

# 基于 RHC-7 水听器对液体中固体目标声波探测研究

耿春明, 石 祥

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**摘 要:**为了实现液体中微小固体目标在线探测,设计了基于 RHC-7 水听器采集系统探测液体中微小固体目标的新方案。探测系统利用脉冲激励瓶体产生混响声波, RHC-7 水听器浸入瓶内液体中采集声波,经 UTC1250VA 带通滤波器放大滤波后,对采集的混响声波信号进行 Mallat 多分辨率时频分析,分离提取微弱的探测目标信号。由于液体中固体目标粘滞声吸收和散射声吸收会影响水声信号的频谱分布,计算探测信号各频段频谱与基准信号的相关度,确定检测阈值,并作为识别瓶体中有无固体目标的指标。实验表明,该方法简单、实用,可实现探测一定尺度的悬浮和沉淀目标。

**关键词:**水听器;混响声波;脉冲激励;Mallat;相关度;检测阈值

**中图分类号:**TP216 **文献标识码:**A

## Design of Acoustic Detection System for Detecting Solid Target in Liquid Based on RHC-7 Hydrophone

GENG Chunming, SHI Xiang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to realize the on-line detection of micro solid targets in liquid, a new scheme of detecting micro solid targets in liquid based on RHC-7 hydrophone acquisition system was designed in this work. The bottle body produced the reverberation sound wave with the method of pulse excitation in detection system, which was collected and amplified by UTC1250VA amplifier system. The time-frequency analysis of the acoustic signal was carried out with the method of Mallat multi-resolution, then the weak target signal was separated and extracted. The detected solid target influenced the spectrum distribution due to the viscous sound absorption and scattering sound absorption, then the correlation between detection signal and the reference signal was calculated to determine the detection threshold, which was an effective method to identify solid target in liquid. The experimental results show that the acoustic detection system is not only simple and practical, but also can detect the certain scale of target of the suspension and precipitation in liquid.

**Key words:** hydrophone; reverberation sound wave; pulse excitation; Mallat; correlation; detection threshold

### 0 引言

目前,液体中微小固体目标的探测在浅海探测研究、食品液体中杂质检测和液压油相含率检测等领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。在浅海探测领域,刘永伟等对混浊海水声吸收特性进行了研究<sup>[3]</sup>,采用信号换能器发射声波,产生混响声源,研究水中悬浮和沉淀固体颗粒对混响声波吸收系数的影响,但实验繁琐,并未对液体中单一微小的固体目标进行探测。在酒业杂质异物探测领域,对于非透明瓶体酒业杂质检测大部分采用人工灯检法<sup>[4]</sup>,效率低,成本高。

因此,研发设计出更简易、安全和实用的探测设备,在浅海和酒业杂质检测等领域有重要的应用意义。

本文尝试采用脉冲激励瓶体探测液体中固体目标,而脉冲激励大多应用于工件材料缺陷检测和机床检测等领域,具有简便和快速等优点,由 20 世纪 80 年代的 Cawley 教授与 Adams 教授奠定<sup>[5]</sup>。但传统的脉冲激励锤都是非自动的,不具备多次激励的一致性,为了探测液体中的固体目标,需要以一组无固体目标的混响声波信号作为基准信号,因此每次脉冲激励要保证信号能量一致。文中设计了一个

收稿日期:2016-03-10

作者简介:耿春明(1964-),男,北京人,副教授,硕士生导师,博士后,主要从事固体质量流量测量、非接触光电测量及机电一体化等研究。  
E-mail:gengcm@buaa.edu.cn。

一致性良好的自动脉冲激振锤,作为激励瓶体产生混响声波信号源的设备。RHC-7 标量水听器能够检测到不同相之间的耦合作用以及多相体系与探头之间的相互作用,因此,可将其作为一种液体浸入式探测声波的传感器,用于采集水中的混响声信号<sup>[6-7]</sup>。本文以瓶体水中玻璃碎屑颗粒和悬浮棉絮等作为探测目标。由于水中固体目标对混响声波的粘滞吸收和散射吸收,从而影响声波的信号是频谱。文中采用了 Mallat 多分辨率小波变换提取强背景噪声下微弱特征信号,建立目标识别的检测阈,实现液体中微小目标的探测目的。

### 1 声波探测系统原理

本文采用 RHC-7 水听器声波采集系统探测液体中的固体目标,探测系统装置主要由自动脉冲激振器、继电器驱动电路、电磁推杆、灌装后的瓶体、RHC-7 标量水听器、UTC1250VA 前置放大器、USB7325 数据采集设备等组成,系统框架如图 1 所示。

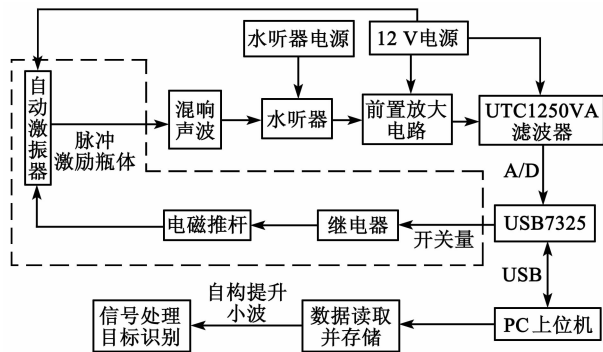


图 1 水听器探测固体目标系统框图

水声探测液体中固体目标原理如图 2 所示,当脉冲激振器给予瓶体脉冲激励后,瓶体会产生衰减的宽频带混响信号。引起混响声强衰减的原因主要是瓶体阻尼振动衰减,而混响声波在水中传播衰减原因可归纳为扩散损失和吸收损失两方面。当瓶体水中存在固体目标,会额外产生两种声吸收的机理<sup>[8-11]</sup>:粘滞吸收( $S_V$ )和散射吸收( $S_S$ )。探测瓶体边界属于非自由封闭边界,水听器接收检测的信号方程为

$$S = S_R + S_V + S_S + S_N \quad (1)$$

式中: $S_N$  为水听器自噪声(频率为 50 Hz 噪声信号); $S_R$  为脉冲激振瓶体产生的混响噪声,则水听器接收声波信号的信噪比为

$$S_N = \frac{S_V + S_S}{S_R + S_V + S_S + S_N} \quad (2)$$

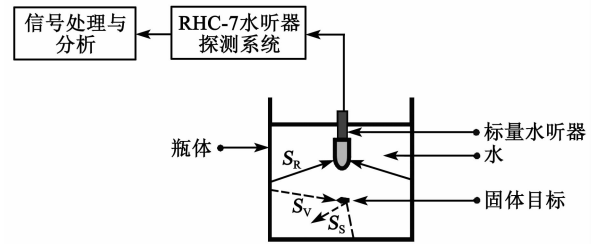


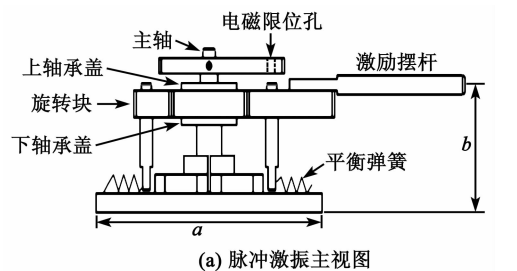
图 2 水声探测固体目标原理图

根据式(2),当信噪比大于水听器检测阈后才可探测瓶内液体中是否有固体目标。由于  $S_V$  和  $S_S$  影响水中声波信号的频域分布,通过多分辨率 Mallat 小波变换后提取目标特征信号,实现探测水中微小固体目标的有无,激振检测优点是方便、简单。

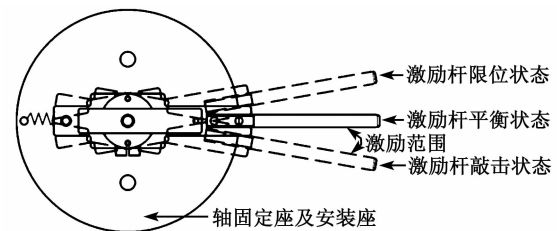
### 2 固体目标探测声波系统设计

#### 2.1 自动脉冲激振器

当探测瓶体水中固体目标时,以一组瓶中无固体目标的探测声波信号作为基准信号来判断其他探测信号是否有固体目标。本文通过限位设计出一个具备可重复性的自动脉冲激振器,如图 3 所示。脉冲激振器摆杆和轴之间通过 NSK605 轴承连接,轴承内、外圈六自由度固定,摩擦力均匀,每次敲击瓶体产生的能量一致性好。当 PC 电脑开启探测模式时,上位机通过 USB 向数据采集卡发出脉冲激振指令,数据采集卡 DO 口输出高电平控制继电器,实现电磁推杆动作,释放敲击杆后,完成激振器激励瓶体的任务并自动弹回,由于平衡弹簧每次被拉伸的角



(a) 脉冲激振主视图



(b) 脉冲激振器激振状态图

图 3 自动脉冲激振器

度一定,因此敲击能量一致性好,如图3(b)所示。激励杆有限位、平衡和敲击3个工作状态,瓶体需放置在激励杆激励范围内。

脉冲激励可近似成半正弦波,其频谱范围很大,可让瓶体产生宽频带频谱混响声波信号,如图4所示。激振产生的信号与材质有关,一般金属等材质激振的频带较宽,脉冲宽度较小,不同材质脉冲宽度及频率对应关系如表1所示。频带上限频率按频谱幅值下降-3 dB计算得到,频带越宽,探测固体目标效果越好<sup>[12-13]</sup>。本文采用不锈钢作为激振材料。

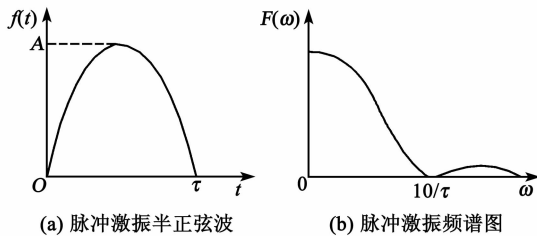


图4 半正弦波及频谱

表1 不同材料的激振特性

激振材料	脉冲宽度/ms	频率上限/Hz
钢铁	0.289	2 000
铝	0.322	1 800
尼龙	0.930	600
橡胶	3.670	160

### 2.2 RHC-7 水听器声波采集模块

RHC-7 型号的圆柱形标量无方向的水听器可实现水平 360°和垂直 240°无指向性目标探测,频率的方向性如图5所示。由图可看出,水听器在水平方向上,在各方向声强值均在第9圆环,方向性偏差几乎为0(见图5(a)粗线部分);在垂直方向上,有240°范围的声强值均在9环附近,偏差小于3 dB,而其他120°的方向范围探测具有指向性(见图5(b)粗线部分<sup>[14]</sup>)。当目标在垂直方向处于向上的120°范

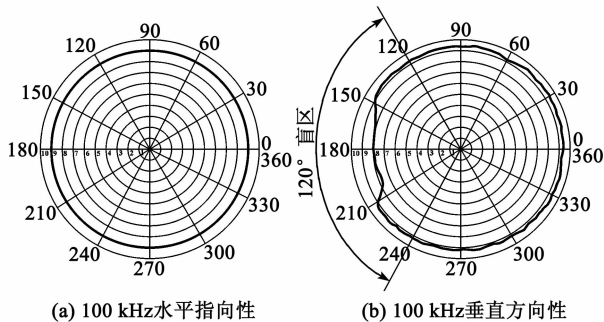


图5 RHC-7 标量水听器频率的方向性图

围内无法实现探测,即为探测盲区,如图6所示。在应用中,对于密度比水大的目标,水没过水听器的高度  $H > 0$ ;对于悬浮或漂浮目标,即  $H = 0$ ,可避免目标出现在盲区。

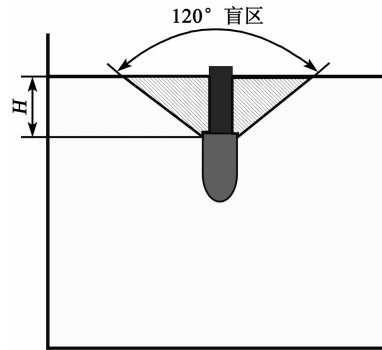


图6 RHC-7 标量水听器空间探测范围示意图

RHC-7 水听器采用压电陶瓷材料,根据压电效应,将水下声波信号转化成电信号。水听器电压灵敏度为-215 dB,工作频率为 20 Hz~160 kHz,线性工作频率为 1~100 kHz。检测精度  $M = -215$  dB,即

$$M = 20 \lg \frac{P_{\text{开路}}}{P_{\text{基准}}} \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{开路}}$  为电源开路时水听器检测的电压信号;  $P_{\text{基准}}$  为基准信号;将  $M$  和  $P_{\text{基准}} = 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$  代入式(3),可得  $P_{\text{开路}} = 10^{-10.75} \text{ V}/\mu\text{Pa}$ ,因此,水听器的灵敏度决定目标检测的精度。

### 2.3 前置放大电路和 UTC1250VA 滤波器

RHC-7 采集的声波电信号幅值很小,需前置放大电路对其电压信号进行放大处理,调整。对探测声波电压信号放大后,还需对其进行滤波处理。采用 UTC1250VA 带通滤波器,并根据水听器工作频率和探测要求,设定工作频率为 160 Hz~100 kHz,可以抑制过低和低频背景噪声信号,提高信噪比。前置放大电路和 UTC1250VA 带通滤波器均是 12 V 直流电压供电,信号滤波放大是软件分析和处理声波信号的基础。

### 2.4 USB7325 数据采集卡接口模块

USB7325 数据采集模块适用于提供了 USB 接口,便于和 PC 电脑数据通信,具有真正的热插拔、即插即用(PnP)功能。其驱动操作系统可选用 Windows 系列以及 Unix 多种操作系统,便于 PC 获取数据采集卡数据,并进行相应的分析。USB7325A 高速光隔离输入接口模块主要由多路模

拟开关选通电路、高精度放大电路、模数转换电路、光电隔离及 DC/DC 电路、先进先出 (FIFO) 缓冲存储器电路、开关量输入输出电路、定时/计数器电路和接口控制逻辑电路、供电电路等部分组成。本文为了保证信号不失真和信号缺失,数据采集频率为 100 kHz,采集长度为 8 192。

## 2.5 声波信号 Mallat 多分辨率分析

声波信号经数据采集卡通过 USB 与 PC 电脑通信,读取采集卡数字信号。由于待探测的声波信号是宽频带的混响声波信号,而 Mallat 快速小波算法是一种时频分析法,具有弹性的时频窗,因此可在低信噪比情况下分离出目标特征信号。本实验对探测信号采用多分辨率小波时频变换分析,分离重构出感兴趣频段的时域信号<sup>[15-16]</sup>,小波分解的快速算法定义公式:

$$\begin{cases} c_{j,k} \leq f(t), \phi_{j,k}(t) \geq \sum_{n \in Z} c_{j-1,n} h_{n-2k} \\ d_{j,k} \leq f(t), \phi_{j,k}(t) \geq \sum_{n \in Z} c_{j-1,n} g_{n-2k} \end{cases} \quad (k \in Z) \quad (4)$$

式中:  $f(t)$  为混响声波信号;  $c_{j,k}$  和  $d_{j,k}$  分别为分辨率  $j$  下的近似系数和细节系数;  $h$  和  $g$  分别为低通和高通滤波器;  $n$  为离散采样点数。其中,多采样率滤波器组低通  $h_k$  和  $g_k$  定义如下:

$$h_k \leq \phi_{j,0}(t), \phi_{j-1,k}(t) \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \int \phi\left(\frac{t}{2}\right) \phi^*(t-k) dt \quad (5)$$

$$g_k \leq \psi_{j,0}(t), \phi_{j-1,k}(t) \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \int \psi\left(\frac{t}{2}\right) \phi^*(t-k) dt \quad (6)$$

式中:  $\phi(t)$  为尺度函数;  $\psi(t)$  为小波函数;  $\phi^*(t)$  与  $\phi(t)$  共轭。

小波重构过程是小波分解的逆运算,重构公式为

$$c_{j,k} = \sum_{n \in Z} c_{j+1,k} h_{k-2n} + \sum_{n \in Z} d_{j+1,k} g_{k-2n} \quad k \in Z \quad (7)$$

根据探测目标信号特点,本文利用 db8 小波基函数,小波光滑性好,频域的局部化能力就越强<sup>[17]</sup>,可以较好地从小波混响声波信号中识别目标信号,从而实现目标信号特征提取。

## 3 实验结果与分析

在声波探测液体中固体目标实验过程中,脉冲激励瓶体需保证每次敲击的能量一致性。USB7325

数据采集卡采集时间为 100 ms,采集后截取的有效数据个数为 8 192 个,对于 10 mm 玻璃碎片大固体目标时域图如图 7 所示。由图可看出,由于固体目标的声吸收和散射吸收影响较大,使得声波衰减速度明显比无固体目标的基准声波衰减快一倍。

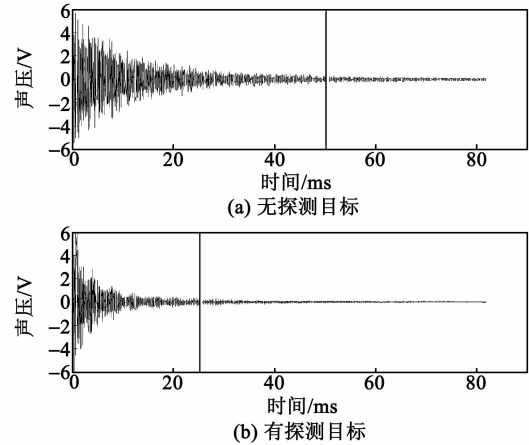
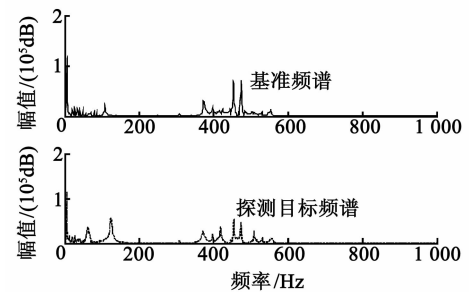
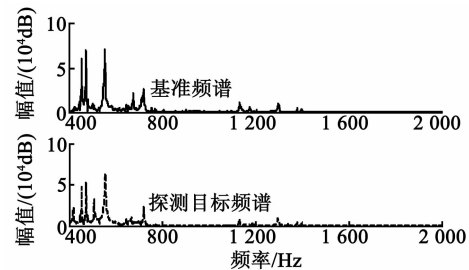


图7 对大固体目标探测和无目标探测的时域信号对比图

但对于约 2 mm 的探测目标,在时域上无法辨别有无目标。为了实现液体中更小固体目标特征信号的提取,对声波信号先进行尾声处理(时域信号从第 1 000 数据点开始截取),再进行 Mallat 分辨率为 3 分解和单支重构,将声波信号分解成 4 个频段的时域信号。以无固体目标的探测声波为基准声波,与一组水中有固体目标的探测声波信号两组信号经 Mallat 变换后,其各频段频谱与基准声波各频段频谱对照图如 8 所示。



(a) 第1频段探测频谱和基准频谱对比图



(b) 第2频段探测频谱和基准频谱对比图

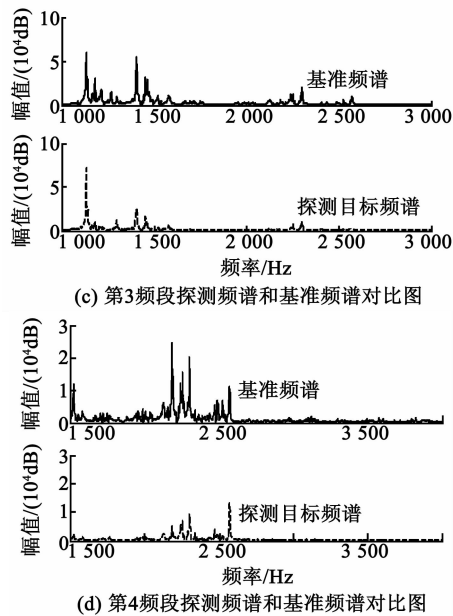


图8 探测目标声波信号各频段频谱与基准频谱对比图

由图8可见,因水中探测目标的对混响声波的粘滞吸收和散射吸收,影响了探测信号各频段频谱分布。有固体目标的探测信号各频段频谱幅值明显比无固体目标的频谱幅值小。以相关度作为探测有无目标的指标,对待检测信号逐层与基准信号进行相关度计算( $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ),再计算联合相关度 $\beta(\beta = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4)$ 。20组探测信号(水中有、无固体目标声波信号各10组)的相关度计算如图9所示,确定有无固体目标的检测阈值 $\alpha_{\text{阈值}} = (\alpha_{\text{无min}} + \alpha_{\text{有max}}) / 2 = 0.6475$ 。当待测信号的相关度高于0.6475,即为无探测目标;低于0.6475,即为有探测目标。

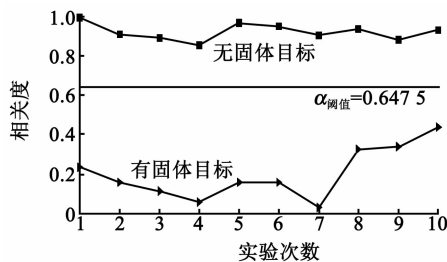


图9 20组实验数据相关度对比图

#### 4 结束语

文中设计的稳定性较好的自动脉冲激振装置,保证了脉冲激振的一致性,是探测液体中有无固体目标的基础。RHC-7标量水听器可以探测水平 $360^\circ$ 和垂直 $240^\circ$ 方向的声波信号,探测范围广,灵敏度高。通过前置UTC1250VA放大滤波器,对水听

器采集的微弱电压信号放大滤波,明显提高了探测信号的质量。电脑通过USB7325数据采集卡在线读取探测信号,并利用Mallat小波变换多分辨率时频分析探测目标信号,以相关度确定检测阈值,实现了液体中有无固体目标探测的目的。

#### 参考文献:

- [1] 朱进,章新华. 被动声呐目标识别技术的现状与展望[J]. 舰船科学技术, 2003, 25(5):55-58.
- [2] 孙绍晟,张林. 基于图像的牛奶细杂质检测算法研究与仿真[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(1):281-283.
- [3] 刘永伟,李琪,张超,等. 混浊海水声吸收的计算与测量研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 11:1472-1477.
- [4] 许林. 基于图像处理技术的瓶装液体体积及杂质检测技术算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008.
- [5] 郭冠华,林俊明,任吉林,等. 声振检测方法的发展[J]. 无损检测, 2011(2):35-41.
- [6] 刘伯胜,雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [7] 田坦. 声呐技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [8] 彭临慧,王桂波. 悬浮颗粒物海水及其声吸收[J]. 声学技术, 2008(2):168-171.
- [9] 彭临慧,王桂波. 中国近海悬浮颗粒物海水声波衰减[J]. 声学学报, 2008(5):389-395.
- [10] RICHARDS S D. The effect of temperature, pressure, and salinity on sound attenuation in turbid seawater[J]. J Acoust Soc Am, 1998, 103(1):205-211.
- [11] YAMAGUCHI T, MATSUOKA T, KODA S. Theoretical study on the sound absorption of electrolytic solutions II assignments of relaxations[J]. J Chem Phys, 2007, 127(6):064508/9.
- [12] 隋新,蒋玲,解中宁,等. 脉冲激振复合材料锤头及其力信号[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(5):546-548.
- [13] DOEBLING S, FARRAR C, PRIME M. A summary review of vibration-based damage identification methods[J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2):91-105.
- [14] 沈庆楼. 一体化标量水听器的设计[J]. 传感器与微系统, 2012(7):77-79.
- [15] MALLAT M. A theory of multiresolution signal decomposition: The wavelet transform[J]. IEEE Trans, 1989(7):674-693.
- [16] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [17] STEPIEN J, ZIELINSKI T P. Signal denoising using line-adaptive lifting wavelet transform[C]//S. I.: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001, 2:1386-1391.