

# 基于 DSP 的自适应随机共振微弱信号检测方法\*

焦尚彬<sup>1,2</sup> 寇 洁<sup>1</sup> 张 青<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理实验室 西安 710048)

**摘 要:** 随机共振是一种有效检测微弱信号的非线性方法,对它的研究和实现具有重要的工程应用价值。针对工业现场存在的背景噪声未知的高频微弱信号(不满足绝热近似理论条件)的随机共振检测问题,提出了基于参数补偿的自适应参数诱导随机共振方法,以系统输出信噪比作为适应度函数,将系统势垒与噪声强度大致相等时可产生最佳的随机共振效应作为知识,采用基于知识的粒子群优化算法来并行优化随机共振系统的参数。设计了基于 DSP 的自适应随机共振检测系统,实现了对信号的实时处理,并通过 ModbusRtu 协议将检测结果实时显示在触摸屏上,从而实现微弱信号的检测。

**关键词:** 参数诱导随机共振;知识的粒子群算法;自适应参数优化;DSP

**中图分类号:** TP274 TN911.23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Weaksignal detection with adaptive stochastic resonance based on DSP

Jiao Shangbin<sup>1,2</sup> Kou Jie<sup>1</sup> Zhang Qing<sup>1</sup>

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In nonlinear system, it is of great significance in engineering practice to achieve stochastic resonance, which is a nonlinear method used for weak signal detection. In view of the high-frequency weak signal with unknown background noise in industry field, the parameter-induced adaptive stochastic resonance based on parameter compensation is proposed. The system parameters are optimized by knowledge-based particle swarm optimization in parallel, which takes the output signal-noise-ratio of system as the fitness function and the property that stochastic resonance system produces the best resonance effect just when the intensity of noise approximately equals the potential barrier as the knowledge. Finally the adaptive stochastic resonance system based on DSP is designed, which can process the signals in real time. And the system can display the detection results in the touch screens in real time, realizing the weak signal detection successfully and completely.

**Keywords:** parameter-induced stochastic resonance; knowledge-based particle swarm optimization; the adaptive parameter optimization; DSP

### 1 引 言

随机共振(stochastic resonance,简称 SR)是非线性动力学中的一种反常规现象,其利用信号、噪声和非线性系统之间的协同作用,将噪声的部分能量转移给信号,从而起到放大待测有用信号、抑制背景噪声的作用。研究表明,通过改变噪声强度和非线性系统结构参数均可诱导 SR,但在工业现场进行微弱信号检测时,由于噪声未知且变化,调节系统结构参数比外加噪声更能方便的诱导随机

共振,故对参数诱导 SR 现象展开了深入研究<sup>[1-2]</sup>。由于受绝热近似理论条件的限制,传统 SR 只适合于低频( $f \ll 1$  Hz)微弱信号的检测<sup>[1]</sup>,但在实际工程中,待测信号频率远比 1 Hz 大得多,导致其应用范围受到了极大的限制。针对高频微弱信号的检测,学者们分别提出了二次采样<sup>[2-3]</sup>、调制、归一化变换<sup>[3]</sup>和参数补偿<sup>[4-6]</sup>的方法,综合考虑各种方法的优缺点,本文采用参数补偿的方法实现高频微弱信号的 SR 检测。

在工业现场的微弱信号检测中,待测信号和背景噪声

收稿日期:2015-08

\* 基金项目:陕西省重点科技创新团队(2013KCT-04)、陕西省自然科学基金(2015JM1039)项目资助

的相关信息通常都是未知的,这就要求 SR 系统必须结合噪声和信号的相关信息,自适应的调节非线性系统参数<sup>[7]</sup>,以实现相对较好的 SR 效应,从而检测出微弱有用信号。与遗传算法、线性随机搜索算法相比,粒子群算法<sup>[8]</sup>具有多变量并行优化、效率高的优点,具有极强的工程应用价值。迄今为止,大多数学者对 SR 的研究都停留在基于微机的软硬件平台的理论仿真阶段,与实际工程应用还存在一定的差距。针对目前随机共振发展的现状,本文认为随着嵌入式硬件平台的快速发展,将同时兼具自适应参数优化和采用参数补偿方法实时处理高频微弱信号能力的 SR 算法移植到嵌入式处理平台中,开发一种便携式检测仪器<sup>[9]</sup>,具有非常重要的工程应用价值。本文构建的自适应 SR 检测系统采用 TI 公司生产的 ADS7864 芯片对信号进行实时采集,利用 TMS320C6713 型 DSP 对信号进行自适应 SR 算法处理,人机接口采用触摸屏 TPK7062TX 显示检测结果信息。

## 2 随机共振原理

### 2.1 双稳随机共振

受微弱周期信号和噪声驱动的非线性双稳系统是研究 SR 现象时最常采用的非线性系统中的一种,其典型动力学模型可用具有双势阱性质的郎之万方程描述<sup>[10]</sup>:

$$dx/dt = -U'(x) + u(t) = ax - bx^3 + s(t) + \eta(t) \quad (1)$$

式中: $U(x)$ 为双稳系统势函数, $a, b$ 为系统参数,且 $a > 0, b > 0$ ,  $\Delta U = a^2/4b$ 为系统势垒高度, $x$ 为系统输出, $u(t)$ 为待测信号与噪声的混合信号, $s(t) = A\sin(2\pi ft)$ 为待测周期信号( $A$ 为信号幅值, $f$ 为信号频率), $\eta(t)$ 为均值为0,方差为1,强度为 $D$ 的高斯白噪声,满足:

$$\langle \eta(t) \rangle = 0, \langle \eta(t)\eta(t') \rangle = 2D\delta(t-t') \quad (2)$$

### 2.2 输出信噪比指标

如文献[10]所述,SR 系统的输出信噪比(SNR)经常用来衡量 SR 效应,其定义为待测信号功率与背景噪声功率的比值,单位为分贝(dB),具体计算方法为:对输出信号 $x$ 进行 $N$ 点傅里叶变换,得到 $X(K), K=0, 1, 2, \dots, N-1$ ,取( $f_s$ 为采样频率),则待测信号功率为 $X(K_0)$ ,背景噪声功率为除去 $K_0$ 处的平均功率,如式(3)所示:

$$SNR = 10\lg \frac{P_s(\omega_0)}{P_N(\omega_0)} = 10\lg \frac{|X(K_0)|^2}{\left(\sum_{K=0}^{N-1} |X(K)|^2 - |X(K_0)|^2\right)/(N-1)} \quad (3)$$

### 2.3 参数补偿随机共振

根据绝热近似和线性响应理论可知,当 SR 系统输入为高频信号时,系统的非线性响应就开始发挥作用,不能满足 SR 理论的限制条件。这使得 SR 只适合于检测低频( $f \ll 1$  Hz)信号。针对高频信号的 SR 检测,采用参数补偿 SR,原理如下:

将 $s(t) = A\sin(2\pi ft)$ 代入式(1),并两边同时对 $t$ 积分可得系统输出为:

$$x(t) = \int [ax(t) - bx^3(t) + A\sin(2\pi ft) + \eta(t)] dt = \int [ax(t) - bx^3(t)] dt + \int A\sin(2\pi ft) dt + \int \eta(t) dt = \frac{a}{2}x^2 - \frac{b}{4}x^4 - \frac{A}{2\pi f}\cos(2\pi ft) + \int \eta(t) dt \quad (4)$$

从式(4)第二项可以看出,待测信号 $s(t)$ 经过双稳态系统后,其幅值 $A$ 会变为原信号的 $1/(2\pi f)$ ,当 $f \ll 1$ 时,则 $1/(2\pi f) > 1$ ,使得输入信号幅值 $A$ 得以放大。当 $f > 1$ 时,则 $1/(2\pi f) < 1$ ,使得输入信号幅值 $A$ 被缩减,且输入信号的频率 $f$ 越大,被削减的程度越大,这样高频信号即使经过双稳系统的处理,输出信号中也无法发现高频信号的存在。因此,可以在朗之万方程中加入一个放大环节 $K$ 来抵消阻尼项(积分环节)的影响。加入放大环节后的朗之万方程变为:

$$dx/dt = K[ax - bx^3 + s(t) + \eta(t)] = K[ax - bx^3 + A\sin(2\pi ft) + \eta(t)] \quad (5)$$

式中: $K$ 为补偿参数,当 $K$ 的取值为 $2\pi f$ 时,输入信号经过双稳系统后幅值 $A$ 不变,为了取得相对较好的检测效果, $K$ 的取值须大于 $2\pi f$ ,使得系统输出中原待测信号的幅值 $A$ 得以放大;其他参数含义不变。

## 3 自适应随机共振

### 3.1 基于知识的粒子群优化算法

粒子群优化算法<sup>[11]</sup>(particle swarm optimization, 简称 PSO)是一种新型智能全局优化算法,源于对鸟群捕食行为的研究。在 PSO 中,把优化问题的解看成搜索食物的鸟,即粒子。每个粒子都由被优化函数决定其适应度值,由速度决定其飞行方向和距离。PSO 首先随机初始化一个由若干粒子组成的种群,每个粒子通过跟踪自身找到的最优解和种群找到的最优解来更新自己,逐代搜索,直至最后找到最优解。

PSO 算法的数学描述:假设在一个 $D$ 维解空间有一个由 $N$ 个粒子组成的种群, $t$ 时刻种群中第 $i$ 个粒子的位置和速度分别为 $\mathbf{X}_i(t) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 和 $\mathbf{V}_i(t) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ , $t$ 时刻粒子本身找到的最优解和整个种群找到的最优解分别为 $\mathbf{P}_i(t) = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ 和 $\mathbf{p}_G(t) = (p_{G1}, p_{G2}, \dots, p_{GD})$ ,其中 $t$ 表示当前进化代数。一旦粒子找到两个最优解时,就会按式(6)和式(7)更新所有粒子的飞行速度和位置。需要注意的是所有粒子的飞行速度和位置都必须限定在所设定的范围内,当粒子的飞行速度或者位置超过该范围则被限定为相应的边界值。

$$\mathbf{V}_i(t+1) = \omega \times \mathbf{V}_i(t) + c_1 \times r_1 \times (\mathbf{P}_i(t) - \mathbf{X}_i(t)) + c_2 \times r_2 \times (\mathbf{P}_G(t) - \mathbf{X}_i(t)) \quad (6)$$

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \mathbf{X}_i(t) + \mathbf{V}_i(t+1) \quad (7)$$

式中:  $c_1, c_2$  为学习因子, 文中取  $c_1 = c_2 = 2$ ;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  之间均匀分布的随机数;  $\omega$  为惯性权重, 为了兼顾全局与局部搜索能力, 本文采用线性递减权重策略, 如下所示:

$$\omega(t) = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times t}{I_{\max}} \quad (8)$$

式中:  $\omega_{\min}, \omega_{\max}$  分别为惯性权重  $\omega$  的下限值和上限值,  $I_{\max}$  表示算法的最大进化代数。

如文献[16]所述, 本文将 SR 系统产生最佳共振效应时势垒与噪声强度大致相等这一特性作为知识, 结合粒子群优化算法, 实现快速自适应 SR。

### 3.2 自适应随机共振流程

由于几乎所有的学者都研究了基于 SR 的低频 ( $f \ll 1$  Hz) 微弱信号检测, 而实际工程现场待测信号大部分都是高频 ( $f \gg 1$  Hz) 微弱信号, 因此本文不再赘述低频微弱信号的 SR。

高频微弱信号的自适应 SR 算法步骤如下所述:

1) 补偿参数  $K$  的选取。根据待测信号所处的大致频段选取合适的补偿参数  $K$ , 则根据式(5)可知相应的输入混合信号幅值扩大了  $K$  倍。

2) 含噪信号噪声强度的估计。将幅值扩大  $K$  倍的含噪混合信号当作仅有噪声处理, 估计噪声强度为  $D = \sigma^2 \Delta t / 2$ , 其中  $\sigma^2$  为噪声方差估计值,  $\Delta t$  为采样步长, 即采样频率的倒数。

3) 种群初始化。根据不同的补偿参数  $K$  设置系统参数  $a, b$  的搜索范围, 设置种群数量  $M$ 、最大进化代数  $I_{\max}$ , 学习因子  $c_1, c_2$ 、惯性权重  $\omega$  的上下限  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$ 、最大飞行速度  $V_{\max}$ 。随机初始化一组粒子组成一个种群, 并初始化粒子的飞行速度。

4) 个体适应度值评价。粒子群算法是根据个体粒子的适应度值来调整搜索能力的。本文采用输出信噪比作为适应度函数和目标优化函数。在个体适应度值评价过程中, 融入随机共振的相关特性, 对于个体粒子的势垒超出设定范围的, 直接将个体粒子的适应度值赋零, 这样可以省去多次快速傅里叶变换(FFT)和龙格库塔算法的计算, 大大减少了运算时间。 $\Delta U$  的设定范围为  $(0.01D, 5D)$ 。

5) 进化更新。利用式(6)和式(7)更新所有粒子的飞行速度和位置。

6) 终止条件判断。当进化代数达到所设定的最大进化代数  $I_{\max}$  时, 迭代停止。

## 4 基于 DSP 的自适应随机共振系统

自适应随机共振检测系统硬件平台以 DSP 为核心, 主要包括 A/D 转换部分、存储部分、通信部分和显示部分。DSP 主要完成 FFT 和自适应随机共振算法。A/D 转换芯片完成对待测信号的实时采集, 并实时转换成数字信号。数据存储部分包括片内 RAM 和外部存储器

SDRAM, 其中 DSP 通过外部存储器接口 EMIF 连接外部存储器 SDRAM。人机接口采用基于 RS232 接口串口芯片, 利用 ModbusRtu 协议<sup>[12]</sup>实现与触摸屏的通信。系统硬件核心结构如图 1 所示。

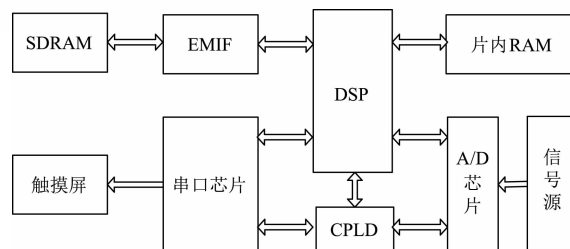


图 1 检测系统硬件结构

### 4.1 硬件构成

#### 4.1.1 DSP 最小系统

系统微处理器采用 TI 公司的高性能 32 位浮点 DSP: TMS320C6713。其主频最高可达 225 MHz, 提供每秒高达 13.5 亿万次浮点运算, 每秒执行 18.00 亿指令。TMS320C6713 芯片内核是 Veloci TI 结构, 可在 8 个功能单元内同时处理 8 条 32 位指令。由于自适应随机共振系统中需要多次计算式(3)、(6)、(7), 并且存在大量的 4 阶龙格库塔算法和 FFT<sup>[13]</sup>, 对算法的快速性要求较高, 选用 TMS320C6713 作为处理器, 能够满足算法对数据处理的要求。

系统的存储部分包括 192K 的片内 RAM 和 64M 的片外 SDRAM。其中片内 RAM 地址范围为 00000000 ~ 0002FFFF。DSP 访问片外存储器必须通过 EMIF, TMS320C6713 将容量为 64 M 的整个外部空间分为 4 个独立的空间 CE0 ~ CE3, 可以进行不同的访问控制。

#### 4.1.2 数据采集

系统的数据采集模块利用 TI 公司生产的 A/D 转换芯片 ADS7864。该芯片是快速 6 通道全差分输入的双 12 位 A/D 转换器, 其最大采样频率可达 500 kHz, 系统中通过设置定时器中断时间实现采样频率的调节。利用 ADS7864 的 3 根命令线 HA、HB 和 HC 由高电平向低电平的跳变来分别控制对应 3 组通道 A0 和 A1、B0 和 B1、C0 和 C1 信号的 A/D 转换。同时, 由于 ADS7864 输出数据线的高电平为 5 V, 而 TMS320C6713 的高电平为 3.3 V, 因此在 DSP 和 ADS7864 的数据线之间加入了兼容 5 V 和 3.3 V 的芯片 74LVTH16245。

#### 4.1.3 人机接口与串口通信

系统采用 TPC7062TX 触摸屏来实现检测结果的显示和人机交互, DSP 与触摸屏通过串口通信接口采用 ModbusRtu 通信协议实现通信, 串行异步通信控制芯片采用 TI 公司生产的 TL16C550。由于驱动电路主要由 MAX232 芯片实现 DSP 输出的 0 ~ 3.3 V 电平转换成异步串口电平, 而 MAX232 为 +5 V 电平, 所以同时利用 TL16C550 在 DSP 与 MAX232 之间实现了 3.3 V 至 5 V 的电平转换, 简化了硬件接口电路连接。具体连接如图 2 所示。

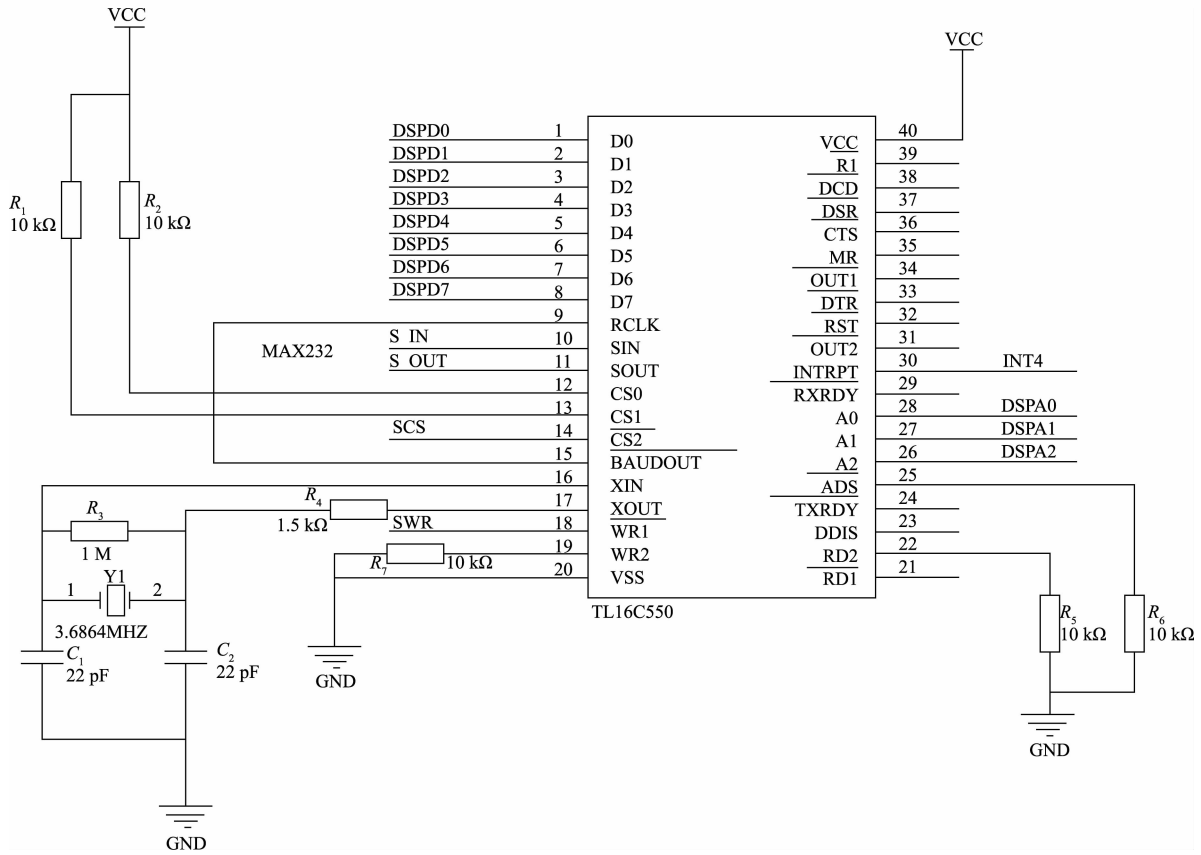


图2 TL16C550 硬件电路

#### 4.1.4 CPLD 译码

系统采用 XILINX 公司生产的 XC95144XL 进行地址译码实现 AD 芯片 ADS7864 和异步串口通信芯片 TL16C550 的片选信号及相关控制寄存器的选择。

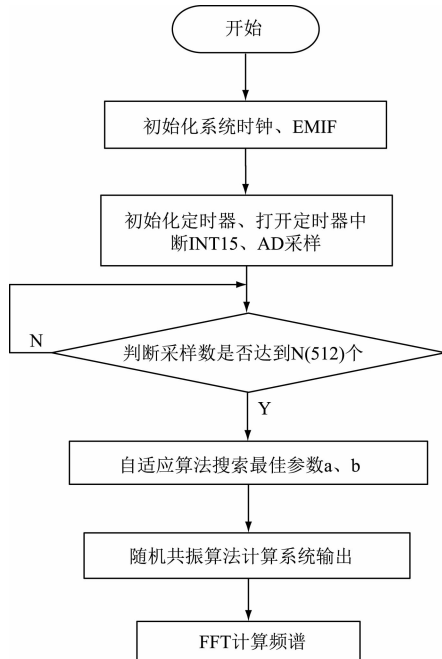


图3 自适应随机共振算法

#### 4.2 软件设计

软件主要包括信号采集、自适应随机共振算法和 DSP 与触摸屏之间 ModbusRtu 通信协议,其程序流程分别如图 3、图 4 所示。

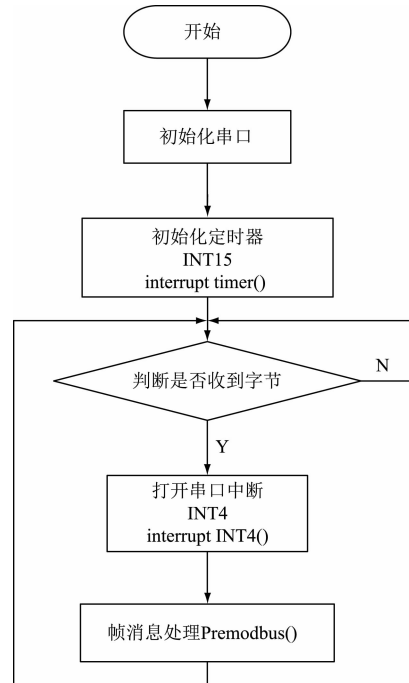


图4 通信程序流程

## 5 实验验证

针对开发的检测系统,利用信号源产生待测信号和背景噪声分别为:  $s(t) = A\sin(2\pi ft)$ ,  $\eta(t)$ 。其中信号幅值  $A=0.2475$  V,信号频率  $f=39$  Hz,噪声幅值  $D=1.65$  V。设定程序采样频率  $f_s$  为 5 000 Hz,采样点  $N$  取 512。随机共振补偿参数  $K$  取  $1\ 000 > 2\pi f$ 。利用自适应随机共振检测系统对待测信号进行检测,在触摸屏上得到的检测结果如图 5 和图 6 所示,其中纵坐标代表幅值,横坐标代表时间。图 5 中上图为噪声信号与待测微弱信号的混合时域图,从图中可以看出待测微弱信号完全被噪声所淹没,无法得到待测微弱信号的时域信息。将该混合信号作为输入信号送入非线性双稳态系统中,通过自适应随机共振系统自动调节系统参数得到的系统输出时域图如图 5 中下图所示,从图中可以发现系统输出时域波形不再杂乱无章的,而呈现出一定的周期性。

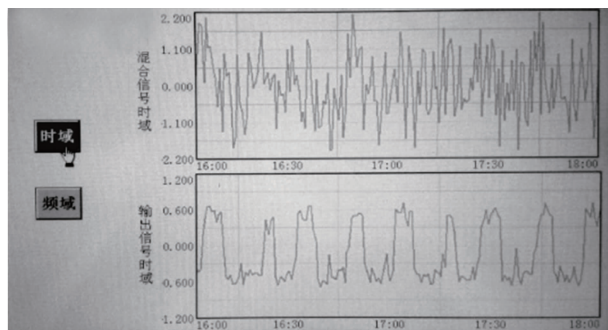


图 5 系统输入混合信号时域图和系统输出时域图

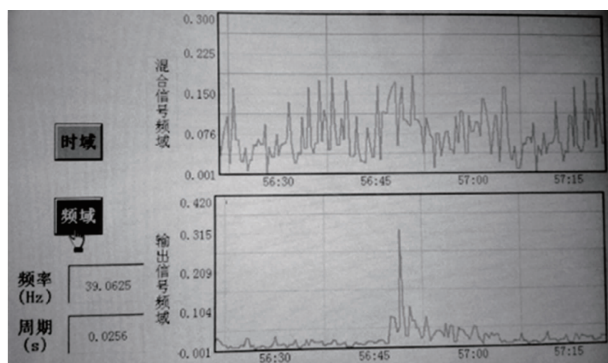


图 6 系统输入混合信号频域图和系统输出频域图

对该混合信号进行 FFT 得到其频域图如图 6 中上图所示,从图中也无法得到输入信号的频率信息。对随机共振系统输出进行 FFT 得到的频域图如图 6 中下图所示,从图中可以清晰的看到一个明显的尖峰,该尖峰所对应的频率显示在图 6 左下侧,即该尖峰对应的频率为 39.0625 Hz,与待测微弱信号的频率大致相等。上述实验说明所设计的自适应随机共振系统能有效地检测到待测微弱信号。

## 6 结论

结合微弱信号检测的实时性和自适应性要求,充分利用 DSP 的高速数据处理能力,设计了基于 DSP 的参数补偿自适应随机共振检测系统,采用基于知识的粒子群优化算法对非

线性系统参数进行同步优化,从而获得相对较好的随机共振效应,进而实现现场微弱信号的实时检测与处理。实验室实验验证了所研究方法及硬件平台的有效性,为基于随机共振的故障诊断便携设备的工业应用奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 陈敏,胡芑庆,秦国军. 外加信号增强随机共振在微弱信号检测中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(3): 109-112.
- [2] 冷永刚. 基于 Kramers 逃逸速率的调参随机共振机理[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5196-5200.
- [3] 杨定新,胡政,杨拥民. 大参数周期信号随机共振解析[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 080501.
- [4] 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, 2014, 50(5): 221-226.
- [5] JIANG D, SHAN Y, WANG D Y, et al. Research on magnetic levitation absolute vibration measurement method in vehicles[J]. Instrumentation, 2014, 1(2): 38-49.
- [6] 焦尚彬,任超,黄伟超,等.  $\alpha$  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): 26-35.
- [7] 赵文礼,田帆,邵柳东. 自适应随机共振技术在微弱信号测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1787-1791.
- [8] 陈仁文,朱霞,徐栋霞,等. 基于改进型粒子群算法的卡箍直径检测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1837-1840.
- [9] 徐春生,王太勇,冷永刚,等. 基于 SOC 和 FPGA 的便携式变步长随机共振仪[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1767-1771.
- [10] 陶志颖,鲁昌华,查正兴,等. 基于单势阱随机共振的多频周期微弱信号检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2): 171-176.
- [11] 焦尚彬,李鹏华,张青,等. 采用知识的粒子群算法的多频微弱信号自适应随机共振检测方法[J]. 机械工程学报, 2014, 12(50): 1-8.
- [12] 单星,林晓焕,郭丹蕊,等. 基于 ModBus 协议的负载模拟系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(7): 72-74.
- [13] 袁琪,杨康,周建江,等. 大点数 FFT 算法 C6678 多核 DSP 的并行实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 74-80.

## 作者简介

焦尚彬,男,1974 年出生,博士,教授,主要研究方向为非线性控制、智能状态监测等。

E-mail: jsbzq@163.com

寇洁,女,1991 年出生,硕士研究生,主要研究方向为随机共振。

E-mail: 1248827811@qq.com