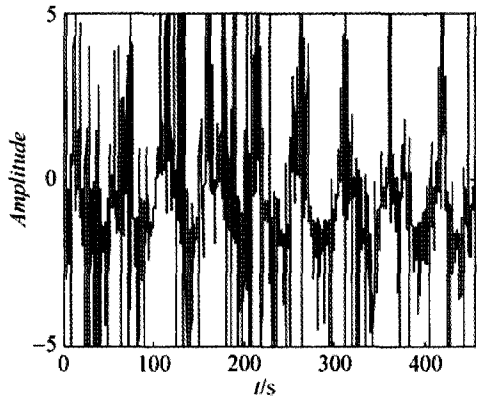
研究不同  $\alpha$  下  $SNIR$  与各个参数之间的作用规律。令  $\tau=4/9$ ,  $D=0.05$ ,  $a=0.1$ , 通过仿真实验得到  $SNIR$  随  $r$  的变化曲线如图 10 所示;  $\tau$  和  $D$  不变, 令  $r=0.1$ , 仿真得到  $SNIR$  随  $a$  的变化曲线如图 11 所示;  $\tau$  不变, 令  $a=0.1$ ,  $r=0.1$ , 仿真得到  $SNIR$  随  $D$  的变化曲线如图 12 所示。



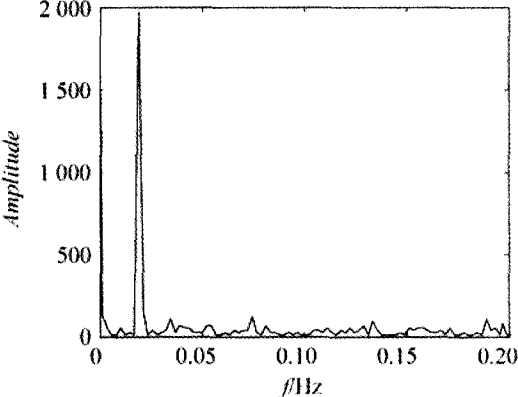
(a) 系统输入时域图



(b) 系统输入功率谱图



(c) 系统输出时域图



(d) 系统输出功率谱图

图 9 单个低频微弱信号的检测结果

从图 10~12 可以看出,在不同的  $\alpha$  稳定噪声作用下,当  $\tau$  一定时,时滞非对称单稳系统中的  $r$ -SNIR,  $a$ -SNIR 和  $D$ -SNIR 曲线规律与无时滞非对称单稳系统中的曲线规律类似,这里不再赘述。同时,通过对比图 3 和图 10、图 4 和图 11 以及图 5 和图 12 可以发现,时滞系统中相应的曲线的峰值低于无时滞的系统中相应的曲线的峰值,可见时滞非对称单稳系统中的随机共振效应与无时滞非对称单稳系统中的随机共振效应是不一样的。

3.2 不同对称参数  $\beta$  下的随机共振

令  $\tau=4/9$ ,  $D=0.5$ ,  $a=0.1$ , 通过仿真实验得到 SNIR 随  $r$  的变化曲线如图 13 所示;  $\tau$  和  $D$  不变,令  $r=0.1$ , 仿真得到 SNIR 随  $a$  的变化曲线如图 14 所示;  $\tau$  不变,令  $a=0.1$ ,  $r=0.1$ , 仿真得到 SNIR 随  $D$  的变化曲线如图 15 所示。通过对比图 6 和图 13 可以看出,由于时滞项的存在,曲线峰值右移,再次证明了时滞对系统的影响。图 14 横坐标  $a=0.9$  附近的曲线再次出现了一个峰值,这是由于时滞项的影响,信号和噪声实现了较好的匹配,达到了较好的共振效应。图 15 与图 8 曲线规律类似,这里就不再赘述。

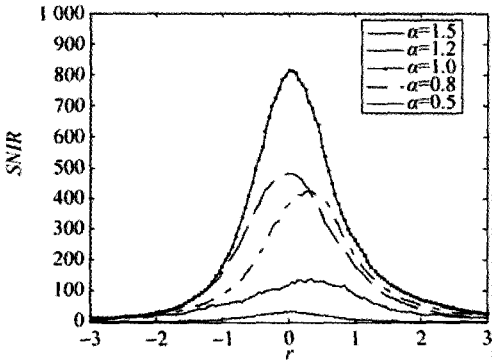


图 10 不同  $\alpha$  作用下 SNIR 随  $r$  的变化曲线

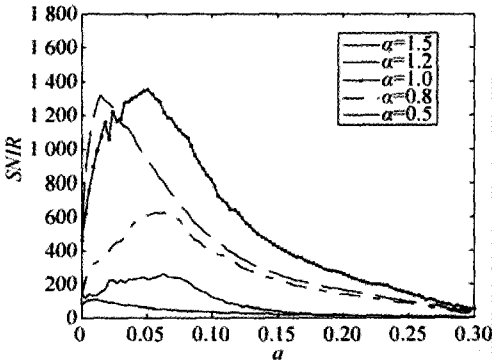


图 11 不同  $\alpha$  作用下 SNIR 随系统参数  $a$  的变化曲线

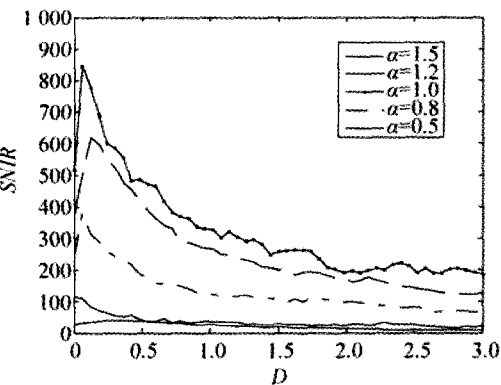


图 12 不同  $\alpha$  作用下 SNIR 随  $D$  的变化曲线

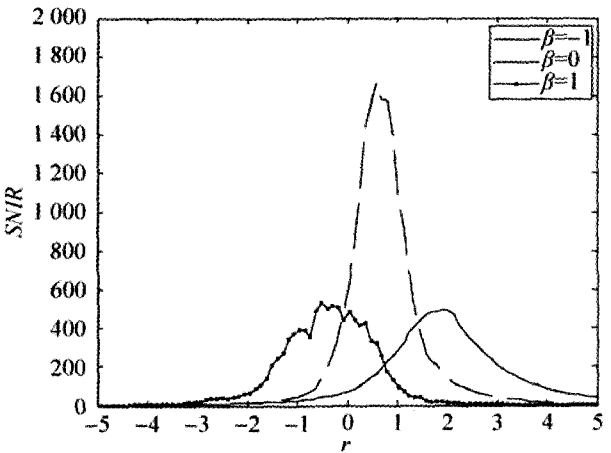


图 13 不同  $\beta$  作用下 SNIR 随  $r$  的变化曲线

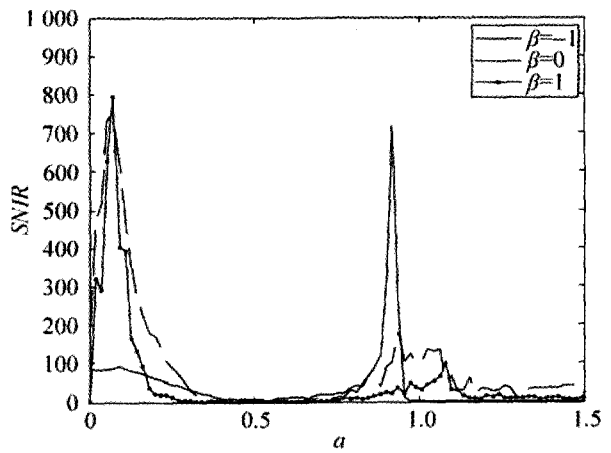


图 14 不同  $\beta$  作用下 SNIR 随系统参数  $a$  的变化曲线

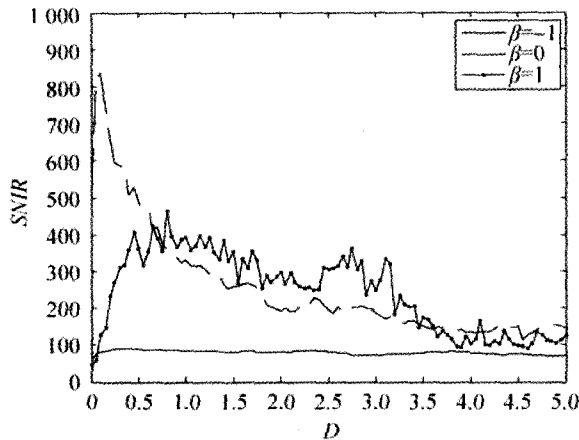


图 15 不同  $\beta$  作用下 SNIR 随  $D$  的变化曲线

### 3.3 不同时滞量 $\tau$ 下的数值仿真

令  $\alpha=1$ , 噪声放大系数  $D$  和非对称系数  $r$  不变, 仿真得到不同时滞量  $\tau$  下 SNIR 随系统参数  $a$  和乘性噪声放大系数  $D$  的变化曲线, 分别如图 16 和图 17 所示。

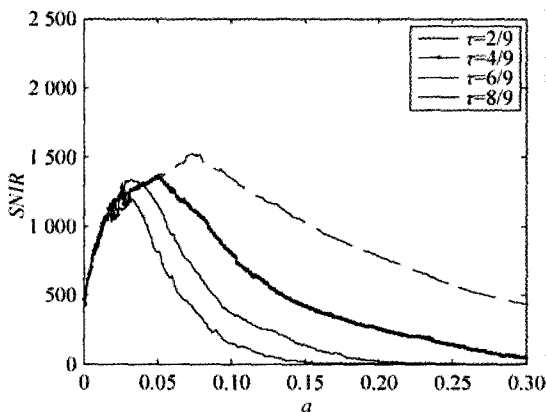


图 16 不同  $\tau$  值作用下 SNIR 随系统参数  $a$  的变化曲线

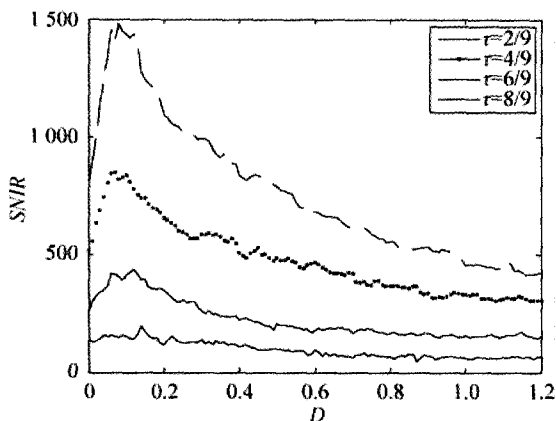


图 17 不同  $\tau$  值作用下 SNIR 随  $D$  的变化曲线

通过对图 16 分析可知, 随着时滞量  $\tau$  的增大,  $a$ -SNIR 曲线的峰值减小, 峰值的位置随着  $\tau$  的增大而偏向  $a$  减小的方向, 且使系统产生随机共振的系统参数  $a$  的范围随着  $\tau$  的增大而减小。从图 17 可以看出, 随着时滞量  $\tau$  的增大,  $D$ -SNIR 曲线的峰值减小, 峰值的位置随着  $\tau$  的增大而偏向  $D$  减小的方向, 且使系统产生随机共振的系统参数  $D$  的范围随着  $\tau$  的增大而减小。由此可见, 在实际的时滞系统中, 通过减小时滞量可以增大信噪比增益, 从而增强信号的检测能力。

## 4 结论

本文将  $\alpha$  稳定噪声与时滞非对称单稳系统相结合, 研究了乘性和加性  $\alpha$  稳定噪声共同作用下的单稳随机共振现象。探究了  $\alpha$  稳定噪声分布参数  $\alpha$ , 对称参数  $\beta$ 、单稳系统参数  $a$ , 非对称参数  $r$  和时滞量  $\tau$  以及乘性  $\alpha$  稳定噪声放大系数  $D$  对系统信噪比增益 SNIR 的影响, 得出如下结论: (1) 通过调节  $a$  或  $D$  可以产生随机共振, 实现低频微弱信号的检测; (2) 当  $\alpha \geq 1$  时, 随着  $\alpha$  的增大, SNIR 减小, 当  $\alpha < 1$  时, 随着  $\alpha$  的减小, SNIR 减小; (3)  $\beta = 0$  时的 SNIR 要高于  $\beta \neq 0$  时的 SNIR, 即  $\alpha$  稳定噪声呈对称分布时单稳系统的共振输出效应要好于非对称分布时; (4) 通过减小  $r$  或  $\tau$  均可以增大 SNIR, 更好的实现非对称单稳系统中微弱信号的检测。上述结论为利用单稳系统检测微弱信号时参数的自适应选择奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 董小娟. 基于周期混合信号和时滞项的非对称双稳系统的随机共振[J]. 高校应用数学学报, 2010, 25(2): 127-133.
- [2] 董小娟. 含关联噪声与时滞项的非对称双稳系统的随机共振[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5618-5622.
- [3] 马聪变, 郭建霞. 时滞单稳系统的平均首次穿越时间[J]. 新乡学院学报, 2012, 29(1): 18-26.
- [4] 张晓燕, 徐伟, 周丙常. 周期矩形信号作用下时滞非对称单稳系统的随机共振[J]. 物理学报, 2012, 61(3): 030501-1~030501-5.

(下转第 153 页)



## 参考文献:

- [1] 萧德云. 系统辨识理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 56-68.
- [2] 徐小平, 钱富才, 刘丁, 等. 基于 PSO 算法的系统辨识方法 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3525-3528. (Xu Xiaoping, Qian Fucai, Liu Ding, et al. Method of System Identification Based on PSO Algorithm [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(13): 3525-3528.)
- [3] 钱富才, 黄娇茹, 秦新强. 基于鲁棒优化的系统辨识算法研究 [J]. 自动化学报, 2014, 40(5): 988-993.
- [4] 马海芳, 朱凌云, 王富强. 基于 Wiener 模型的 pH 中和过程非线性 DMC 控制 [J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(9): 33-36.
- [5] 刘长良, 任燕燕, 王东风, 等. 热工系统 Hammerstein-Wiener 模型辨识 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 394-397.
- [6] 胡德文, 王正志. 非线性系统 Wiener 模型辨识 [J]. 自动化学报, 1991, 17(2): 151-159.
- [7] 罗秋斌, 李秀英, 韩志刚, 等. 一种非线性系统多项式逼近的建模方法 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(4): 829-832. (Luo Qiubin, Li Xiuying, Han Zhigang, et al. Polynomial Approach for Nonlinear Modeling [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(4): 829-832.)
- [8] 吴德会. 非线性动态系统的 Wiener 神经网络辨识法 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(11): 1192-1196.
- [9] Hatanaka T, Uosaki K, Koga M. Evolutionary Computation Approach to Wiener Model Identification [C]// Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary. Piscataway, USA: IEEE Press, 2002: 914-919.
- [10] 张燕, 李少远, 王笑波, 等. 基于粒子群优化的 Wiener 模型辨识与实例研究 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(6): 992-994.
- [11] Storn R, Price K. Differential Evolution: a Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces [J]. Global Optimization (S1354-1013), 1997, 11(4): 341-359.
- [12] Wang L, Li L P. Fixed-Structure  $H^\infty$  Controller Synthesis Based on Differential Evolution with Level Comparison [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation (S1089-778X), 2011, 15(1): 120-129.
- [13] Onwubolu G, Davendra D. Scheduling Flow Shops Using Differential Evolution Algorithm [J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2006, 171(2): 674-692.
- [14] 王凌, 钱斌. 混合差分进化与调度算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 112-121.
- [15] 王永皎. 改进自适应差分进化算法求解大规模整数任务分配 [J]. 计算机应用, 2012, 32(8): 2165-2167.
- [16] Chang W D. Parameter Identification of Rossler's Chaotic System by an Evolutionary Algorithm [J]. Science (S0036-8075), 2006, 29(5): 1047-1053.

(上接第 146 页)

- [5] Zhou Y R. Stochastic resonance in a time-delayed monostable system with correlated multiplicative and additive white noise [J]. Chin. Phys. B, 2011, 20(1): 010501-1-010501-6.
- [6] 周涛, 王嘉.  $\alpha$  稳定分布综述 [J]. 电声技术, 2011, 35(3): 57-60.
- [7] 李娟娟, 徐勇, 冯晶. Duffing 系统中 Lévy 噪声诱导的随机共振与相转移 [J]. 动力学与控制学报, 2012, 10(3): 278-5.
- [8] Zeng L Z, Xu B H. Effects of asymmetric Lévy noise in parameter-induced aperiodic stochastic resonance [J]. Physica A (S0378-4371), 2010, 389(22): 5128-5136.
- [9] 张广丽, 吕希路, 康艳梅.  $\alpha$  稳定噪声环境下过阻尼系统中的参数诱导随机共振现象 [J]. 物理学报, 2012, 61(4): 040501-1-040501-8.
- [10] 张文英, 王自力, 张卫东. 利用随机共振实现 Lévy 噪声中的信号检测 [J]. 控制工程, 2009, 16(5): 638-640.
- [11] 焦尚彬, 何童. 基于双稳随机共振的多频弱信号检测 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 50(5): 221-226.
- [12] 杨定新, 胡莒庆. 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(5): 91-94.
- [13] 焦尚彬, 任超, 黄伟超, 等. 稳定噪声环境下多频微弱信号检测的参数诱导随机共振现象 [J]. 物理学报, 2013, 62(21): 210501-1-210501-10.
- [14] 焦尚彬, 任超, 李鹏华, 等. 乘性和加性  $\alpha$  稳定噪声环境下的过阻尼单稳随机共振现象 [J]. 物理学报, 2014, 63(7): 070501-1-070501-9.