文章编号：1000-8608(2011)02-0281-05

α稳定噪声下基于随机共振的微弱诱发电位潜伏期延长检测

刘文红*[1,2]， 汪源源[1]， 王 斌[1]， 邱天爽[3]

（1.复旦大学 电子工程系，上海 200433；
2.上海电机学院 电子信息学院，上海 200240；
3.大连理工大学 电子信息与电气工程学部，辽宁 大连 116024）

摘要： 提出了一种基于分数低阶统计量及随机共振技术的鲁棒性时间延迟估计新方法——随机共振共变时间延迟估计(SRCTDE)算法，用于在低混合信噪比条件下及α稳定噪声下微弱诱发电位信号潜伏期延长的检测. SRCTDE算法首先利用带噪诱发电位信号与双稳态非线性动力系统之间的随机共振效应提高参考及待测诱发电位信号的混合信噪比，在最大对称共变系数准则下调整非线性系统的参数产生随机共振；接着计算两个随机共振系统输出之间的共变函数，其峰值位置给出诱发电位潜伏期延长估计值. 计算机仿真对比实验验证了SRCTDE算法在不同混合信噪比下优于相关法及共变法的估计性能，结果表明SRCTDE算法是一种α稳定噪声下微弱诱发电位潜伏期延长检测的较好方法.

关键词： 诱发电位潜伏期；时间延迟估计；α稳定分布；分数低阶统计量；随机共振
中图分类号： TN911.7 **文献标志码：** A

0 引 言

诱发电位(EP)总是伴随着自发脑电信号(EEG). 传统上EEG及其他噪声常用高斯分布来描述，然而，在手术室或具有敌意等非正常情况下，这些信号噪声具有明显的非高斯脉冲性[1]. α稳定分布可以较好地描述这类脉冲性非高斯信号. EP信号常常比其噪声弱很多[1]. 有许多方法可以提高信噪比，例如累加平均、小波变换和独立分量分析等. 在这些方法中，均认为噪声对信号有害，而对其加以抑制或消除. 然而，在某种条件下，例如非线性系统的随机共振(SR)，噪声可以有助于系统传输有用的信号[2,3]. 1981年Benzi等提出SR的概念[4]，近年SR技术已经应用于信号处理领域[5,6]. 理论研究和实际应用表明SR技术是一种处理微弱信号的有效方法. 因此，可以利用SR技术提高α稳定噪声下微弱EP信号潜伏期延长检测的性能.

时间延迟估计(TDE)是一种有效的定量评价EP潜伏期延长的信号处理方法[1]. 在高斯噪声SNR较高时互相关法是常用的一种TDE方法，该方法基于二阶统计量，在噪声环境下其性能退化[7]. 用于TDE的共变法[7]在高斯和分数低阶α稳定噪声(FLOA)($0<\alpha<2$)下，当混合信噪比(R_{msn})较低时鲁棒性不足.

本文针对EP信号噪声的特点，用α稳定分布模型描述脉冲噪声，利用分数低阶统计量(FLOS)和SR技术提出一种鲁棒性TDE方法——随机共振共变TDE，简称SRCTDE.

1 利用SR技术的微弱EP潜伏期延长鲁棒性估计方法

1.1 EP潜伏期延长估计的信号模型

检测EP潜伏期延长的信号噪声模型为

$$\begin{cases} x_{1k}(n) = s_k(n) + v_{1k}(n), \\ x_{2k}(n) = s_k(n - D_k) + v_{2k}(n); \\ n = 1,2,\cdots,N, k = 1,2,\cdots,K \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期： 2009-02-03； **修回日期：** 2010-11-12.
基金项目： “九七三”国家基础研究发展计划资助项目(2006CB705707)；上海市重点学科资助项目(B112)；国家自然科学基金资助项目(30570488，30570475)；中国博士后科学基金资助项目(20070420602)；上海电机学院重点培育资助项目(10C104)；上海电机学院科研启动基金资助项目(10C403)；上海电机学院重点学科资助项目(10xkf01).
作者简介： 刘文红*(1967-)，女，大连理工大学2007届博士，教授，E-mail：lwhlei@tom.com；邱天爽(1954-)，男，教授，博士生导师.

其中 k 为扫描序号，n 为离散时间变量，$x_{1k}(n)$、$x_{2k}(n)$ 分别表示带噪的参考信号、待测信号，$s_k(n)$、$s_k(n-D_k)$ 分别表示纯净的参考信号、待测信号，D_k 是需要估计的潜伏期延迟，$v_{1k}(n)$、$v_{2k}(n)$ 表示 EEG 和其他背景噪声，假定二者是不相关的. 在以下的研究中，$v_{1k}(n)$、$v_{2k}(n)$ 用更符合实际情况的 α 稳定分布来描述.

1.2 分数低阶统计量

α 稳定分布是一种广义的高斯分布. 当脉冲信号建模为 FLOA 时，可以基于 FLOS 对其进行分析处理. 对称共变系数是一种可以度量两个 $S\alpha S$ 随机变量相关性的 FLOS，定义如下[8]：

$$Corr_\alpha(X,Y)=\lambda_{X,Y}\lambda_{Y,X}=\frac{[X,Y]_\alpha[Y,X]_\alpha}{[X,X]_\alpha[Y,Y]_\alpha};\quad 1<\alpha\leqslant 2 \tag{2}$$

对称共变系数是有界的，其值介于 -1 和 1 之间[9].

度量两个随机过程 $x_1(n)$、$x_2(n)$ 相似程度的共变函数[7] 由下式给出：

$$R_c(m)=E[x_1(n)x_2(n+m)^{\langle p-1\rangle}]=E[x_1(n)x_2(n+m)^{\langle p-1\rangle}\times \operatorname{sgn}[x_2(n+m)]];\ 1<p<\alpha \tag{3}$$

当 $x_1(n)$ 与 $x_2(n)$ 为白随机过程，且 $x_2(n)=x_1(n-D)$，有

$$E[\hat{R}_c(m)]=C_c\delta(m+D) \tag{4}$$

其中 C_c 为非负常数[7].

1.3 随机共振

SR 是一种噪声能够增强而不是阻碍系统性能的现象[3]. SR 效应是信号、噪声与系统协同作用的结果. 四次双稳系统是一种典型的可以产生 SR 效应的非线性动力系统. 它可以用下式描述[3]：

$$\frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t}=-\frac{\partial U(y(t),t)}{\partial x}+x(t)=ay(t)-by^3(t)+s(t)+v(t) \tag{5}$$

其中输入信号 $x(t)$ 由 $s(t)$ 和 $v(n)$ 组成，$s(t)$ 表示输入纯净信号，$v(n)$ 表示位置参数为零的 FLOA $S\alpha S$ 噪声；$y(t)$ 表示输出信号或系统状态；$U(y(t),\ t)$ 为四次势函数，$U(y(t),\ t)=-(a/2)y^2(t)+(b/4)y^4(t)$，$a>0$，$b>0$，$a$、$b$ 为系统参数. 势函数有两个稳定的最小点 $y(t)=\pm(a/b)^{1/2}$ 和一个欠稳定的点 $y(t)=0$. 两个最小点之间的势垒高度是 $\Delta U=a^2/4b$.

对于上述系统，当噪声的能量或系统的参数适当时，可以发生 SR 使输出信号的 SNR 达到最大. 在本文的研究中，采用调整系统参数的方法来产生 SR，提出了一种在 FLOA $S\alpha S$ 噪声下基于对称共变系数的 SR 测度，在系统参数 $b=1$ 的情况下，取不同参数 a 值分别计算输入 $x(t)$ 与输出 $y(t)$ 的对称共变系数，当对称共变系数为最大值时，a 的数值就是在该信号噪声条件下系统产生 SR 所需要的参数.

此外，SR 系统输出信号与输入信号之间有一定的相移，可以近似表示为

$$\varphi=\arctan(\pi f/r_K) \tag{6}$$

其中 r_K 为 Kramers 逃逸速率[3]，由系统参数和噪声强度决定；f 为信号的频率. 由式(6)可知，含有相同噪声强度的同频率信号，经过相同参数的非线性动力系统后，有相同的相移. 这一结论说明在一定条件下，信号经过 SR 技术处理后再进行 TDE 是可行的.

1.4 利用 SR 的 EP 潜伏期延长估计方法

本文提出的 SRCTDE 算法首先利用 SR 效应增大带有 α 稳定分布噪声的参考与待测信号的 R_{msn}，然后基于共变函数得到它们之间的相对延迟.

SRCTDE 算法的原理框图如图 1 所示.

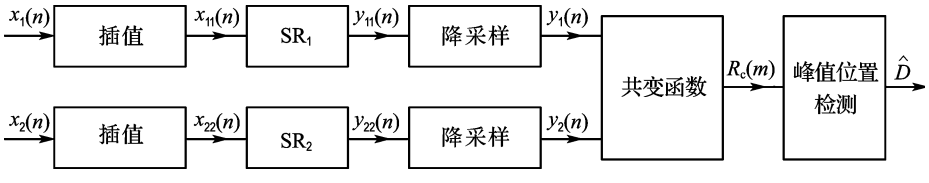


图 1 SRCTDE 算法的原理方框图

Fig. 1 The block diagram of SRCTDE approach

信号 $x_1(n)$、$x_2(n)$ 如式(1)中所述. SR_1、SR_2 是采用最优参数的非线性动力系统，该参数使带噪信号和系统之间产生 SR 效应. 在绝热近似条件下随机微分方程的数值解逼近解析解[2]，但原始的离散信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 其归一化频率往往太高而不满足绝热近似条件，可以采用插值的方法降低输入信号的归一化频率，因而，系统 SR_1、SR_2 的实际输入信号分别为 $x_{11}(n)$、$x_{22}(n)$.

式(5)的随机微分方程描述了非线性动力系统 SR_1、SR_2，可以用欧拉方法得到该方程的数值解[10]：

$$y(n+1) = y(n) + \Delta T[ay(n) - by^3(n) + s(n) + v(n)] \tag{7}$$

其中 ΔT 为动力系统的时间步长. 在最大对称共变系数准则下调整系统参数产生 SR 效应. 在系统参数 $b = 1$ 的条件下，调整系统参数 a 以步长 0.01 从 0.01 变化到 2，根据式(2)计算每次输入信号与输出信号之间的对称共变系数 $Corr_a$，$Corr_a$ 最大值对应的 a 值就是产生 SR 的最优参数值.

式(7)中时间步长的数值通常取对原始信号插值的采样周期. 为了降低计算量，系统 SR_1、SR_2 的输出信号 $y_{11}(n)$、$y_{22}(n)$ 经过降采样变为信号 $y_1(n)$、$y_2(n)$，再估计 $y_1(n)$ 与 $y_2(n)$ 之间的共变函数 $R_c(m)$. 根据式(4)，EP 潜伏期延长的估计值可以由估计的 $R_c(m)$ 的峰值位置得到：

$$\hat{D} = \arg \max_m \hat{R}_c(m) \tag{8}$$

2　计算机仿真结果

用计算机仿真验证 SRCTDE 算法对 EP 潜伏期延长的估计性能. 程序运行的平台为 Matlab.

按照式(1)构造信号和噪声. 带噪参考信号 $x_1(n)$ 由纯净 EP 信号 $s(n)$ 加上 $S\alpha S$ 噪声 $v_1(n)$ 组成，$s(n)$ 通过临床获得的正常 EP 信号多次平均得到[1]；$x_2(n)$ 由 $s(n)$ 延迟 D 个采样间隔的信号 $s(n-D)$ 加上 $S\alpha S$ 噪声 $v_2(n)$ 组成，$x_2(n)$ 模拟了缺氧窒息等非正常条件下 EP 潜伏期延长的情况. 仿真中信号长度为 3 个扫描周期，每个扫描周期采样 128 点，即式(1)中 $K = 3$、$N = 128$；待测 EP 信号潜伏期的延迟 D 设定为 10 个采样间隔；基于最大对称共变系数选定的系统参数为 $a = 0.01$、$b = 1$. 式(7)中的时间步长 ΔT 为 0.001，其初始值 $y(0) = 0$，SR_1、SR_2 输出信号的降采样率为 1 000∶1.

图 2 给出了含有 $S\alpha S$ ($\alpha = 1.6$) 噪声、$R_{msn} = 0$ 的 EP 信号经过 SR 处理后的结果. 图 2(a)、(b)为经过累加平均的纯净 EP 信号 $s(n)$、$s(n-D)$；图 2(c)、(d)为仿真的含有 $S\alpha S$ ($\alpha = 1.6$) 噪声、$R_{msn} = 0$ 的带噪 EP 信号 $x_1(n)$、$x_2(n)$；图 2(e)、(f)为 SR 非线性系统 SR_1、SR_2 的输出信号 $y_1(n)$、$y_2(n)$. 从图 2 中可以看出，淹没在强脉冲性 $S\alpha S$ 噪声中的纯净 EP 信号经过 SR 效应已经凸显出来，说明通过 SR 效应，输出信号的 R_{msn} 得到了提高.

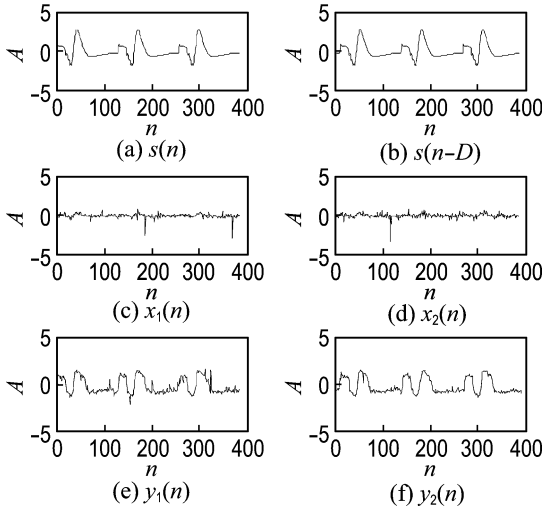


图 2　含有 $S\alpha S$ ($\alpha = 1.6$) 噪声、$R_{msn} = 0$ 的 EP 信号经过 SR 处理后的结果

Fig. 2　Results of EP signals with the $S\alpha S$ ($\alpha = 1.6$) noise under $R_{msn} = 0$ via the SR effect

分别用相关法、共变法及 SRCTDE 算法估计含有 $S\alpha S$ ($\alpha = 1.6$) 噪声、$R_{msn} = 0$ 的 EP 信号潜伏期的延长. 在共变法和 SRCTDE 算法中取 $p = \alpha - 0.1$. 图 3 给出了 3 种算法 20 次独立实验的结果.

从图 3 中可以看出，相关法和共变法均不能估计出 EP 信号潜伏期延长的正确结果，只有 SRCTDE 算法可以得到 10 个采样间隔的正确结果.

为了充分说明 SRCTDE 算法较好的估计性能，用均方根误差(*RMSE*)比较 3 种算法的估计性能. 信号及噪声的 R_{msn} 以 5 dB 的间隔从 −25 dB 变化到 20 dB，脉冲噪声的特征指数 $\alpha = 1.6$. 图 4 给出的是 20 次独立实验的统计结果.

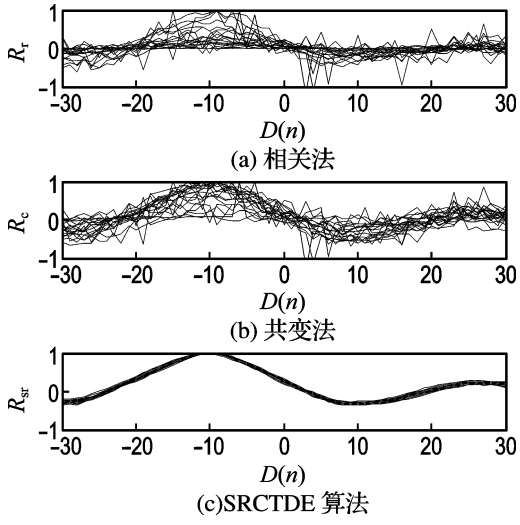


图 3 相关法、共变法及 SRCTDE 算法对含有 $S\alpha S$ ($\alpha=1.6$)噪声、$R_{msn}=0$ 的 EP 信号潜伏期延迟的检测

Fig. 3 Detection of latency delay in evoked potential with the $S\alpha S$ ($\alpha=1.6$) noise under $R_{msn}=0$ via the correlation, covariation and SRCTDE algorithms

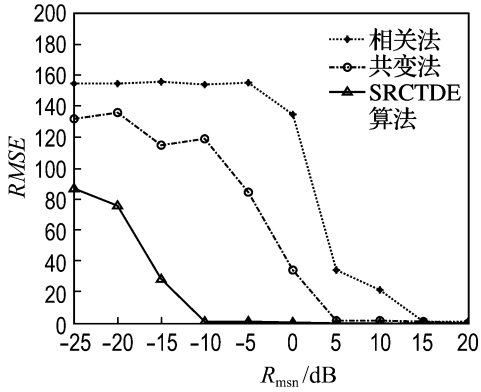


图 4 相关法、共变法及 SRCTDE 算法在 $\alpha=1.6$ 时,*RMSE* 与 R_{msn} 的关系曲线

Fig. 4 Comparisons of the *RMSE* versus the R_{msn} among the correlation, covariation and SRCTDE algorithms for $\alpha=1.6$

从图 4 中可以看出,对于相同的 R_{msn},SRCTDE 算法的 *RMSE* 均比相关法和共变法的 *RMSE* 小. SRCTDE 算法在 $R_{msn}\geqslant -10$ dB 时 *RMSE* 接近于零,而共变法和相关法分别在 $R_{msn}\geqslant 5$ dB 和 $R_{msn}\geqslant 15$ dB 时 *RMSE* 才接近于零.

3 结 论

(1)对称共变系数是一种在 α 稳定噪声条件下 SR 效应的性能测度. 基于最大对称共变系数的参数调整 SR 方法可以在不同 R_{msn} 条件下提高非线性系统输出信号的能力.

(2)SR 技术能够用于微弱 EP 信号潜伏期延长检测的关键在于 SR 效应不仅提高了参考和待测 EP 信号的 R_{msn},而且在一定的条件下不改变原始信号之间的相对时间延迟.

(3)提出的 SRCTDE 算法在脉冲噪声低 R_{msn} 环境下,估计性能优于相关法及共变法,该算法不仅是一种有效的脉冲噪声下微弱 EP 信号潜伏期延长检测方法,而且可以用于其他领域中脉冲噪声下微弱信号的 TDE.

参考文献:

[1] KONG Xuan, QIU Tian-shuang. Adaptive estimation of latency change in evoked potentials by direct least mean *p*-norm time-delay estimation [J]. **IEEE Tranactions on Biomedical Engineering**, 1999, **46**(8): 994-1003

[2] MITAIM S, KOSKO B. Adaptive stochastic resonance [C]// **Proceedings of the IEEE: Special Issue on Intelligent Signal Processing**. New York: IEEE Press, 1998: 2152-2183

[3] GAMMAITONI L, HÄNGGI P, JUNG P, *et al*. Stochastic resonance [J]. **Reviews of Modern Physics**, 1998, **70**(1):223-287

[4] BENZI R, SUTERA A, VULPIANI A. The mechanism of stochastic resonance [J]. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, 1981, **14**(11): 453-457

[5] ROY V M, ANAND G V. A suprathreshold stochastic resonance based pre-processor for direction-of-arrival estimation [C] // **IEEE TENCON Conference**. New York:IEEE Press, 2006: 1-4

[6] XU B H, JIANG Z P, WU X X, *et al*. Theoretical analysis of image processing using parameter-tuning stochastic resonance technique [C]// **Proceedings of the 2007 American Control Conference**. Piscataway:

Institute of Electrical and Engineers Inc., 2007: 1747-1752

[7] MA X Y. Robust signal processing in impulsive noise with stable distributions: estimation, identification and equalization [D]. Los Angeles: University of Southern California, 1996

[8] ACHIM A M, CANAGARAJAH C N, BULL D R. Complex wavelet domain image fusion based on fractional lower order moments [C] // **IEEE International Conference on Information Fusion**. New York: IEEE Press, 2005: 515-521

[9] WITT A, NEIMAN A, KURTHS J. Characterizing the dynamics of stochastic bistable systems by measure of complexity [J]. **Physics Review E**, 1997, **55**(5): 5050-5059

[10] INCHIOSA M E, BULSARA A R. Nonlinear dynamic elements with niosy sinusoidal forcing: enhancing response via nonlinear coupling [J]. **Physics Review E**, 1995, **53**(1): 327-339

Detection of latency delay in weak evoked potential with α-stable noises via stochastic resonance

LIU Wen-hong[*1,2], WANG Yuan-yuan[1], WANG Bin[1], QIU Tian-shuang[3]

(1. Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China;
3. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the fractional lower order statistics (FLOS) and stochastic resonance (SR) technique, a novel robust time delay estimation approach, stochastic resonance covariation time delay estimation (SRCTDE) algorithm is proposed to detect the latency delay in the evoked potential (EP) with the presence of the α-stable noise under the lower mixed-signal-to-noise ratio (MSNR) condition. In the SRCTDE, MSNRs of the reference and detected EP signals are improved via the SR effect between noisy EP signals and bistable nonlinear dynamical systems. The SR effect is realized by tuning system parameters to their optimal values under the maximum symmetric covariation coefficient criterion. Then, the covariation function between outputs of two SR systems is computed. The EP latency delay is estimated by obtaining the location of this covariation function peak. The performance of the SRCTDE algorithm is verified through computer simulations compared with the correlation algorithm and covariation algorithm for various values of MSNR. The SRCTDE algorithm gives an improved approach to estimation of the latency delay in the weak EP with α-stable noises.

Key words: evoked potential latency; time delay estimation; α-stable distribution; fractional lower order statistics; stochastic resonance