

自适应随机共振信号检测系统研究与设计^{*}

雷卫延¹, 姜孝华², 朱璇³

(1. 广东省大气探测技术中心, 广东 广州 510080)

(2. 中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

(3. 广东省气象信息中心, 广东 广州 510080)

摘要: 研究了自适应随机共振信号检测算法, 基于 MATLAB 设计并实现了自适应随机共振信号检测系统, 经仿真和实测数据验证表明, 该系统检测效果良好, 具有实际应用价值。利用该系统可研究测试各种参数及有色噪声对随机共振的影响, 可从实际采集数据中恢复微弱信号的时域波形及信号频谱。

关键词: 随机共振; 自适应; 信号检测; MATLAB

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) S2-0180-05

在强噪声背景下提取微弱信号成了信号处理技术中广泛而倍受关注的课题。微弱信号的检测有许多方法, 基于 SR (Stochastic Resonance) 的微弱信号检测技术是最近发展起来的一种新技术。随机共振特指一种非线性现象: 强噪声干扰下的信号作用于某一非线性系统, 当输入信号、噪声和非线性系统之间达到某种匹配时, 会发生噪声能量向信号能量的转移, 使得输出信噪比增强, 并达到极大值 (峰值点)^[1]。

20 世纪 90 年代以来, 由于工程实际的需要, 自适应随机共振理论成为人们研究的热点。本文根据线性随机搜索 (LRS) 算法^[2], 综合考虑系统结构参数 u 及计算步长 h 的调节, h 不取采样频率的倒数, 而是令 $h > 1/f$, 计算结果得到较大改善^[3]。此外, 作为仿真平台, 把有色噪声整合到检测系统中, 有助于研究色噪声对随机共振的影响, 使仿真结果更接近实际。研究了有色噪声背景下 SR 检测方法的有效性, 给出了相关仿真研究结果。

1 自适应随机共振基本原理

随机共振可以简单理解为: 噪声通过非线性系统加强了原本微弱的信号或信息。所谓自适应随机共振, 就是在输入信号与噪声的特征都未知的情况下, 通过调节一些参数, 使系统产生随机共振, 从而检测出微弱信号。考虑一个质量为 m 的过阻尼布朗粒子在双稳态势阱中运动, 同时伴有周期的驱动力和噪声, 描述系统的朗之万方程如下:

$$x' = -ux - \frac{x}{4} + A \cos(2\pi ft + \phi) + \sqrt{2D}\xi(t) \quad (u > 0) \quad (1)$$

其中 u 为势阱参数, A 为信号幅值, f 为信号频率, ϕ 为相位, D 为噪声强度。在这里, 我们假设 $\xi(t)$ 是方差为 1、均值为 0 的高斯白噪声, 其自相关函数为 $E[\xi(t)\xi(t+\tau)] = \delta(t-\tau)$ 。(1) 式所示的系统是最简单的双稳系统, 势函数 $U(x) = -x^2/2 + x^4/4$ 有两个稳定状态 $x = \pm\sqrt{u}$ 和一个不稳定状态 $x_0 = 0$ 。在没有信号和噪声 ($A=0, D=0$) 时, 势垒高度 $\Delta U = u^2/4$, 势能最小值位于 x_0 , 此时系统的状态被限制在双势阱之一, 并由初始条件决定。当系统仅加入信号后, 系统是非对称双稳态的, 当信号幅度 $|A| \geq A_c$ ($A_c = \sqrt{4/27}u = 0.38u$, 称为双稳系统临界值) 时, 系统的双稳性质消失。传统的随机共振理论将作为信号是否为微弱信号的判决条件。因为当 $|A| < A_c$ 时, 没有噪声的帮助, 信号不能引起双稳态系统在不同的稳态之间有确定性的转移。

当系统中加入噪声后, 在噪声的作用下, 粒子在两个势阱间来回切换。当 $A=0$ 时, 切换概率满足 Kramers 公式^[4]:

$$R = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{2\Delta U}{D}\right) = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{u^2}{D}\right) \quad (2)$$

当噪声增大时, 克莱默斯跃迁概率也逐渐增大, 这就导致粒子将从一个势阱跃迁至另一个势阱, 致使系统发生随机共振。

传统的研究大多是通过逐步增加噪声强度 D 来使克莱默斯跃迁概率增大, 从而使系统共振。然而对于工程实际信号的检测, 在信号和噪声特征均

* 收稿日期: 2007-09-16

作者简介: 雷卫延 (1981年生), 男, 硕士研究生; E-mail: leiweyan@163.com

未知的情况下就一味的增加噪声，显得过于勉强。此外，人为的增加噪声会导致输入信噪比下降，使信噪比增益变小。从（2）式可以看出，当噪声强度固定不变时，通过调节系统参数 μ 也可以增加克萊默斯跃迁概率，使系统出现随机共振现象。而其最突出的特点是，在不降低信噪比的情况下，即使噪声发生改变，所需要做的改变仅需调节系统参数即可，同时方便了系统设计，符合工程需要。

根据非线性动力系统的随机共振效应信噪比检验方法，随机共振通常可以通过输出信噪比的大小来衡量^[5]。信噪比的表达式为：

$$SNR=10\lg\frac{S}{N}=10\lg\frac{S(\omega_0)}{N(\omega_0)}\tag{3}$$

式中 $S(\omega_0)=|X(\omega_0)|^2$ 为系统在频率 ω_0 处的输出功率谱 $X(\omega_0)$ 的幅值，背景噪声谱 $N(\omega_0)$ 是在频率 ω_0 处附近频率段内的平均值。当系统处于最佳随机共振状态时，输出信噪比会达到最大值，该时刻的频谱正是所要检测的信号频谱。

2 SR检测方法的有效性研究

根据色噪声的实现方法^[9]，首先用 MATLAB 产生两个独立的白噪声，分别通过两个完全相同的低通滤波器（设截止频率为 f_c ），得到两个低通白噪声，设为 $X_c(t)$ 和 $X_s(t)$ 。由此就可以得到样本 $X_c(n)$ 和 $X_s(n)$ ，即 $X_c(t)$ 和 $X_s(t)$ 的采样值。然后，用 $x_c(n)$ 调制已采样的载波 $\cos(2\pi f_c nT_s)$ ，用 $x_s(n)$ 调制正交载波 $\sin(2\pi f_c nT_s)$ ，这里的 T_s 是合适的采样间隔，最后，将两路调制后的信号相减，即得到以 f_c 为中心，带宽为 $[f_c-f_b, f_c+f_b]$ 的色噪声，数学表达式为

$$x(n)=x_c(n)\cos(2\pi f_c nT_s)-x_s(n)\sin(2\pi f_c nT_s)\tag{4}$$

本文色噪声的实现方法：由 MATLAB产生的白噪声，通过 FIR低通滤波器（设截止频率为 f_c ），得到截止频率为 f_c 的低频色噪声，然后和信号一起作为系统的输入，来分析色噪声对双稳系统的影响。产生这种色噪声方法的优点是易于实现，并且相比一般色噪声的实现方法，不会出现干扰项（调制信号的频率），对于仿真实验来说又不失一般性。

图 1 中的低频噪声就是用该方法产生的。图（a）是截止频率为 0.01 的 FIR低通滤波器的频域波形；图（b）是白噪声通过图（a）所示低通滤波器输出的时域波形；图（c）是图（b）所示噪声 FFT分析的频谱图，观察知道，该噪声是截止频率为 0.01 的色噪声，即仿真所需要的噪声；图（d）是频率为 0.01 的正弦信号与图（b）所示噪声叠加后的时域波形；图（e）是图（d）所示混合信号经双稳系统输出的时域波形，观察发现，输出信号的前一部分幅值在 y 轴的正半轴（ $x>0$ ），这是因为噪声比较弱的缘故（见图 b），输入混合信号不能越过势垒，因而只能在（ $x>0$ ）一侧活动；输出信号的另一部分则有正有负，且幅值明显变大，这表明在噪声的协同下，输入信号已经能够越过势垒，从而信号的能量得到增强。再次证实随机共振系统具备利用噪声来提高信号能量的奇异功效；图（f）是图（e）所示系统输出端信号的频域波形，明显观察到在 0.01 Hz 处有一突出的频谱特征，即是系统输入端的正弦信号的频率。这表明随机共振在应用于有色噪声背景下的微弱信号检测时的有效性。

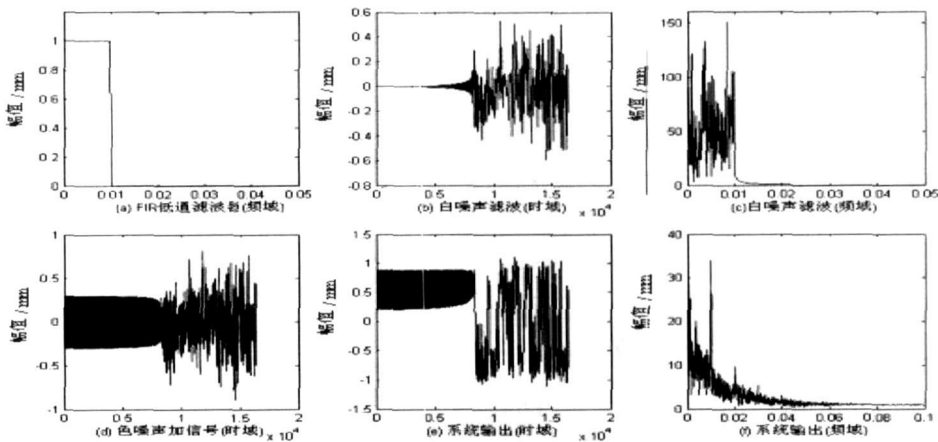


图 1 随机共振应用于有色噪声背景下的信号检测

Fig 1 Stochastic Resonance (SR) applied to signal detection of color noise background

3 自适应随机共振系统设计与实现

3.1 MATLAB工具简介

本文中的主要仿真及系统开发工具是 MATLAB 应用软件。MATLAB 是美国 Mathworks 公司推出的一套高性能的数值分析和计算软件,它是当今最优秀的科技应用软件之一,它以强大的科学计算与可视化功能、简单易用、开放式可扩展环境。MATLAB 具有其他高级语言难以比拟的一些优点,如编写简单、编程效率高等。

MATLAB 中图形用户界面 (GUI),是由窗口、光标、按键、菜单、文字说明等对象构成的一个用户界面。用户不需要一行行的用程序来设定,只需要用鼠标选择即可。在回调 (Callback) 处理模式下,也可以用程序设计方式将各个相关的处理程序集成成为单一的处理系统,使研究成果表现更好,这就是使用 GUI 的目的。本文中的系统就是使用 GUI 来实现的。

3.2 线性随机搜索 (LRS) 自适应算法

自适应随机共振算法涉及随机共振理论与自适应信号处理。线性随机搜索算法是一类在权空间随机地选择游动方向的算法,在每次迭代中,将一个小的随机改变量 W_k 试探性地加在权向量上,然后观察性能的变化,由此确定权值的迭代。这种方法可以表示为:

$$W_{k+1} = W_k + \frac{u}{\sigma^2} \{ \zeta[W_k] - \zeta[W_k + \Delta W_k] \} \Delta W_k$$
 (5)

式中 σ^2 即为权扰动随机改变向量 ΔW_k 中各个分量实部 (或虚部) 的方差, $\zeta[W_k]$ 表示当权向量位于 W_k 时的输出均方误差估值。对于 LRS 算法,它的扰动方向仅仅在单个方向上进行。

在实际的工程测量中,信号和噪声往往都是未知,我们不可能事先掌握待测信号的特征量,如频率、幅值等。LRS 算法的这一特性可以很好地解决这个问题。势垒高度 ($U_k = u^2/4$ 其中 u 见公式 1) 为自适应算法的可调权向量,通过系统参数调节模块在相应权空间实现权向量 U_k 的迭代,使系统达到最佳随机共振状态,此时的系统输出信噪比值为最大。本文研究的自适应随机共振算法为:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{4}{u} U_k x - x^3$$
 (6)

$$U_k = U_{k-1} + \frac{\mu}{\sigma^2} \{ \zeta[U_{k-1}] - \zeta[U_{k-1} + \Delta U_{k-1}] \} \Delta U_{k-1}$$
 (7)

$$\Delta_k = SNR_k - MSNR \begin{cases} \geq 0 & MSNR = SNR_k \\ < 0 & MSNR = MSNR \end{cases} \quad (8)$$

式中的 U_k 为非线性双稳态系统的势垒参数, $\zeta[U_{k-1}]$ 表示当权向量位于 U_{k-1} 时的输出均方误差估值, u 为系统参数, k 为迭代序列, ΔU_{k-1} 为权扰动随机改变向量, σ^2 为 ΔU_{k-1} 中各个分量的方差, μ 是一个用于控制自适应速度和稳定性的增益常数。 SNR_k 为系统在某参数状态下的输出信噪比, $MSNR$ 为最大输出信噪比。 $MSNR$ 由公式 (8) 确定。

3.3 功能仿真模块简介:

本系统主要有以下几个模块组成:

3.3.1 系统初始化模块 该模块的主要功能是实现系统的默认参数设置和系统管理界面的生成。

3.3.2 系统结构参数的自适应调节模块 该模块是整个系统中最为核心部分, u 取值是否得当,直接关系到系统能否产生共振。它能够根据不同的输入信号和噪声,自动调节 u 的值,来改变系统的势垒强度,最终目的使系统输出的信噪比最大。该模块的实现方法如下: ①在一定范围内对 u 进行线性扫描,计算并记录扫描范围内的信噪比; ②在记录的信噪比中,比较得出信噪比的最大值; ③把信噪比最大时刻 u 的值,返回给系统,并显示修订值。该模块的流程图如图 2 所示。

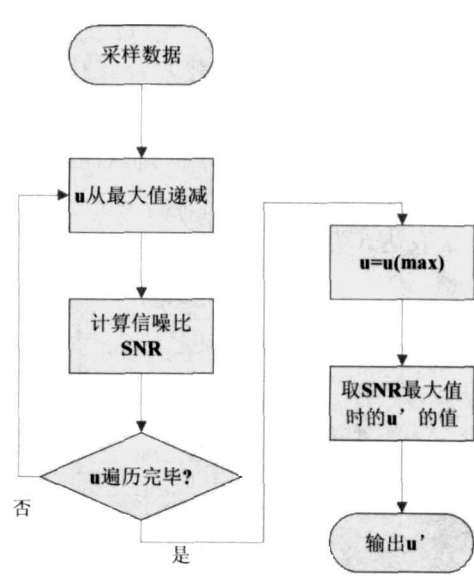


图 2 u 的自适应调节流程图
Fig 2 u self-adjusted adjust flow chart

3.3.3 步长因子的自适应调节模块 该模块主要实现步长因子的自适应调节,同样以系统输出信噪比作为依据,并把修订值返回给系统。该模块具体实现过程和 u 的自适应调节模块实现方法相同。

3.3.4 尺度变换 (频率调节) 的自适应模块 该

模块主要是为输入信号选取合适的二次采样频率, 为大参数信号向小参数信号转化选取合适的压缩比 R 它与二次采样频率 f_s 的关系为: $R = f_s / f_c$ 其中 f_c 是采样频率, 关于尺度变换的思想参考文献 [7]。这里需要强调的是, 并不要求压缩比很大, 当然是越大越好, 而是当二次采样频率满足使信号信噪比最大时则停止搜索, 这样做的目的是兼顾系统的搜索效率, 降低了延时。经验证, 该模块效果不够理想, 不能保证它搜索的可靠性, 有待改进。该模块的流程图如图 3 所示。

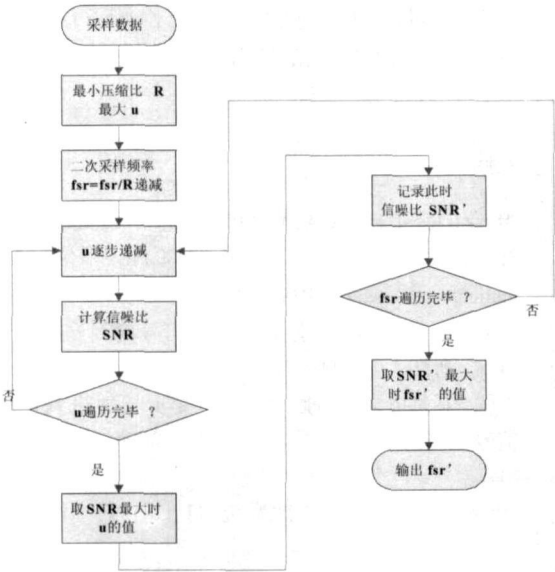


图 3 尺度变换的自适应调节

Fig 3 Scale change self adjusted adjust

3.3.5 尺度变换的手动调节模块 该模块是对 (2.4) 模块的补充, 主要是针对信号频谱范围已知情况下的检测, 使用它不但方便而且有效。它的主要功能如下: ①根据已知的频谱范围选取合适的尺度变换; ②据选取的尺度变换对信号作压缩处理; ③信号经过系统后再对数据作恢复处理。

4 仿真实验与结果分析

4.1 利用界面接口输入仿真数据

在生成的系统中输入频率参数 0.4 系统默认的其它参数为: $D=1$; $u=1$; $h=0.2$ $N=3000$ $A=0.2$ $f=10$ 点击运行, 得到如图 4 所示的波形图, 上图是输入信号的 FFT 频谱分析, 下图是系统输出后频谱。下图基本上看不出信号的频谱, 这是由于信号频率过大和参数选取不合理造成的。

首先选取尺度变换, 尺度变换的范围选取 (0.1, 1), 然后分别点击按钮 u 调节和步长调节, 调节的结果会在系统界面中显示, 如图 5 所示, u

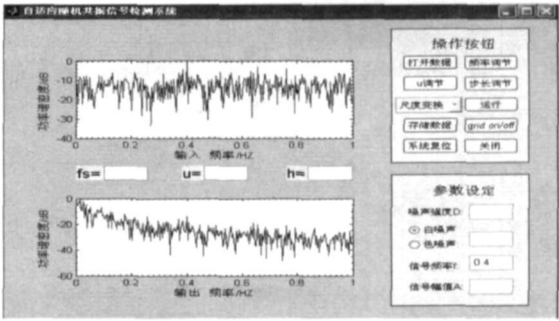


图 4 参数调节前的系统输出

Fig 4 System output before parameter adjustment

$=0.24$ $h=0.56$. 最后点击运行, 显示结果如图 5 所示。其中上图是输入信号的频谱, 下图是系统输出的频谱。观察下图, 明显的可以看到 0.4 处的信号频谱特征, 表明该系统能够较好的检测出掩盖在强背景信号下的噪声。

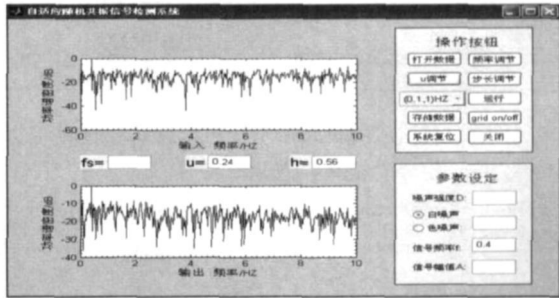


图 5 参数调节后的系统输出

Fig 5 System output after parameter adjustment

4.2 基于自适应随机谐振的人体脉率信号检测

脉率 (pulse rate) 是每分钟脉搏的次数, 正常情况下与心率一致, 健康成人在安静状态下脉率为 60 ~ 100 次 /min。脉率的检测可用于 HRV (Heart ratio variability) 分析, 进一步研究交感神经和迷走神经活动等。采用光电传感器得到一组心率测试原始信号波形如图 6 所示, 由于检测数据受到各种噪声污染和干扰, 从 FFT 变换和时域波形很难获得准确的脉搏检测信号。使用本系统对该实际采集的脉搏数据进行分析处理, 系统读入数据后, 调节参数和步长, 参数值及系统输出波形如图 7 所示, 其中上图是系统输出的时域波形, 相比图 6 中上图, 信号时域波形基本恢复; 下图是系统输出的频域波形, 在 $f=1.25$ 处明显存在一个谱峰, 同时还有二次谐波存在。因为正常人的脉搏频率范围为 60—100 次 /min, 大约在 1—1.7 次 /s 之间。故脉搏频率为 1.25 Hz, 即是所要检测的脉率, 而检测到的二次谐波是由采集系统的噪声干扰造成的。

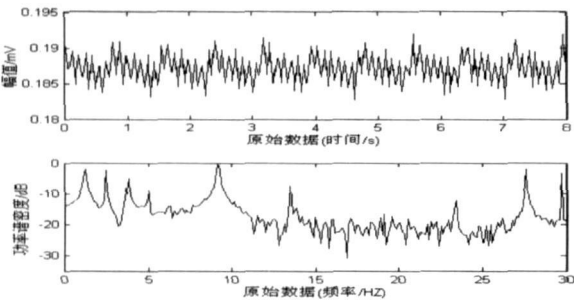


图 6 原始数据时域及频域波形
Fig. 6 Time domain and frequency domain waves of original data

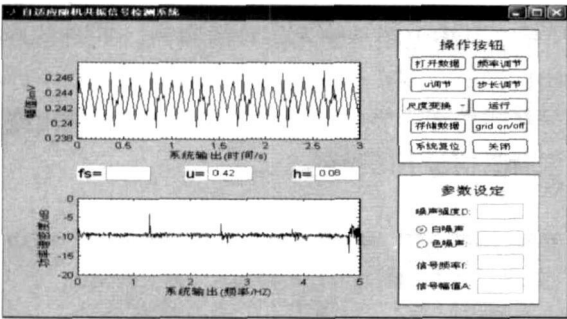


图 7 自适应随机共振系统对数据处理后的信号时域和频谱分析波形
Fig. 7 Time domain and frequency domain waves of data processed by self-adjusted SR system

本系统不仅用于上述的脉率检测，还对实验室采集的电机故障信号进行处理，试验结果表明本系统对弱信号具有良好的检测效果，系统具备处理实际采集数据的能力，具有实际应用价值。

5 结论与展望

本文全面分析了各个参数对随机共振的影响，

提出了自适应随机共振信号检测系统的方法及整体构架，并用 MATLAB实现了该系统，试验结果表明本系统对弱信号具有良好的检测效果，具有实际应用价值。本系统具备以下特征：①本系统采用的是系统结构参数和步长因子的联合调节，检测性能比单独的调节 有明显优势。②求信噪比时，背景噪声选取信号附近的平均信噪比，见公式（3），有利于提高系统检测的稳定性。③测试平台中引入了色噪声，使仿真更接近实际数据处理，仿真结果表明 SR检测系统对色噪声有效。

此外，本文还存在一些有待改进的地方。如系统检测的实时性、可靠性及与其它检测方法相结合（如小波变换）以提高微弱信号检测的能力等方面有待进一步去研究。

参考文献:

[1] BENZI R, SUTERA A, VULPIANIA, The Mechanism of Stochastic Resonance [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1981, 14: 453—457
[2] 江波. 自适应随机共振系统和小信号检测方法的研究 [D]. 浙江大学, 2003
[3] 李强, 王太勇, 冷永刚, 等. 基于变步长随机共振的弱信号检测技术 [J]. 天津大学学报, 2006 39(4): 432—437
[4] 胡岗. 随机力与非线性系统 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1994
[5] 赵文礼, 郭丽红. 随机共振及其微弱信号的自适应检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2006 20(5): 22—25
[6] 丛玉良, 王宏志. 数字信号处理原理及其 MATLAB实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
[7] 冷永刚. 大信号变尺度随机共振的机理分析及其工程应用研究 [D]. 天津大学, 2004

Study and Design of Adaptive Stochastic Resonance Signal Detection System

LEI Weiyan¹, JIANG Xiaohua², ZHU Xuan³

- (1. Atmosphere Observation and Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China;
2. Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Meteorological Information Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China)

Abstract: An adaptive Stochastic Resonance (SR) signal detection system is studied and designed based on the MATLAB Numerical simulation and practical signal detection experiment results show that the detection effect is remarkable. The performance of the SR signal detection system with color noise inputs and parameters can be tested by the system. In addition, practical weak signals with noise interferences can be recovered both in time domain and its spectrum form.

Key words: stochastic resonance (SR); adaptive system; signal detection; MATLAB