

α 稳定噪声驱动的非对称双稳随机共振现象

焦尚彬 杨蓉 张青 谢国

Stochastic resonance of asymmetric bistable system with α stable noise

Jiao Shang-Bin Yang Rong Zhang Qing Xie Guo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 020502 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.020502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲序列控制双断续导电模式 BIFRED 变换器的动力学建模与多周期行为

Dynamical modeling and multi-periodic behavior analysis on pulse train controlled DCM-DCM BIFRED converter

物理学报.2015, 64(1): 010501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.010501>

基于一阶广义忆阻器的文氏桥混沌振荡器研究

Wien-bridge chaotic oscillator based on first-order generalized memristor

物理学报.2014, 63(24): 240505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240505>

非线性磁式压电振动能量采集系统建模与分析

Modeling and analysis of piezoelectric vibration energy harvesting system using permanent magnetics

物理学报.2014, 63(24): 240504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240504>

指向 Lyapunov 指数及其在单输入单输出系统故障检测中的应用

Directional Lyapunov exponent and its application to fault detection of the single input single output system

物理学报.2014, 63(22): 220505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.220505>

电感电流伪连续模式下分数阶 Boost 变换器的非线性控制

Non-linear control for the fractional boost converter in pseudo continuous conduction mode

物理学报.2014, 63(20): 200502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.200502>

α 稳定噪声驱动的非对称双稳随机共振现象*焦尚彬[†] 杨蓉 张青 谢国

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048)

(2014年6月12日收到; 2014年9月1日收到修改稿)

以微弱周期信号激励的非对称双稳系统为模型, 以信噪比增益为指标, 首先针对加性和乘性 α 稳定噪声共同作用的随机共振现象展开了研究, 然后针对单独加性 α 稳定噪声激励的随机共振现象进行了研究, 探究了 α 稳定噪声特征指数 α 和对称参数 β 分别取不同值时, 系统结构参数 a, b , 刻画双稳系统非对称性的偏度 r 以及 α 稳定噪声强度放大系数 Q 或 D 对非对称双稳系统共振输出的作用规律. 研究表明, 无论在加性和乘性 α 稳定噪声共同作用下还是在单独加性 α 稳定噪声作用下, 通过调节 a 和 b 或者 r 均可诱导随机共振, 实现微弱信号的检测, 且有多个参数区间与之对应, 这些区间不随 α 或 β 的变化而变化; 在研究噪声诱导的随机共振现象时发现, 调节噪声强度放大系数也可使系统产生随机共振现象, 且达到共振状态时 D 的区间也不随 α 或 β 的变化而变化. 这些结论为 α 稳定噪声环境下参数诱导随机共振中系统参数以及噪声诱导随机共振中噪声强度的合理选取提供了依据.

关键词: α 稳定噪声, 非对称双稳系统, 随机共振, 信噪比增益

PACS: 05.45.-a, 05.40.-a, 05.40.Ca, 05.40.Fb

DOI: 10.7498/aps.64.020502

1 引言

近年来, 随机共振(stochastic resonance, SR)现象在微弱信号检测方面受到广泛关注. 与常规抑制噪声的方法不同, 随机共振利用噪声、信号和非线性系统的协同作用, 将噪声能量转化为信号能量, 从而将被测信号检测出来^[1-4]. 通过调节噪声强度或系统参数^[5-9]均可诱导随机共振.

在利用随机共振进行微弱信号检测的研究中, 采用的经典模型是对称双稳系统, 但是系统的对称性在实际中是不能保证的, 故势阱的非对称性被引入磁通量闸门磁力计量器和超导量子干涉设备中, 用来探测微弱信号^[10]. Li^[11]研究了由白噪声驱动的双稳系统中势阱的非对称性对随机共振的影响. 周丙常和徐伟^[12]对周期矩形信号和关联的乘性色噪声及加性白噪声驱动的非对称双稳系统的随机共振现象进行了研究.

上述工作主要研究的是在高斯噪声背景下的随机共振现象, 高斯噪声只是实际中随机噪声的理想化, 只能在均值小范围的附近起伏, 不能模拟大幅度起伏的噪声. 然而, 在实际应用中存在大量具有显著的尖峰脉冲特性和拖尾特性的非高斯噪声^[13], 而 α 稳定分布能够有效地模拟这种尖峰脉冲特性以及严重的拖尾特性, 更能准确地反映客观实际存在的随机扰动. 近年来 α 稳定噪声背景下的随机共振现象逐渐吸引了学者的研究. 张文英等^[1]利用对称双稳模型研究了 α 稳定噪声背景下的信号检测. 张静静和靳艳飞^[10]研究了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. 文献^[14, 15]研究了 α 稳定噪声背景下对称系统的参数诱导随机共振. 迄今为止, 对于 α 稳定噪声背景下的非对称双稳系统的参数诱导随机共振问题的研究尚未见报道. 为了能够正确地选择参数, 尽快实现随机共振, 并且从物理概念上

* 国家自然科学基金(批准号: 61304204)、陕西省自然科学基金(批准号: 2014JM8315)和陕西省教育厅自然科学基金专项基金(批准号: 2013JK1050)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jsbzq@163.com

来理解这些参数是如何对随机共振产生影响的^[16], 本文在文献^[14]的基础上研究 α 稳定噪声激励下非对称双稳系统的参数诱导随机共振, 对于噪声诱导随机共振现象也进行了一些探索. 分别研究了不同 α 稳定噪声特征指数 $\alpha(0 < \alpha \leq 2)$, 对称参数 $\beta(-1 \leq \beta \leq 1)$ 下系统参数 a, b , 偏度 r 和噪声强度放大系数 Q 或 D 对系统共振输出结果的影响, 为实际工程中的自适应随机共振参数范围的选择奠定了基础.

2 基于随机共振的微弱信号检测模型及数值解法

能否利用随机共振现象检测到微弱周期信号, 从物理机理上来说就是粒子能否发生周期性的跃迁, 这取决于系统的势垒高度以及输入信号和噪声的能量. 势垒高度越高, 就要求输入信号和噪声具有较多的能量才能发生SR; 反之, 发生SR要求的输入信号和噪声能量就越小^[14]. 但是在不同种类噪声作用下, 影响势垒高度的因素不同.

非线性朗之万(Langevin)方程如(1)式所示,

$$dx/dt = f(x) + \eta(t), \quad (1)$$

(1)式中 $f(x)$ 为外力场, $\eta(t)$ 为随机力(加性噪声), 且与随机变量 x 无关.

当噪声强度随 x 变化时, 朗之万方程变为

$$dx/dt = f(x) + g(x)\eta(t), \quad (2)$$

$g(x)\eta(t)$ 称为乘性噪声.

加性和乘性 α 稳定噪声共同驱动的非对称双稳SR系统的朗之万方程为^[17,18]

$$\begin{aligned} dx/dt &= -U'(x) + s(t) + Q\eta(t) + xD\xi(t) \\ |x(t)| &< 10, \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式中, $s(t)$ 为输入信号,

$$s(t) = A \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

其中, A 为输入信号幅值, f 为输入信号频率. (3)式中的 $x(t)$ 可看成一个在受信号调制的双稳态势阱中运动的过阻尼粒子轨迹; $Q\eta(t)$ 代表加性 α 稳定噪声, $xD\xi(t)$ 代表乘性 α 稳定噪声; Q 和 D 分别代表加性和乘性 α 稳定噪声的强度放大系数, 通过改变 Q 和 D 可以间接地改变加性和乘性 α 稳定噪声的强度. $U(x)$ 为非线性双稳态势函数,

$U(x) = (-a/2)x^2 + (b/4)x^4 + rx$, a, b 为系统结构参数, 且 $a > 0, b > 0$; r 代表势函数的偏度, 刻画了双稳系统的非对称性, 当 $r = 0$ 时, 势函数关于纵轴对称, 此系统为对称双稳系统. 加性和乘性 α 稳定噪声共同作用下的对称双稳系统势函数可以等价为

$$U_1(x) = (-a/2)x^2 + (b/4)x^4 - (D/2)x^2. \quad (5)$$

令 $U_1(x)' = 0$ 可以得到 $x_{\pm} = \pm\sqrt{(D+a)/b}$ 和 $x_0 = 0$, 这三个点分别是等价势函数的两个稳定点和一个不稳定点. 将这三个点分别代入(5)式, 即可得到势垒高度:

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_1(0) - U_1(\sqrt{(D+a)/b}) \\ &= (a+D)^2/4b. \end{aligned} \quad (6)$$

由(6)式可以看到, 势垒高度是由 a, b 和 D 共同决定的. 图1是固定 $a = 1, b = 1$ 时, $U_1(x)$ 随着 D 变化的曲线. 当 $r \neq 0$ 时, 势函数将发生倾斜, 即为非对称双稳系统, 势垒高度不仅仅由 a, b 和 D 决定, 还受到 r 的影响. 所以研究势垒高度与随机共振效应的关系就转化为研究 a, b, D 以及 r 与随机共振效应的关系.

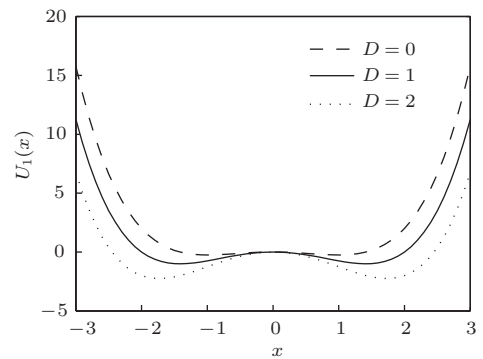


图1 $a = 1, b = 1$ 时等效势函数 $U_1(x)$ 随着 D 的变化

单独加性 α 稳定噪声驱动的非对称双稳SR系统可用如下的朗之万方程进行描述:

$$dx/dt = -U'(x) + s(t) + \eta(t), \quad (7)$$

式中, $\eta(t)$ 代表加性 α 稳定噪声, 其余参数含义不变. 由于这种情况下 $D = 0$, 故此势垒高度是由 a, b 和 r 共同决定的. 这种情况下就要研究 a, b, Q 以及 r 与随机共振效应的关系.

本文采用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)算法对(3), (5)式进行求解^[1,9,14,15].

3 α 稳定分布

随机变量 X 服从 α 分布, α 稳定分布的特征函数表达式 [9,19-23] 如下:

$$\phi(t) = \begin{cases} \exp \left[-\sigma |t| \left(1 + i\beta \frac{2}{\pi} \text{sign}(t) \log |t| \right) + i\mu t \right], & \alpha = 1, \\ \exp \left[-\sigma^\alpha |t|^\alpha \left(1 - i\beta \text{sign}(t) \times \tan \left(\frac{\pi\alpha}{2} \right) \right) + i\mu t \right], & \alpha \neq 1. \end{cases} \quad (8)$$

在上式中, 特征指数 $\alpha \in (0, 2]$, 决定了分布的脉冲特性和拖尾特性, α 越小, 稳定分布的脉冲特性越强、拖尾特性越弱; 而 α 越大, 则脉冲特性越弱、拖尾特性越强. 对称参数 $\beta \in [-1, 1]$, 用于确定分布的对称性, 当 $\beta = 0$ 时, 稳定分布呈对称分布; 当 $\beta < 0$ 时, 分布偏右; 当 $\beta > 0$ 时, 分布偏左. 尺度参数 $\sigma \in [0, +\infty)$, 又称为分散系数, 是关于样本相对于均值的分散程度的度量. 位置参数 $\mu \in (-\infty, +\infty)$, 表明了分布的中心. 本文主要研究参数 α 和 β 分别取不同值时的影响.

α 稳定噪声的产生方法——Janicki-Weron (JW) 算法在文献 [9] 和 [23] 中已有解释, 此处不再赘述.

4 周期信号驱动的随机共振系统评价指标

在衡量随机共振系统对输入信号的作用时, 主要采用信噪比 (SNR) 和信噪比增益 (SNRI) 为主要指标 [17,24,25], 由于 SNRI 比 SNR 更直观地反映了 SR 系统对输入信号的增强和改善作用, 因此本文采用 SNRI 作为随机共振系统性能的衡量指标. 只有当 SNRI 大于 1 时, 才能说明随机共振系统对信号具有明显的增强和改善作用 [26,27], 并且信噪比增益越大, 检测效果越好. SNRI 被定义为输出信噪比与输入信噪比的比值 [17,27], 即

$$\text{SNRI} = \frac{\text{SNR}_{\text{out}}}{\text{SNR}_{\text{in}}}. \quad (9)$$

其中 SNR 在信号检测与处理以及通信等领域中常如下定义:

$$\text{SNR} = \frac{S(f_0)}{P - S(f_0)}, \quad (10)$$

式中 $S(f_0)$ 为频率 f_0 的信号功率; P 为系统总功率, 包括信号功率和噪声功率, 减去 $S(f_0)$ 后剩下的即为噪声功率.

所以,

$$\text{SNR}_{\text{in}} = \frac{S_{\text{in}}(f_0)}{P - S_{\text{in}}(f_0)}$$

和

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \frac{S_{\text{out}}(f_0)}{P - S_{\text{out}}(f_0)}$$

代入 (5) 式即得 SNRI.

说明: 后文图中所给出的平均信噪比增益 (M-SNR gain) 随系统参数和噪声强度放大系数的变化曲线是取 20 次实验的信噪比增益 SNRI 平均值绘制而成的.

5 微弱周期信号在 α 稳定噪声下非对称双稳系统中的随机共振现象

5.1 加性和乘性 α 稳定噪声共同作用下的非对称双稳系统中的随机共振现象

原始周期信号如 (4) 式, 其中 $A = 0.8$, $f = 0.05$, 在本节中加性和乘性 α 稳定噪声分布特征参数是一致的, 分别为 $\alpha = 1$, $\beta = 0$, $\sigma = 1$, $\mu = 0$, $Q = 0.17$, $D = 0.03$; 选取 $r = 0.2$, 取采样频率 $f_s = 8.343$, 采样点数 $N = 4096$. 下面的实验都取同样的采样点数. 当系统参数为 $a = 44.001$, $b = 0.04$, 仿真实验结果如图 2 所示.

图 2(a) 是输入信号和 α 稳定噪声混合的时域图, 信号完全淹没在噪声中, 图 2(b) 是对此混合信号的时域进行傅里叶变换得到的频域图, 无法得到输入信号的有效信息. 将该混合信号送入非对称双稳系统, 然后调节系统参数, 为了得到输出信号的频率, 对系统输出信号进行快速傅里叶变换 (FFT) 得到功率谱如图 2(c) 所示, 当 $a = 44.001$, $b = 0.04$ 时, 可以看到, 输出功率谱在频率为 0.05 Hz 处达到最大值, 它正好是输入微弱周期信号的频率. 这是因为系统参数的改变使势垒高度改变, 粒子有足够的能量越过势垒, 故出现了周期信号占主导的跃迁. 说明在此参数下, 非对称双稳系统达到了随

机共振状态, 发生了以噪声作为媒介引起微弱周期信号与非线性系统间的协同作用, 而且在一定量的噪声背景中非线性系统对微弱的周期信号能产生强烈的输出响应, 存在着噪声能量向信号能量转移的机理.

下面研究不同的 α 稳定噪声分布下, 即参数 α (特征指数), β (对称参数)不同时, a , b , r 以及 D 与随机共振系统共振输出效应的作用规律. 另外, 出于噪声诱导的考虑, 研究 Q 随随机共振系统输出的变化情况.

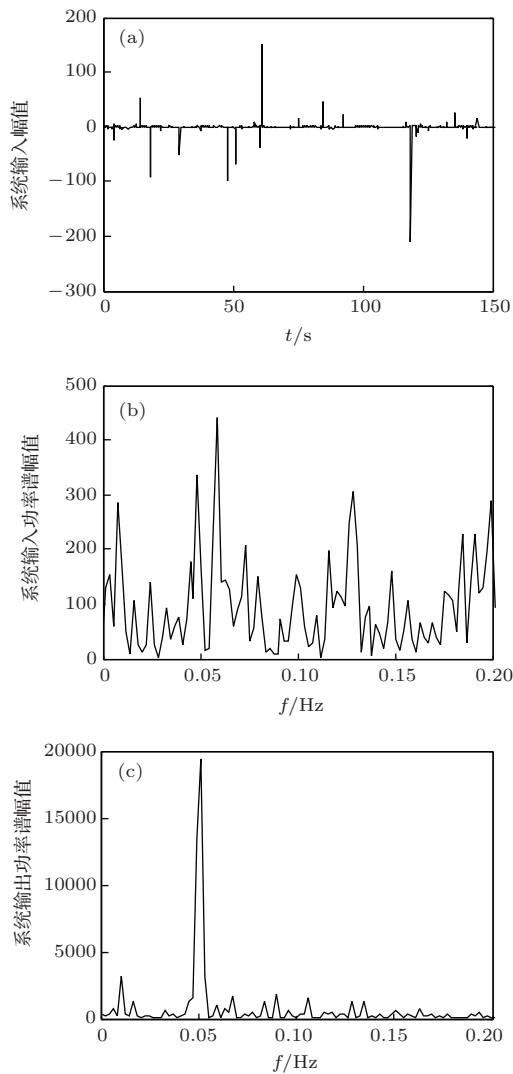


图2 (a) 系统输入时域; (b) 系统输入功率谱; (c) 系统输出功率谱

5.1.1 不同特征指数 α 下的随机共振

特征指数 α 分别为0.5, 0.8, 1, 1.2和1.5, 其余噪声分布参数分别为 $\beta = 0$, $\sigma = 1$, $\mu = 0$, 待检测信号和采样频率保持不变. 根据之前得到的系统参数, 固定 $b = 0.04$, $r = 0.2$, 进行仿真实验, 得到平

均信噪比增益(MSNR gain)随系统参数 a 的演变规律曲线如图3所示.

固定参数 $a = 44.001$, $r = 0.2$; 得到MSNR gain随 b 的变化如图4所示.

同理, 固定系统参数 $a = 44.001$, $b = 0.04$, 仿真得到MSNR gain随 r 的变化曲线如图5所示.

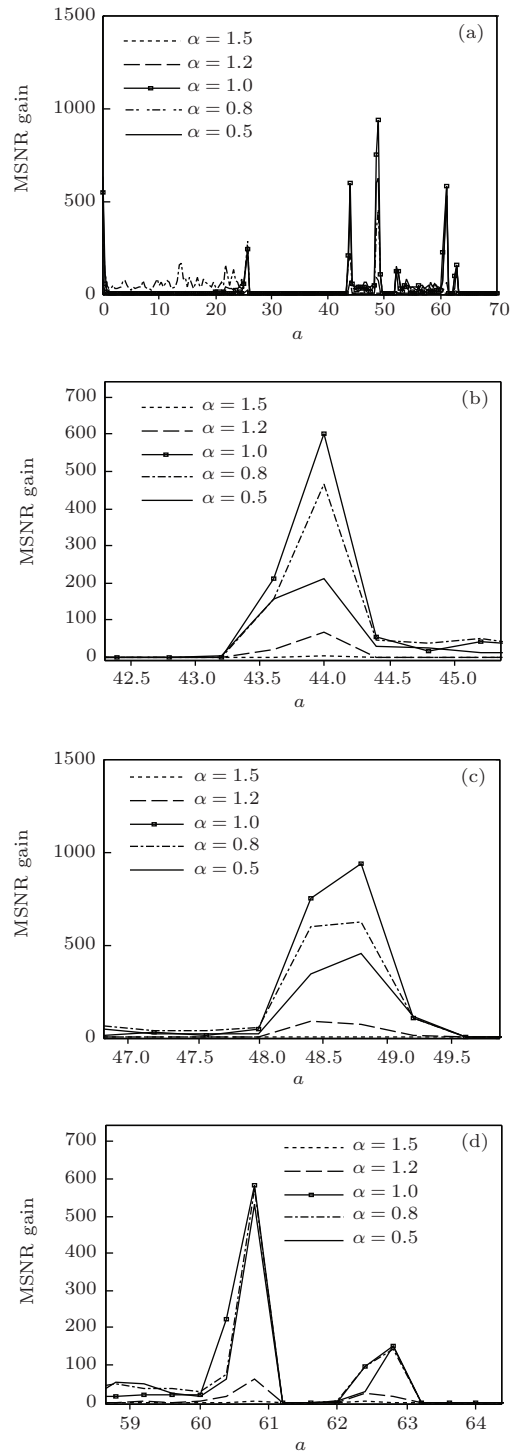


图3 (a) 不同 α 作用下 MSNR gain 随 a 的变化; (b), (c), (d) 分别表示不同 α 作用下 MSNR gain 随 a 的变化的局部放大

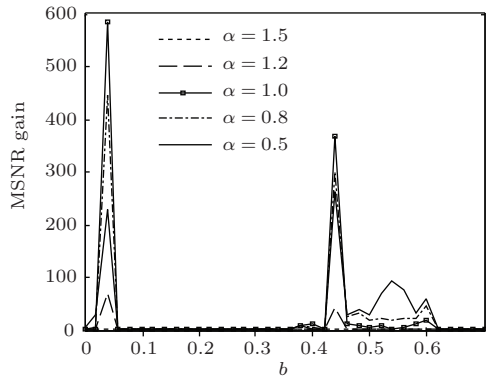


图4 不同 α 作用下 MSNR gain 随 b 的变化

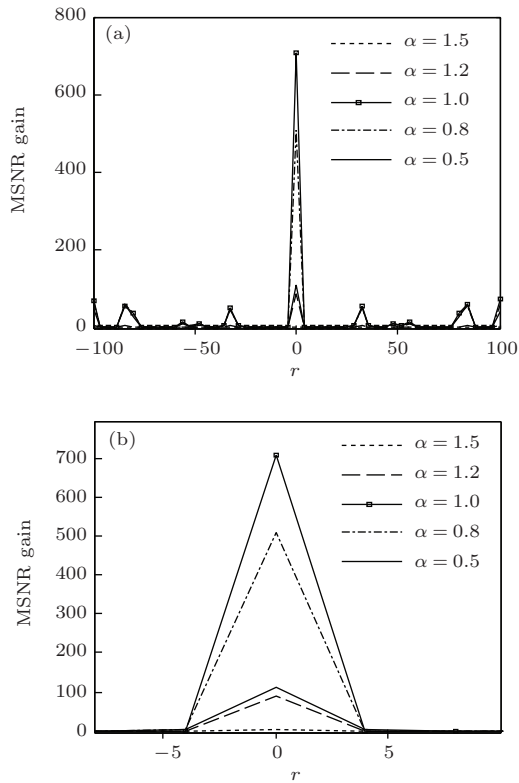


图5 (a) 不同 α 作用下 MSNR gain 随 r 的变化; (b) 不同 α 作用下 MSNR gain 随 r 变化的局部放大图

图3(a)为不同 α 作用下MSNR gain随 a 的变化曲线,可以看到MSNR gain随系统参数 a 的变化有多个区间可以实现随机共振,图3(b)—(d)为图3(a)变化曲线区间的局部放大图.以图3(b)为例,当 $a \in [43.2, 44.4]$ 时,可以看到MSNR gain呈现出先增大后减小的趋势,说明粒子在输入信号及噪声共同作用下越过了势垒,在两个势阱间跳跃,实现了随机共振.当 a 从43.2增加到44.001的过程中,输入信号、噪声及非线性系统三者逐渐达到了最佳的匹配关系,即当 $a = 44.001$ 时,MSNR gain达到了此范围的最大值,当 a 从44.001增加到

44.4的过程中,势垒高度升高,输入信号、噪声及非线性系统三者之间的最佳匹配关系逐渐消失,因此MSNR gain呈现降低的趋势.从图4中也可以看出,MSNR gain随 b 的变化也出现了多个波峰,曲线在区间 $[0.02, 0.06]$, $[0.42, 0.46]$ 呈现先增大后减小的趋势,发生了随机共振现象.图5是MSNR gain随 r 的变化曲线.图5(a)为不同 α 作用下MSNR gain随 r 的变化曲线图,同样出现了多个波峰,图5(b)是为了便于观察的局部放大图.可以看到在 $r = 0$ 时MSNR gain最大且曲线关于 $r = 0$ 对称,这就意味着此双稳系统对称时,随机共振效果最好.

对于一个确定的 a (b 或 r),同时存在多个共振效应较好的 b (r 或 a)区间与之对应.再进一步观察每个区间的放大图,发现共振效应较好的 a, b, r 区间不随特征指数 α 的变化而变化;对于同一个共振效应较好的 a (b 或 r)区间, $\alpha = 1$ 时系统的MSNR gain最大,即随机共振输出效应最好,当 $\alpha > 1$ 时,随着 α 的增大,系统的随机共振输出效应呈逐渐递减的趋势,当 $\alpha < 1$ 时,随着 α 的减小,系统的随机共振输出效应呈逐渐递减的趋势.

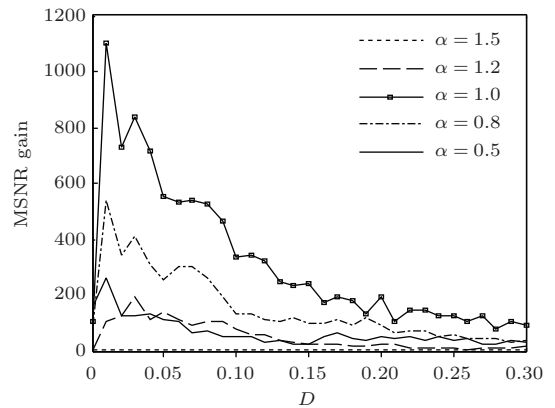


图6 不同 α 作用下 MSNR gain 随 D 的变化

图6为不同特征指数 α 时,MSNR gain随 D 的变化.可以发现,当 α 取不同值时,共振效应相对较好的 D 区间基本都集中在同一个区域,且 $\alpha = 1$ 时系统的MSNR gain最大,当 $\alpha > 1$ 时, α 越大,MSNR gain越小,当 $\alpha < 1$ 时, α 越小,MSNR gain越小.图7中可以发现随着 Q 的增大,在不同的 α 的时候,MSNR gain均有峰值出现,且呈现先增大后减小的趋势,说明存在最优值使随机共振效果较好.

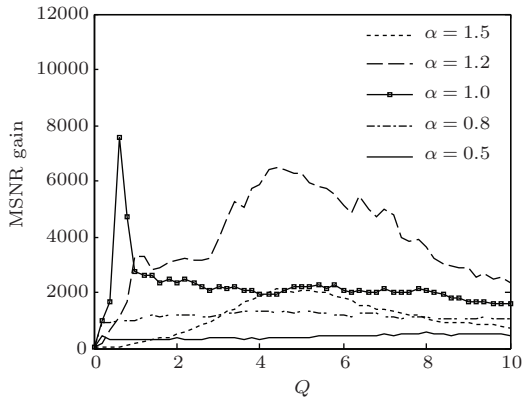


图7 不同 α 作用下 MSNR gain 随 Q 的变化

5.1.2 不同对称参数 β 下的随机共振

对称参数 β 分别为 $-1, 0$ 和 1 , 其余噪声分布参数分别为 $\alpha = 1.2, \sigma = 1, \mu = 0$, 待检测信号不变. 令 $Q = 0.88, D = 0.08$, 采样频率 f_s 为 8.343 Hz, 固定 $b = 0.06$, 仿真得到 MSNR gain 随系统参数 a 的变化曲线如图 8 所示. 固定 $a = 44.001$, 仿真得到 MSNR gain 随系统参数 b 的变化曲线如图 9 所示.

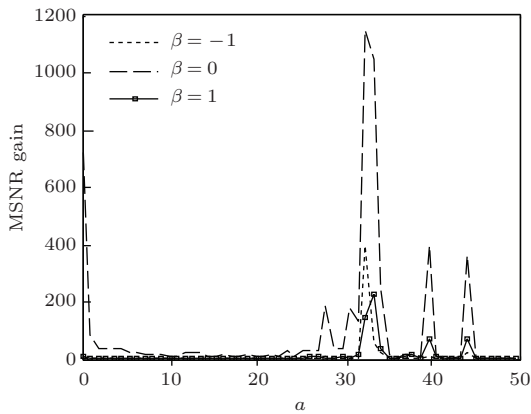


图8 不同 β 作用下 MSNR gain 随 a 的变化

图 10 为固定系统参数 $a = 44.001, b = 0.06$, 仿真得到 MSNR gain 随偏度 r 的变化曲线.

与不同 α 作用下信噪比增益随各系统参数的变化规律一样, 不同 β 作用下 MSNR gain 随各系统参数的变化也呈现多个峰值. 图 8 是不同 β 作用下 MSNR gain 随 a 变化的曲线, 可以看到有多个随机共振区间, 比如当 $a \in [38.7, 40.5]$ 时影响了双稳系统势垒高度的变化, 导致粒子发生跃迁, 产生了随机共振现象.

综合观察 MSNR gain 随 a, b 以及 r 的变化曲线, 对于一个确定的 a (b 或 r), 相应存在多个共振

效应较好的 b (a 或 r) 区间与之对应. 再进一步观察每个区间的放大图, 发现共振效应较好的 a, b, r 区间不随对称参数 β 的变化而变化, 纵向观察, 发现对于同一个共振效应较好的 a (b 或 r) 区间, $\beta = 0$ 时的 MSNR gain 要高于 $\beta \neq 0$ 时的 MSNR gain.

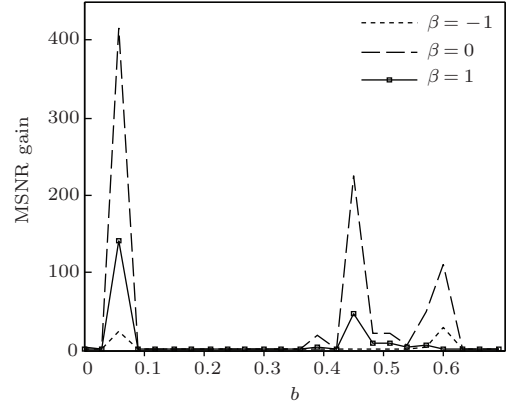


图9 不同 β 作用下 MSNR gain 随 b 的变化

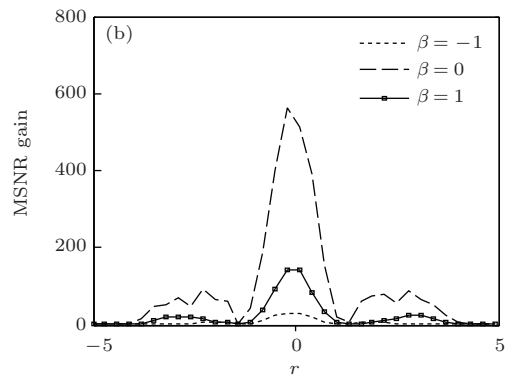
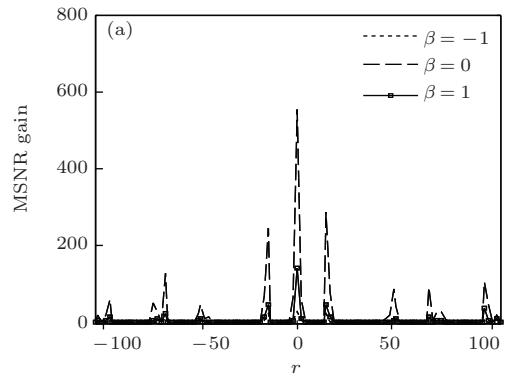


图10 (a) 表示不同 β 作用下 MSNR gain 随 r 的变化; (b) 表示不同 β 作用下 MSNR gain 随系统偏度 r 变化的局部放大图

图 11 为对称参数 β 取不同值时, MSNR gain 随 D 的变化情况, 可以看到共振效应相对较好的 D 区间基本都集中在同一个区域, $\beta = 0$ 时的 MSNR gain 要高于 $\beta \neq 0$ 时的 MSNR gain.

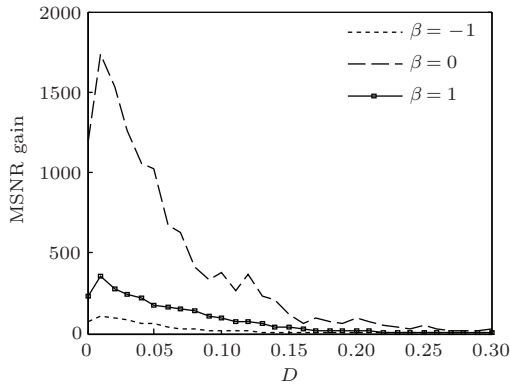


图 11 不同 β 作用下 MSNR gain 随 D 的变化

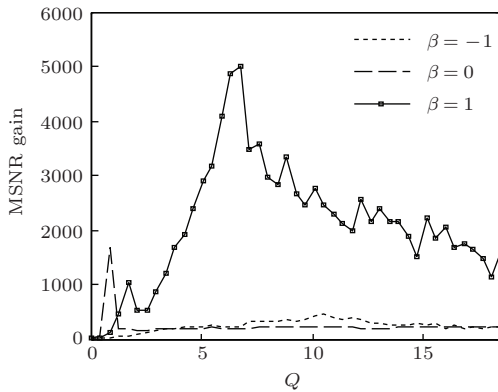


图 12 不同 β 作用下 MSNR gain 随 Q 的变化

图 12 为不同 β 下 MSNR gain 随 Q 的变化情况, 可以看到不同 β 时, MSNR gain 均有峰值出现, 且呈现先增大后减小的趋势, 说明存在最优值使随机共振效果达到较好的状态.

5.2 微弱周期信号在单独加性 α 稳定噪声下非对称双稳系统中的随机共振现象

以研究加性和乘性 α 稳定噪声共同作用的非对称双稳系统中随机共振现象的方法对单独加性 α 稳定噪声驱动的非对称双稳系统展开了研究, 并得到了相应的实验结果. 原始信号与 α 稳定噪声分布参数不变, $Q = 0.63$; 令 $r = 0.2$, 选取 $a = 75.92$, $b = 0.04$, 取采样频率 $f_s = 8.343$ Hz. 进行仿真实验, 结果如图 13 所示.

图 13(a) 是输入信号和加性 α 噪声混合信号的时域图, 图 13(b) 为输入混合信号的频域图, 从这两个图中都得不到有效的信息. 将该混合信号作为输入信号送入随机共振系统, 然后调节系统参数, 当 $a = 75.92$, $b = 0.04$ 时, 从输出信号进行 FFT 变换后得到的功率谱图 13(c) 可见, 输出功率谱在频

率为 0.05 Hz 处达到最大值, 与输入信号的频率相符合, 说明发生了随机共振现象.

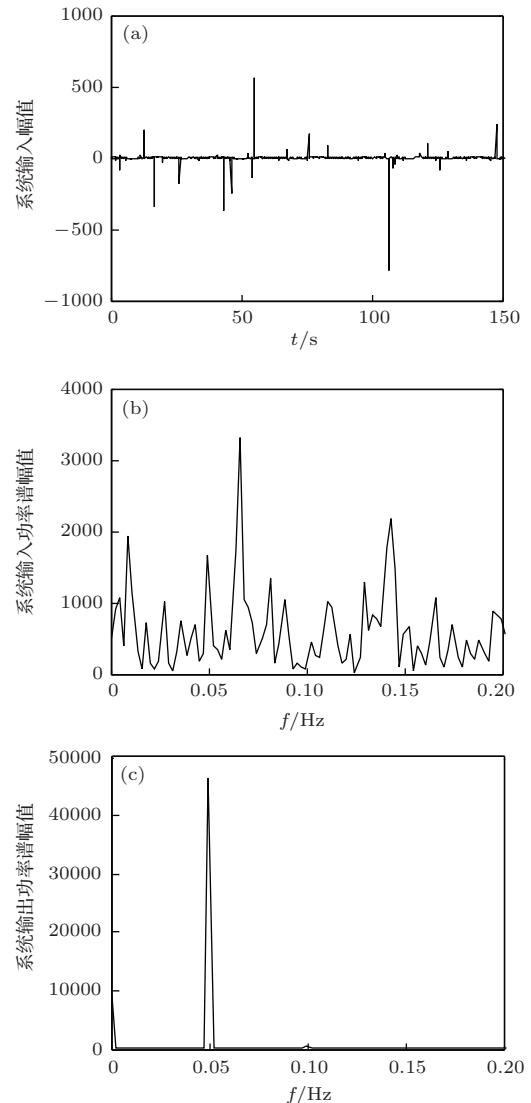


图 13 (a) 系统输入时域; (b) 系统输入功率谱; (c) 系统输出功率谱

研究不同的 α 稳定噪声分布下 a , b , r 以及 Q 与随机共振输出效应的关系, 通过对实验结果进行分析总结, 发现参数 α (特征指数), β (对称参数) 分别取不同值时, 加性和乘性 α 稳定噪声共同作用下与单独加性 α 稳定噪声作用下的 MSNR gain 随 a , b , r 以及 Q 的变化规律大体一致.

6 结 论

本文针对非对称双稳系统分别研究了加性和乘性 α 稳定噪声共同作用以及单独加性 α 稳定噪声作用下的随机共振现象. 在 α 稳定噪声分布参数

α , β 分别取不同值时, 从参数诱导和噪声诱导两个方面探究了 MSNR gain 随系统参数和噪声强度放大系数的变化情况. 无论是单独加性 α 噪声驱动还是加性和乘性 α 噪声共同驱动的 SR 输出效应, 都有以下规律: 1) α 稳定噪声分布参数不同时, 调节噪声强度放大系数和系统参数 a , b , r 均可以诱导随机共振现象; 2) 对于一个确定的系统参数 a (b 或 r), 信噪比增益有多个峰值出现, 说明相应地有多个系统参数 b (r 或 a) 区间, 并且这些区间不随 α 或 β 的变化而变化; 3) 不同特征指数 α 时, 在任意一个系统参数 (a , b , r) 和乘性噪声强度放大系数 D 的共振区间, 特征指数 $\alpha = 1$ 时 SR 输出效应最好, $\alpha > 1$ 时, SR 效应随 α 的增大而减弱, 当 $\alpha < 1$ 时, SR 效应随 α 的减小而减弱; 4) 不同对称参数 β 时, 在任意一个 a , b , r 或 D 的共振区间中, α 稳定噪声呈对称分布 ($\beta = 0$) 时系统的 SR 输出效应要好于非对称分布时 ($\beta \neq 0$) 的情形; 5) 在不同特征指数 α 和不同对称参数 β 下, 信噪比增益在 $r = 0$ 时最大且信噪比增益曲线关于 $r = 0$ 对称, 这说明此双稳系统对称时, 随机共振效果最好. 这些结论对于非对称双稳随机共振系统选择合适的参数实现自适应随机共振奠定了基础, 有助于随机共振检测的实际工程应用.

参考文献

- [1] Zhang W Y, Wang Z L, Zhang W D 2009 *Control Engineering of China* **16** 638 (in Chinese) [张文英, 王自力, 张卫东 2009 控制工程 **16** 638]
- [2] Zhu H J, Li R, Wen X D 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2405 (in Chinese) [祝恒江, 李蓉, 温孝东 2003 物理学报 **52** 2405]
- [3] Leng Y G, Wang T Y, Guo Y, Wang W J, Hu S G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1118 (in Chinese) [冷永刚, 王太勇, 郭焱, 汪文津, 胡世广 2005 物理学报 **54** 1118]
- [4] Xiao F H, Yan G R, Han Y H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 396 (in Chinese) [肖方红, 闫桂荣, 韩雨航 2004 物理学报 **53** 396]
- [5] Jiang S Q, Hou M J, Jia C H, He J R, Gu T X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2667
- [6] Li J L, Xu B H 2006 *Chin. Phys. B* **15** 2867
- [7] Li J L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5196
- [8] Leng Y G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5196 (in Chinese) [冷永刚 2009 物理学报 **58** 5196]
- [9] Zhang G L, Lü X L, Kang Y M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 040501 (in Chinese) [张广丽, 吕希路, 康艳梅 2012 物理学报 **61** 040501]
- [10] Zhang J J, Jin Y F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 120501 (in Chinese) [张静静, 靳艳飞 2011 物理学报 **60** 120501]
- [11] Li J H 2002 *Phys. Rev. E* **66** 031104
- [12] Zhou B C, Xu W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2035 (in Chinese) [周丙常, 徐伟 2008 物理学报 **57** 2035]
- [13] Qiu T S, Zhang X X, Li X B, Sun Y M 2004 *Statistical Signal Processing—Non-Gaussian Signal Processing and its Applications* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p140 (in Chinese) [邱天爽, 张旭秀, 李小兵, 孙永梅 2004 统计信号处理——非高斯信号处理及其应用 (北京: 电子工业出版社) 第 140 页]
- [14] Jiao S B, Ren C, Huang W C, Liang Y M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 210501 (in Chinese) [焦尚彬, 任超, 黄伟超, 梁炎明 2013 物理学报 **62** 210501]
- [15] Jiao S B, Ren C, Li P H, Zhang Q, Xie G 2013 *Acta Phys. Sin.* **63** 070501 (in Chinese) [焦尚彬, 任超, 李鹏华, 张青, 谢国 2013 物理学报 **63** 070501]
- [16] Leng Y G, Wang T Y, Guo Y, Wu Z Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 30 (in Chinese) [冷永刚, 王太勇, 郭焱, 吴振勇 2007 物理学报 **56** 30]
- [17] Hu N Q 2012 *Stochastic Resonance Weak Characteristic Signal Detection Theory and Methods* (Beijing: National Defense Industry Press) p60 (in Chinese) [胡萑庆 2012 随机共振微弱特征信号检测理论与方法 (北京: 国防工业出版社) 第 60 页]
- [18] Jin Y F, Xu W, Xu M 2005 *Chaos, Soliton. Fract.* **26** 1183
- [19] Leccardi M 2005 *ENOC'05 (Fifth EUROMECH Non-linear Dynamics Conference)* Eindhoven, The Netherlands 2005
- [20] Nolan J P 1999 *Math. Comput. Model* **29** 229
- [21] Tang Y, Zou W, Lu J Q, Kurths J 2012 *Phys. Rev. E* **85** 046207
- [22] Dybiec B, Gudowska-Nowak E 2006 *Acta Phys. Pol.* **37** 1479
- [23] Liang Y J, Chen W 2013 *Signal Process.* **93** 242
- [24] Jiao S B, He T 2013 *Comput. Engineer. Appl.* **50** 221 (in Chinese) [焦尚彬, 何童 2013 计算机工程与应用 **50** 221]
- [25] Xu W, Jin Y F, Xu M, Li W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2405 (in Chinese) [徐伟, 靳艳飞, 徐猛, 李伟 2005 物理学报 **54** 2405]
- [26] Gong D C, Qin G R, Hu G, Wen X D 1992 *Sci. China A* **8** 828 (in Chinese) [龚德纯, 秦光戎, 胡岗, 温孝东 1992 中国科学 A 辑 **8** 828]
- [27] Wan P, Zhan Y J, Li X C, Wang Y H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 040502 (in Chinese) [万频, 詹宜巨, 李学聪, 王永华 2011 物理学报 **60** 040502]

Stochastic resonance of asymmetric bistable system with α stable noise*

Jiao Shang-Bin[†] Yang Rong Zhang Qing Xie Guo

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

(Received 12 June 2014; revised manuscript received 1 September 2014)

Abstract

In this paper we take the asymmetric bistable system excited by weak periodic signal as a model and regard signal-to-noise ratio gain as an index to investigate the stochastic resonance phenomenon stimulated by additive and multiplicative α stable noise. Stochastic resonance phenomenon stimulated by only additive α stable noise is also investigated here. The laws for the resonance system parameters a , b , asymmetric skewness r and intensity amplification factor Q or D of α stable noise to act on the resonant output are explored under different stability index α and skewness parameter β of α stable noise. The results show that no matter whether under the joint action of additive and multiplicative α stable noise or under the action of only additive α stable noise, weak signal detection can be realized by tuning the system parameters a , b and r . The intervals of a , b and r which can induce stochastic resonances are multiple, and do not change with α nor β . Moreover, when investigating the noise-induced stochastic resonance, it is found that stochastic resonance can also be realized by tuning the intensity amplification factor of α stable noise. And the interval of D does not change with α nor β . The results will contribute to a reasonable selection of parameter-induced stochastic resonance system parameters and noise intensity of noise-induced stochastic resonance under α stable noise.

Keywords: α stable noise, asymmetric bistable system, stochastic resonance, signal-to-noise ratio gain

PACS: 05.45.-a, 05.40.-a, 05.40.Ca, 05.40.Fb

DOI: 10.7498/aps.64.020502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61304204), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2014JM8315), and the Special National Natural Science Foundation of the Education Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 2013JK1050).

[†] Corresponding author. E-mail: jsbzq@163.com