

## 基于信号包络分析的并行微弱信号检测算法

刘磊, 范铁生\*, 王银斌, 李智慧, 唐春鸽

(辽宁大学 信息学院, 沈阳 110036)

(\*通信作者电子邮箱 fts0@lnu.edu.cn)

**摘要:**针对目前微弱信号检测主要利用相关运算检测已知参数的周期信号是否存在, 算法复杂、通用性不强的问题, 从数学形态学的角度出发, 提出一种基于信号包络分析的并行微弱信号检测算法, 通过局部运算性能良好的凸点筛选, 逐级提取信号的包络, 最终的高级包络收敛于多个信号的峰值位置。算法不需要被检测信号的先验知识, 对高斯噪声有很好的抑制作用。在信噪比为 -10 dB 的仿真实验中, 算法依然保持较好的检测效果; 实测数据显示, 算法具有较好的微弱信号检测性能。

**关键词:**微弱信号检测; 欠采样与过采样; 凸点检测; 包络分析; 并行运算

**中图分类号:** TN911.23 **文献标志码:** A

### Parallel weak signal detection algorithm based on envelope analysis

LIU Lei, FAN Tie-sheng\*, WANG Yin-bin, LI Zhi-hui, TANG Chun-gue

(College of Information, Liaoning University, Shenyang Liaoning 110036, China)

**Abstract:** The most commonly used technology in weak signal detection is using correlation operations to detect whether a known periodic signal exists; however, it is always very complicated and cannot be applied widely. To solve this problem, an envelope analysis based algorithm was proposed from the perspective of mathematical morphology. In this algorithm, salient points were selected from low level envelope to form a higher level envelope of the signal, and finally it converged at the peak position of every target signal in parallel. No priori knowledge about the target signal was needed here and it was also less sensitive of white Gaussian noise. This algorithm is effective in the simulation with signal-to-noise ratio of -10 dB, and the measured data demonstrate that it is good at detecting weak signal.

**Key words:** weak signal detection; under-sampling and over-sampling; salient point detection; envelope analysis; parallel computing

## 0 引言

微弱信号检测在语音活动检测、声源定位、语音增强、自动控制、地质灾害监测、灾后搜救等工程应用中具有重要的现实意义。目前的微弱信号检测算法, 不论是在时域、频域或者时频域, 其算法的核心主要围绕以下三方面<sup>[1-2]</sup>展开:

1) 信号相关运算: 这类算法的研究开展得比较早, 算法相对成熟, 主要分为自相关运算与互相关运算两类方法, 是基于周期信号的各段周期内信号的相关性(自相关), 或者阵列信号(不必须是周期信号)之间的相关性(互相关), 与白噪声信号的任何采样点之间不相关这一统计特性上的差别, 来达到检测和增强微弱信号的目的。这类算法在研究进展上, 通过提高相关运算的重数来提高算法的性能<sup>[3]</sup>, 但是, 仍只局限于周期信号的检测。

2) 基于噪声去除的检测算法: 目前比较成熟的基于小波分析的微弱信号检测算法<sup>[4-5]</sup>, 和近些年兴起的基于独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)的信号盲分离算法<sup>[6-7]</sup>, 在本质上都属于通过去噪来分离目标信号从而检测微弱信号的方法。这类方法的性能通常比较优越, 但是, 前者往往需要经过多层分解(这种多层分解与本文提出的迭代

算法在运算上有本质的不同, 它不具有运算局部性, 而是需要整段的数据参与计算, 因而不太适合流水线式的并行处理), 并且对于结合了蚁群算法等智能算法的性能较好的自适应滤波算法, 运算量会比较大<sup>[4]</sup>, 并会因为选取的小波基的不同, 检测效果也会有所差异; 而基于 ICA 的微弱信号检测算法, 要求输入的信号是阵列信号, 并且信号中必须有、并且只能有一个符合高斯分布的信号<sup>[7]</sup>, 适用范围受到诸多限制。

3) 基于随机共振的检测算法: 这是一类新兴的非线性系统微弱信号检测算法, 利用类似于物理中的共振现象来检测目标信号是否存在。这类算法利用噪声来增强并检测较低信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)下的微弱信号, 但是同样只能检测已知波形的周期信号是否存在, 虽然性能优良, 但对参数的要求比较严格, 通用性较差, 算法还不够成熟<sup>[1,4,8]</sup>。

除了上述的三类微弱信号检测算法外, 许多学者另辟蹊径, 同样取得了不错的检测效果。Gardner 等<sup>[9]</sup>利用信号和噪声的频谱幅度的起伏特性差异来检测信号, 对于频谱幅度起伏较小的窄带信号具有较好的检测能力; 在此基础上, 马启明等<sup>[10]</sup>结合非线性后置处理的思想, 实现了目标信号的频谱在频段间的幅度起伏小于阵列噪声的频谱幅度起伏的信号的检测。河北工业大学的研究人员一直致力于基于数学形态学滤波

收稿日期: 2012-01-12; 修回日期: 2012-03-01。

**作者简介:** 刘磊(1986-), 男, 辽宁阜新人, 硕士研究生, 主要研究方向: 信号处理、声源定位、数字图像处理; 范铁生(1955-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 主要研究方向: 语音信号检测、声纹识别、数字图像处理; 王银斌(1986-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 信号处理、图像融合; 李智慧(1987-), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字信号处理、数字图像处理; 唐春鸽(1986-), 女, 山东威海人, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字信号处理、数字图像处理。

波的语音信号处理方法的研究,近些年来成果不断<sup>[11-12]</sup>,比较典型的有王光艳等在文献[12]中对正负脉冲噪声的滤除方面所做的研究。

在研究了现有的微弱信号检测算法的基础上,从数学形态学的角度出发,提出一种基于信号包络分析(Envelope Analysis, EA)的、具有良好的运算局部性和全局收敛性的(可收敛于多个有效峰值点)、适合流水线式处理器组并行处理、具有明确物理意义的时域微弱信号检测算法。算法对采样频率的高低没有限制,不需要被检信号的先验知识,并且对信号是否有周期性没有要求,因而通用性更强。使用实测的低信噪比的微弱声音信号数据对算法进行验证,得到了较为理想的检测效果。

## 1 基于信号包络分析的微弱信号检测算法

### 1.1 信号的凸点与包络

本文对信号的凸点与包络作如下的定义:

**定义1** 信号的凸点。在信号采样点的幅值经取绝对值处理后,幅值的绝对值大于其左右紧邻的两个采样点的均值的某个不小于1的倍数的采样点,称为信号的凸点。

若用  $x_n$  表示离散信号中第  $n$  个采样点的幅值的绝对值,则,如果有

$$x_n > th \cdot (x_{n-1} + x_{n+1})/2 \quad (1)$$

其中  $th \geq 1$  称为凸点决策阈值,则称  $n$  为信号的一个凸点。

**定义2** 信号的包络。由信号的凸点组成的集合,称为信号的包络。即有

$$envelope = \{n | x_n > th \cdot (x_{n-1} + x_{n+1})/2\}$$

其中:  $1 \leq n \leq \text{leng}(\text{signal})$  ( $\text{leng}(\text{signal})$  表示离散信号的采样点数),  $x_0 = x_2, x_{\text{leng}(\text{signal})+1} = x_{\text{leng}(\text{signal})-1}, x_n \geq 0, th \geq 1$ 。

**定义3** 包络的级数。信号的0级包络为原始信号采样点幅值取绝对值;信号的第  $n+1$  级包络为第  $n$  级包络的凸点的集合,其中  $n \geq 0$ 。

由上面的定义看到,信号的凸点和包络是对信号轮廓的描述,物理意义十分明确,并且其计算具有良好的局部性(仅与紧邻的采样点有关),这就使得 EA 算法可随信号采集系统实时运行,而信号的高级包络计算可以通过流水线式的多级处理机并行处理,从而进一步提高算法的实时性。

### 1.2 基于包络分析的微弱信号检测算法原理

求包络(凸点)的过程,就是信号(包括背景噪声和目标信号)振幅的局部低值归0,局部高值保留的筛选过程,每一次迭代,保留的采样点只是原始信号采样点的一部分,迭代的次数越多,保留的采样点数目越少,并趋于更大运算范围内的多个局部的峰值点。而当求取的包络级数较高时,背景噪声会近似为直流信号,从而被归为0(直流信号的1级包络为0向量),而多个目标信号的最高峰将会凸现出来,由此可以得到(微弱)信号的峰值中心的近似位置。

基于包络分析的微弱信号检测算法无法用直接求信号的最大值或者求加窗信号的最大值的方法来替代,因为这两种方法都无法合理地处理运算(窗口)范围内除最大值以外的其他信号值。

### 1.3 欠采样与过采样和噪声信号的包络

把因为采样频率较低而导致的信号波形的表达粗糙、波动剧烈、失真较多的情况称为欠采样;把因为采样频率过高而使信号的波形被描述得过于细致,以至于背景噪声也表现出

有规律的波形特征的情况称为过采样。

图1、2分别是由计算机模拟的高斯白噪声信号和在实验室环境下,以44100 Hz采样频率、由动圈式麦克风采集的噪声信号及其傅里叶变换的频谱和信号的2级包络,分别对应欠采样与过采样情形,其中频谱图的频率分辨率为  $2\pi/1000$ 。

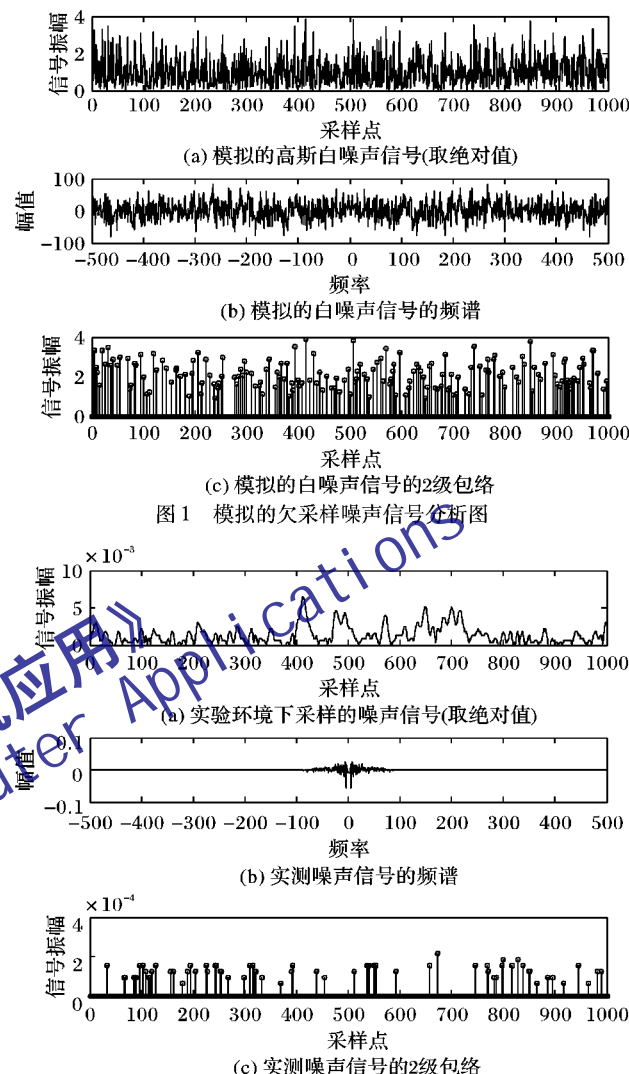


图1 模拟的欠采样噪声信号分析图

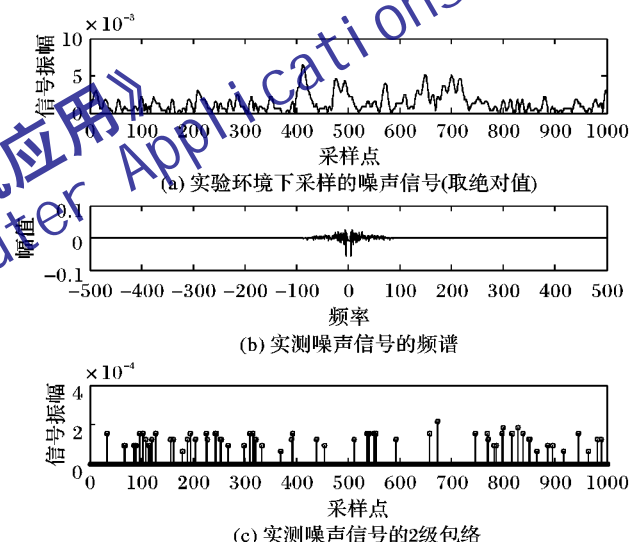


图2 实测的过采样噪声信号分析图

由图1可见,由计算机模拟的高斯白噪声是绝对杂乱无章的,其频谱没有明确的规律可循;但是,在图2中,由于信号的采样频率过高,背景噪声的采样点幅值分布表现出一定的规律性,其频谱已经不再是广谱的了,所以,很难在频域上将这样的噪声信号与非噪声信号区分开来。

但是,不论欠采样还是过采样,噪声信号的高级包络的波形都已经趋于平缓,都有着近似于直流信号的趋势,而直流信号的包络为0向量,因此,算法表现出良好的抑制噪声的能力。由此可见,包络分析对信号的采样频率无要求,通用性比较强。另外需要说明的是,在图2中,只有1000个采样点,由于相对于44100 Hz的采样频率,采样点数过少,所以直流的性质表现得不是非常明显,但是,采样点幅值的波动已经不是非常剧烈了。不难得出,如果采样点数目很多,并且求取更高级的包络,则噪声信号的直流性质会更加明显。

对于由于设备等原因造成的如图3所示的单个高振幅的采样点(本文中称之为“奇异点”),包络无法将其去除,相反,高级包络会收敛于奇异点,造成误检。但是,单个的奇异点对噪声信号的频谱却没有过多的影响(频谱的频率分辨率为

$2\pi/1000$ ),所以,可以结合频域分析的方法排除掉这些虚假的信号峰值中心。同理,单个的奇异点,也不会对目标信号的频谱产生过多的影响。

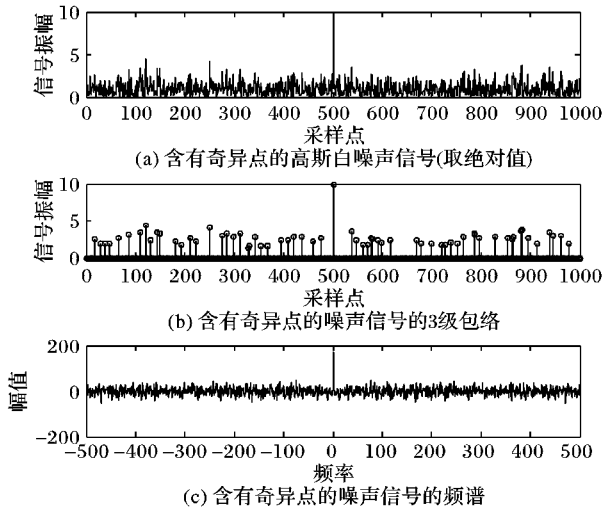


图3 含有奇异点的噪声信号的分析

之所以不直接对整段信号从头至尾使用频域分析的方法,是因为:首先,使用EA算法检测微弱信号是有效的,并且是并行的、快速的算法,而使用变换域的方法,会增加运算量,降低效率;其次,奇异点并不会在信号中经常性地出现,因此,只在必要时结合频域的方法判断,就可以在算法效率与检测精度之间达到最佳的效果。

#### 1.4 含噪信号的包络分析

图4对应信噪比 $SNR = 10 \log(S/N) = 30$ 时的含噪信号的包络分析,此时的信噪比处于一般的室内环境水平,图5对应 $SNR = -10$  dB(信号功率仅为噪声功率的 $1/10$ )时的低信噪比信号的包络分析。

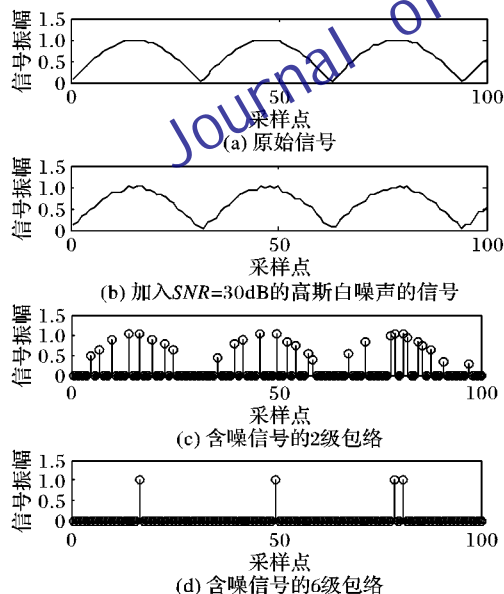


图4 一般信噪比的含噪信号包络分析

由实验结果可以看到,在一般的信噪比下,信号的中级包络基本可以再现原始信号的波形;而在较低信噪比的情况下,虽然信号的强度相对噪声十分微弱,但是,还是会对整段信号的包络产生影响,从而使含噪信号的中级包络基本可以反映原始信号波形的大致走向趋势,而在进行高级包络分析(4级)之后,可以对信号的峰值中心进行估计(低信噪比时,估计值有一定的偏差),证明算法是有效的。

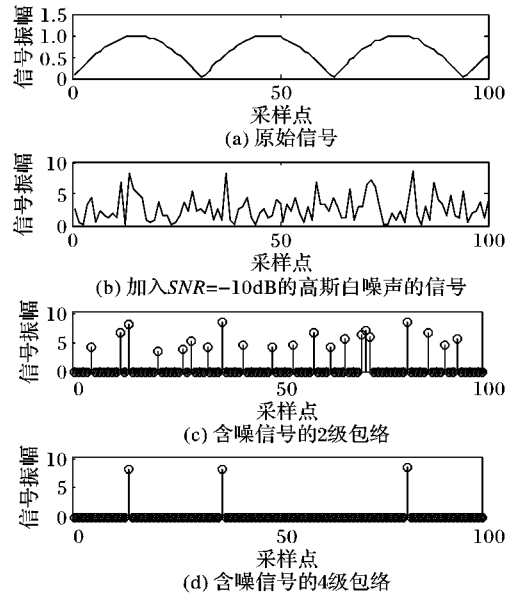


图5 低信噪比的含噪信号包络分析

## 2 基于包络分析的微弱信号检测实验

在实验室环境下,使用采样频率 $44100$  Hz,由动圈式麦克风测得4次拍巴掌的、声强逐渐降低的声音信号。由于声源位置与传声器的距离比较远,并且声源的响度也不高,人耳只能模糊地听到(而非听清)第一次拍巴掌的声音(当然,分辨能力因人而异)。利用EA算法估计目标信号的中心位置(峰值位置),使用不同的凸点决策阈值 $th$ ,检测结果如图6、7所示。由图可以看出,凸点决策阈值 $th$ 的大小对算法的收敛速度影响较大:当阈值过小时,如 $th = 1.0$ ,算法收敛的速度非常缓慢,检测信号中心所需的迭代次数很多,如图6所示,在求取了16级包络之后,算法虽然筛选了许多局部最小点,但仍然剩余47个采样点,仍没有明显的检测值出现(4级包络时剩余22679个采样点,8级包络时剩余3062个采样点,被测信号共计350000个采样点);而当阈值过大时,如 $th = 1.5$ ,算法的收敛速度有了明显的提升,如图7所示,2级包络剩余9182个采样点,4级包络剩余223个采样点,5级包络剩余4个采样点,但是,从4级包络到5级包络时的跨度很大,在5级包络时出现了漏检的情况,其中的最后一个估计值与第4次拍巴掌的声音信号的峰值中心距离相对较远。

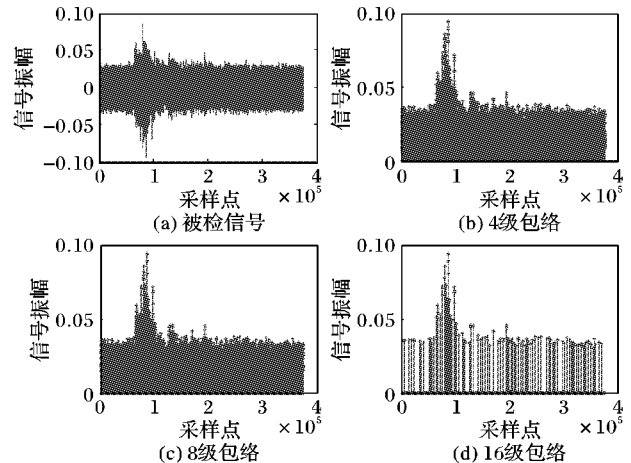


图6 凸点决策阈值 $th = 1.0$ 的检测结果

在本文的信号采样频率等实验条件下,大量实验证明,使用凸点决策阈值 $th = 1.1$ 是合理的,可以在收敛速度和误检率与漏检率之间达到最佳效果,如图8所示。由图8可见,在



使用凸点决策阈值  $th = 1.1$  时,经9级包络分析,算法成功收敛于4处峰值(前4个收敛点对应第1次拍巴掌信号,倒数第二个估计点对应第三次拍巴掌的中心偏左的位置,最后一个收敛点在非常微弱的第4次拍巴掌信号的中心附近)。其中,4级包络剩余5598个采样点,8级包络剩余41个采样点,9级包络剩余7个采样点。

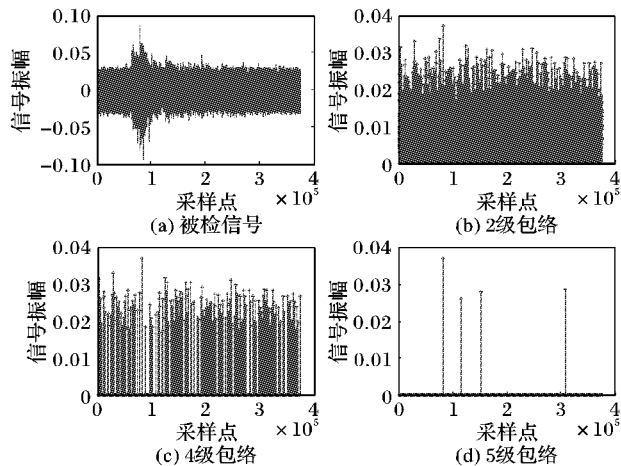


图7 凸点决策阈值  $th = 1.5$  的检测结果

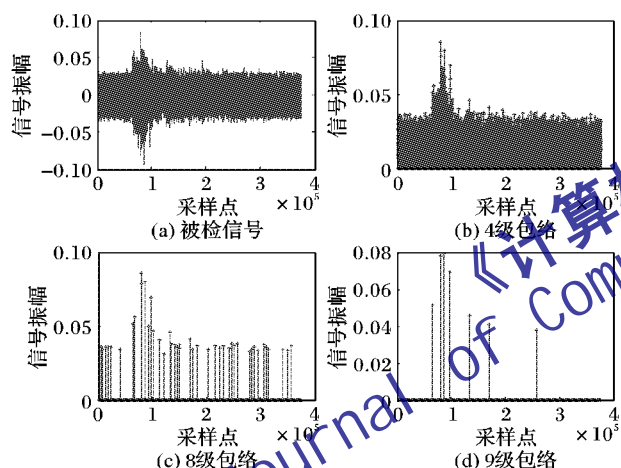


图8 凸点决策阈值  $th = 1.1$  的检测结果

关于凸点决策阈值  $th$  的选取,可以根据实际的应用场景或者已知的可能出现的声音信号的类型预先设定,也可以选用一个中等大小的固定值,当然,最安全的做法是选取  $th = 1$ ;对于求包络的迭代截止条件,可以根据非零幅值个数占整段信号的比例来设定;关于误检结果的去除,可以根据前文所述的结合频域分析的方法,看以收敛点为中心的一段信号是否具有非宽带噪声类型的窄带频谱来判断,而对于一些主峰值附近明显的低值,则可以直接设定一个阈值将其排除。

### 3 结语

EA微弱信号检测算法具有以下良好性能:

1) 算法的局部运算性好,适合多处理器并联的流水线式处理,在逻辑和硬件上都支持并行运算,在一级处理器上可以得到信号的1级包络,而当一级处理器只处理了部分采样点时,二级处理器便可以马上开始工作,求取2级包络,依此类推,从而达到实时的处理效果;

2) 在时域而非变换域处理,减少了计算步骤,从而可进一步提高算法的运算速度;

3) 算法最终会收敛到运算范围内的多个峰值,更适合多峰信号的检测,而不会陷入同一信号内的局部最优解的情况;

4) 可对任意信号检测峰值位置,而无需待测信号的先验知识。

但是,算法同样具有较高的误检率,并且如果凸点决策阈值选择不当,会造成漏检的发生,因此,有效的自适应阈值选择算法是值得深入研究的;如果将包络分析算法与频域分析的方法相结合,只在目标信号疑似出现的位置附近进行频域分析,可以减少运算量,从而提高整体的检测效率并降低误检率;微弱信号检测算法也可以作为其他算法的预处理步骤,以提高其他后续算法的运算针对性,从而提高其他算法的处理精度和效率,这种综合应用方式也是未来工作的重点之一。

### 参考文献:

- [1] 夏均忠,刘远宏,冷永刚,等.微弱信号检测方法的现状分析[J].噪声与振动控制,2011,31(3):156-161.
- [2] 章克来,朱海明.微弱信号检测技术[J].航空电子技术,2009,40(2):30-36.
- [3] 卢莉萍,李翰山.强噪声下微弱信号检测方法的研究[J].陕西科技大学学报:自然科学版,2011,29(3):66-70.
- [4] 储健.基于小波变换分析的微弱信号检测研究[J].通信技术,2008,41(8):17-19.
- [5] 张威,王旭,葛琳琳,等.一种强噪声背景下的微弱信号检测的新方法[J].计量学报,2007,28(1):70-73.
- [6] 孔薇,杨杰,周越.基于独立成分分析的强背景噪声去噪方法[J].上海交通大学学报,2004,38(12):1957-1961.
- [7] 杨晓阔,王曙钊,王峻,等.基于特征向量盲分离的多频微弱信号检测方法[J].传感技术学报,2008,21(8):1393-1397.
- [8] 梁军利,杨树元.一种基于非周期随机共振的微弱信号检测方法[J].微计算机应用,2007,28(11):1121-1126.
- [9] GARDNER S D, WAGSTAFF R A. DIET AWSUM: A fluctuation-based deconvolution technique for enhancing signal-to-noise ratio and resolution [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997, 22(1): 119-127.
- [10] 马启明,王宣银,杜栓平.基于频谱幅度起伏特性的微弱信号检测方法研究[J].电子与信息学报,2008,30(11):2642-2645.
- [11] 赵晓群,王光艳.汉语语音基音轨迹的形态学滤波和平滑[J].信号处理,2003,19(4):342,354-357.
- [12] 王光艳,赵晓群,王霞.基于数学形态学的非线性语音增强方法[J].计算机工程与应用,2006,42(34):53-56.

### 《计算机应用》征订通知

本刊以应用技术为主,内容丰富多彩,现审稿周期为1~2个月,发表周期为6个月。欢迎投稿,欢迎订阅。全国各地邮局均可订阅,也可直接从编辑部订阅。

邮发代号:62-110

定价:33元/册,全年396元/12期

通信地址:成都市(武侯区)237信箱

《计算机应用》编辑部

邮政编码:610041

电话:028-85224283(803)

传真:028-85222239(816)

联系人:雍平

开户名称:计算机应用杂志社

开户银行:交行成都市分行科分院支行

账号:511609017018001969114

作者优惠订刊活动详情请见:

<http://www.joca.cn/CN/column/item130.shtml>