

塔机防碰撞系统中远距离超声信号消噪的研究

寇雪芹, 谷立臣

(西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 根据塔机防碰撞系统远距离障碍物检测需要, 针对远距离超声目标检测时, 传统数字滤波对回波消噪后, 回波峰值位置有延迟以及远距离信噪比较低, 影响目标的检测和测距准确度. 提出利用小波改进的阈值函数消噪方法进行回波消噪. 仿真和实验结果表明: 基于改进阈值的超声回波消噪方法使回波峰值位置无延迟, 可以明显提高信噪比, 其去噪效果优于传统的数字滤波和小波的软、硬阈值消噪方法, 适用于远距离超声测量和目标有效检测.

关键词: 超声回波; 远距离超声测量; 小波阈值消噪; 信噪比

中图分类号: TN912.16

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0598-06

塔式起重机结构庞大, 塔机与周围障碍物碰撞, 会造成塔机事故的发生. 现有国内外塔机防碰撞技术特点是根据预先规划的工作区域限制塔臂的旋转范围来预防塔机事故的发生. 该方案主要存在的问题是需要人工预先设置工作区域, 只监测塔机自身运动状态来预防碰撞事故, 而不涉及周围障碍物的主动监测^[1].

超声传感技术是一种非接触式的检测手段, 与激光、雷达技术等相比, 具有较强的适应性、成本低廉、可靠性好等优点^[1], 已成功应用于机器人避障和汽车倒车防撞系统^[2]. 本文选用超声传感技术进行塔机主动防碰撞监测系统的分析与研究. 但目前市场上能见到的超声测距产品其有效测距范围普遍在 10 m 左右, 要将超声传感技术应用到塔式起重机防碰撞系统上, 其预警范围需要在 20 m 范围内^[1]. 因此, 研究超声传感器远距离测量和目标信息获取技术, 是准确探测塔机周围目标的基础和关键技术. 在远距离超声测量时, 由于空气的吸收损耗和几何扩散损失, 超声回波信号随着距离的变化, 信号幅度的波动很大. 远距离的超声回波信号很微弱, 回波等待过程中, 会混入大量杂散回波、收发电路的电噪声和声噪声干扰信号^[3]. 背景噪声较为严重时, 回波有用信息较为微弱, 系统难以识别目标有效回波信号的位置, 常常造成误判, 同时回波信号中含有大量目标的信息, 噪声还会影响对目标信号特征的提取. 因此必须选择合适的消噪技术, 抑制噪声的影响, 提高信噪比来有效检测目标和增强电路的测距能力.

实际应用中, 由于超声测距受环境因素影响较大. 在短距离测距时, 精度容易控制到毫米、厘米级, 远距离测距要到达相应精度, 则需要从系统结构以及算法设计上作较大的改进, 相应地增加系统和算法的复杂度. 目前超声测距所用的滤波方法以模拟带通滤波电路、软件数字带通滤波为主, 设计简单, 方法相对成熟^[4-5]. 但带通滤波属于频域滤波方法, 存在的缺点是: 滤波后信号会产生相对于原始信号的延时, 除去部分噪声信号的同时, 会丢失一部分有用的信息.

近年来兴起的小波去噪法是有效去噪方法之一, 用在信号去噪处理、图像压缩和故障诊断等活跃的研究领域. 目前, 小波消噪方法主要是采用 Donoho 提出的小波域阈值消噪算法, 其实现最简单、计算量最小, 所以其应用最广^[6]. 小波阈值去噪是 1994 年 Donoho 和 Johnstone 在小波变换的基础上提出的概念^[7], 证明其在 Besov 空间中能得到线性去噪法达不到的最佳估计, 收敛速度更快. 对于小波阈值去噪, 研究者近年来主要关注的键问题是阈值函数的建立和阈值的确定, 它们关系到信号去噪的质量. 在阈值去噪函数的建立方面, Donoho 和 Johnstone 等人于 1995 年提出了硬阈值方法和软阈值方法^[8], 但硬阈值函数在阈值处的不连续性和软阈值函数中估计值与实际值的恒定偏差缺陷, 限制了它的进一步应用. 为了克服这些缺点, 很多专家学者对阈值函数的选择做了研究, 但也存在着不足, 文献[9]中给出的阈值函数简单, 方便实现, 虽然解决了软阈值法存在恒定偏差的问题, 但连续性仍差; 文献[10]中 Bruce A G 提出的半软阈值方法连续性好并保留较大的系数, 但需要确定两个阈值, 增加了算法的复杂程度; 文献[11]中解决了恒定偏差和连续性的问题, 但需要估计的阈值调节因子过多, 实现起来比较困难.

利用小波适合分析非平稳信号的特点, 在超声测距和检测中回波信号的处理中有一定应用^[12-13], 主要采用经典的小波消噪法处理, 没有深入探究传统带通滤波对回波位置即测距准确性的影响以及合适的小波

收稿日期: 2013-11-05

修改稿日期: 2014-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50975218); 陕西省教育厅专项基金项目(2013JK1011); 西建大校青年基金项目(QN1019)

作者简介: 寇雪芹(1978-), 女, 博士生, 讲师, 主要从事信号处理、信息融合方向的研究. E-mail: snow_kou78@163.com

消噪法的去噪效果. 本文从信号的滤波前后的延时、信噪比、平滑性和回波峰值指标角度, 首先研究传统的数字带通滤波对远距离超声回波信号测距和消噪效果的影响, 然后提出利用小波分析以及改进阈值消噪技术提高超声回波信号的消噪效果, 其中改进的阈值函数考虑易于计算和灵活可调性, 研究目标的有效检测和对测距准确度的影响, 得到总体消噪效果良好的超声回波信号.

1 远距离超声信号测量系统

为实现远距离测量, 设计的超声信号测量系统结构如图 1 所示, 可实时获取超声激励信号和超声回波信号的数据, 并进行处理. 这里选用中心频率为 22 kHz 的超声收发分体空气式压电传感器.

实验时, 发射传感器与接收传感器同一水平放置, 正对墙面目标, 实验环境温度为 9℃, 在 5 m、10 m、15 m、20 m 不同距离情况下进行实验. 采集卡采样率设为 100 kHz, 超声发射电路每间隔 200 ms 产生 10 个 22 kHz 的超声波脉冲群, 因此收发一次的采样点数为 20 000.

超声波探头与被测物体之间的距离计算, 本文采用峰值法^[14], 由于目标回波峰值点对应时刻与回波起点对应时刻的时间差基本不变, 以避免传统阈值法对微弱回波前沿的直接检测, 且算法简单. 距离 d 由式 (1) 求出,

$$d = \frac{1}{2} c \times TOF$$

(1)

式中: c 为环境中声波的传播速度, 主要与环境温度有关. TOF 为超声波发射脉冲至接收回波信号所经历的射程时间. 算法为: TOF =回波峰值时间-发射信号第一个脉冲时间-回波起点上升到峰值所需时间.

因此, 对回波消噪有效检测目标的同时, 需要保证回波峰值点的位置消噪前后基本不变, 不能仅保证信噪比提高和波形变好, 但影响准确测距.

2 传统数字滤波消噪

采集发射和接收一次的信号, 回波消噪分别采用 Cheby1 函数设计契比雪夫 I 型 IIR 数字带通滤波和 hamming 窗函数 FIR 数字带通滤波器滤波^[15]. 本文主要对远距离 15 m 和 20 m 处的回波信号进行分析, 20m 处的目标回波信号见图 4(a), 由于超声信号会在传输过程中随距离呈指数型衰减, 远距离处实际回波幅值很小(mV 级或 uV 级), 接收放大电路的电压增益增大至 400 倍, 目标回波幅值放大的同时, 干扰和噪声也同时放大. 滤波前后数据和指标分析分别见表 1 和表 2.

表 1 15m 处数字滤波前后数据和指标分析
Tab.1 Analysis of data and indicators before and after digital filtering at the 15 meter

15 m 距离	数字 滤波前	IIR 数字 滤波后	FIR 数字 滤波后
回波峰值点坐标	9 150	9 164	9 155
测距计算值/m	15.016	15.041	15.025
绝对误差/cm	1.6	4.1	2.5
SNR/dB		16.16	11.35
MSE		0.069	0.087

表 2 20m 处数字滤波前后数据和指标分析
Tab.2 Analysis of data and indicators before and after digital filtering at the 20 meter

20 m 距离	数字 滤波前	IIR 数字 滤波后	FIR 数字 滤波后
回波峰值点坐标	11 915	11 936	11 922
测距计算值/m	20.029	20.064	20.040
绝对误差/cm	2.9	6.4	4.0
SNR/dB		4.63	3.55
MSE		0.068	0.075

其中评估消噪方法的有效性, 使用信噪比 SNR(signal to noise ratio)与均方误差 MSE(mean squared error)作为指标^[5], 对不同的消噪效果进行量化和比较. SNR 与 MSE 的定义如下:

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^N s(t)^2}{\sum_{n=1}^N (s(t) - \hat{s}(t))^2} \right)$$

(2)

$$MSE = \sum_{n=1}^N [s(t) - \hat{s}(t)]^2 / N$$

(3)

式中: $s(t)$ 为原始信号; $\hat{s}(t)$ 为消噪后信号.

根据表 1 和表 2, 得出: (1)从两个远距离处的被测物回波的峰值坐标来看, IIR 滤波和 FIR 滤波后较滤波前都有一定的时间延迟, FIR 滤波延迟较小, 而 IIR 滤波延迟相对较大, 测量结果与真值之间的误差

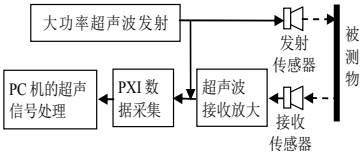


图 1 超声信号测量系统

Fig.1 Ultrasonic signal measurement system

较大,影响测距的准确性;(2)从信噪比角度,远距离的 IIR 滤波和 FIR 滤波信噪比较小,到 20 m 时,只有 4 dB 左右,均方误差值较大,不利于目标信号的检测和分析。

可见,传统数字滤波方法存在着抑制噪声与保护信号局部特征之间的矛盾,不能有效的满足超声的准确测距和远距离时的较高信噪比要求。小波变换具有时频局部化特性、多分辨率特性、解相关特性和选基灵活性,能有效地区分信号中的突变部分和噪声,从而实现信号的消噪,提供了一种有效解决途径^[5]。

3 小波消噪理论及小波改进阈值消噪

3.1 小波消噪理论

采样含噪信号 $s(t) = f(t) + n(t)$, $s(t)$ 为原始信号, $n(t)$ 为噪声信号。对一维连续信号 $s(t)$ 进行离散采样,对应的离散二进小波变换为^[6]:

$$W_f(j, n) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{\mathbb{R}} s(t) \psi^*(2^{-j}t - n) dt \quad (4)$$

Mallat 多分辨分析算法将实信号 $s(t)$ 分解,其正交小波变换分解公式为

$$\begin{cases} c_{j,k} = \sum h(m-2k)c_{j-1,m} \\ d_{j,k} = \sum g(m-2k)c_{j-1,m} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $c_{j,k}$ 为尺度系数, $d_{j,k}$ 为小波系数。 $h(m-2k)$ 、 $g(m-2k)$ 分别为低通和高通滤波器系数。

小波重构的快速算法为

$$s(t) = c_{j-1,m} \sum h(m-2k) + c_{j-1,m} \sum g(m-2k) \quad (6)$$

由小波变换的线性性质可知, $s(t)$ 分解得到的小波系数 $\omega_{j,k}$ 由两部分组成,一部分是信号 $f(t)$ 所对应的小波系数 $u_{j,k}$, 另一部分是噪声 $n(t)$ 所对应的小波系数 $v_{j,k}$ 。信号和噪声在小波域中有不同的性态表现,随着尺度的增加,噪声系数的幅值很快衰减,而真实信号的幅值基本不变。小波阈值法是在不同尺度上选择一个合适的阈值,小于阈值的小波系数置零,保留大于阈值的小波系数。

利用小波阈值法进行消噪的步骤:

(1)选择小波函数,用适当的层数分解含噪信号,得到一组小波系数 $\omega_{j,k}$ 。(2)将各层的高频系数做阈值选取和处理,得出估计小波系数 $\hat{\omega}_{j,k}$ 。(3)根据小波分解的低频系数和阈值量化处理后的各层高频系数进行小波重构,求出信号的消噪值。

步骤(2)中阈值选取和处理很关键。根据噪声的小波系数幅值随分解尺度的增加会逐渐减小的特性,阈值选取公式为 $th = \sigma \sqrt{2 \ln N} / \log(j+1)$, j 为分解尺度,噪声方差 σ 估计通过 Donoho 提出的中值绝对偏差估计器 MAD(median absolute deviation) 进行估计: $\sigma = \text{Median} |\omega_{j,k}| / 0.6745$ 。

阈值处理的原则是:选用合适的处理方法得出估计小波系数 $\hat{\omega}_{j,k}$,使得 $\hat{\omega}_{j,k} - u_{j,k}$ 尽可能小, $|\omega_{j,k}|$ 逐渐增加时, $\hat{\omega}_{j,k}$ 需要接近于 $\omega_{j,k}$; $|\omega_{j,k}|$ 接近阈值 th 时, $\hat{\omega}_{j,k}$ 逐渐接近 th 或 0。

Donoho 提出的硬阈值(hard-thresholding method)和软阈值(soft-thresholding method)传统小波阈值处理方法介绍如下。

硬阈值是把各子空间的小波系数绝对值与阈值进行比较,高于阈值的系数保持不变,低于阈值的系数置零,见图 2 实线所示。硬阈值函数为:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k} & |\omega_{j,k}| \geq th \\ 0 & |\omega_{j,k}| < th \end{cases} \quad (7)$$

软阈值是硬阈值的扩展,把信号的绝对值与阈值进行比较,高于阈值的系数变为该点值与阈值的差值,

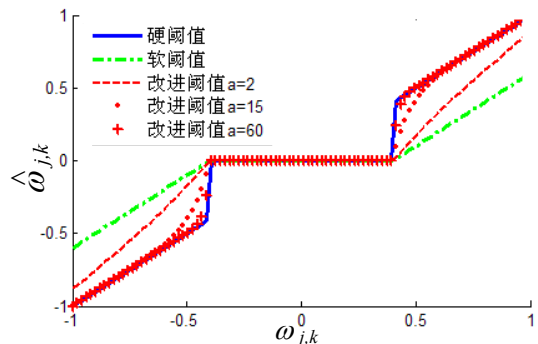


图2 硬阈值、软阈值和改进阈值函数

Fig.2 Hard and soft and improved threshold function

向零进行缩小, 低于阈值的系数变为 0, 见图 2 点划线所示.

软阈值函数为:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - th) & |\omega_{j,k}| \geq th \\ 0 & |\omega_{j,k}| < th \end{cases} \quad (8)$$

3.2 改进的阈值消噪法

硬阈值法和软阈值法虽应用广泛, 但硬阈值法在阈值处不连续, 重构信号时产生一些人为的噪声点, 有附加振荡, 即伪吉布斯 (Pseudo-Gibbs) 现象. 软阈值法在阈值处连续, 重构信号不会产生附加振荡, 较为平滑, 但处理前后的小波系数总有固定偏差, 有恒定衰减, 会损失一些有用的高频信息, 影响重构信号与真实信号的逼近程度^[16-17].

综合了软、硬阈值消噪法的不同特点, 本文提出如下方法进行改进. 选用的新阈值函数为:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} 0 & |\omega_{j,k}| < th \\ \omega_{j,k} - \text{sgn}(\omega_{j,k}) \times th \times e^{-\alpha(|\omega_{j,k}| - th)} & |\omega_{j,k}| \geq th \end{cases} \quad (9)$$

式中: α 为调节因子. $e^{-\alpha(|\omega_{j,k}| - th)}$ 随 α 的不同可以动态调整, 当 $|\omega_{j,k}| \geq th$ 时, $\alpha \rightarrow \infty$ 时, $e^{-\alpha(|\omega_{j,k}| - th)} \rightarrow 0$, 函数为硬阈值; $\alpha \rightarrow 0$ 时, $e^{-\alpha(|\omega_{j,k}| - th)} \rightarrow 1$, 函数为软阈值. $0 < e^{-\alpha(|\omega_{j,k}| - th)} \leq 1$, 函数在 $|\omega_{j,k}| = th$ 处连续. 只要适当的调整 α 的大小, 可有效调节去噪信号与原始信号之间的恒定偏差, 使绝对值较大的小波系数的衰减随着其绝对值的增大而减小, 自适应的减小了衰减, 就可以获得较灵活的去噪效果, 是硬阈值函数和软阈值函数的一种折中处理.

设 $\omega_{j,k} \in [-1, 1]$, $th=0.4$, $\alpha=2$ 、 $\alpha=15$ 和 $\alpha=60$ 时改进阈值函数如图 2 虚线、点线和加号线所示, 可见 $\alpha=15$ 时比较接近硬阈值, $\alpha=60$ 时已接近硬阈值, 因此取 $\alpha \in [0, 60]$. 可见它具有软阈值函数的连续性, $\hat{\omega}_{j,k}$ 与 $\omega_{j,k}$ 的差值也不是恒定的, 且 $\hat{\omega}_{j,k}$ 随着 $|\omega_{j,k}|$ 的增大逐渐接近 $\omega_{j,k}$, 有效避免软、硬阈值法的缺点. 希望尽量保留信号的特征可以将 α 取得相对大一些; 如果想要得到较好的光滑性, 可将 α 取得相对小一些, 使其更接近于软阈值法的处理结果.

4 仿真结果与分析

超声回波信号是一个被探头中心频率调制的宽带信号, 回波包络近似为高斯函数, 其数学模型为^[18]:

$$f(t) = \beta e^{-\mu(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \phi) \quad (10)$$

式中: β 为幅度系数, μ 为带宽因子, τ 为峰值时间, f_c 为信号的中心频率, ϕ 为初相.

带噪回波信号模型:

$$s(t_i) = f(t_i) + n(t_i) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中: $f(t)$ 为有用信号, $n(t)$ 为噪声信号.

仿真回波的 $\beta=6$, $\mu=80$ (kHz)², $f_c=22$ kHz, 采样频率 $F_s=200$ kHz, 采样点数为 2 000, 峰值 τ 为 1 000 Ts, 噪声为随机高斯白噪, 信噪比 SNR 为 6 dB. 回波的高斯函数模型具有对称性, 因此所选取的小波基值和形上应是对称或近似对称的. 考虑到小波的正交性对自适应信号处理方法的适用性, 选择具有正交性的小波 Symmlet-8 作为小波基, 分解的尺度为 5, 对超声信号进行消噪. 改进阈值函数的调节因子 α 这里取 $\alpha=3$ 和 $\alpha=15$. 消噪结果如图 3 和表 3 所示.

根据图 3 和表 3, 可以看出: (1) 从峰值的幅值看, 硬阈值、改进阈值消噪后的最大幅值与真实幅值 6V 比较接近, 而加噪信号、软阈值、IIR 和 FIR 与 6V 相差较大. (2) 从

表 3 不同方法的超声仿真信号消噪效果比较
Tab.3 Denoising effect comparison of ultrasound simulation signal with different methods

方法	加噪信号	硬阈值	软阈值	改进阈值 $\alpha=3$	改进阈值 $\alpha=15$	IIR	FIR
回波峰值幅值	6.42	6.08	5.75	6.06	6.07	5.66	6.23
回波峰值坐标	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 029	1 006
SNR	6	13.25	13.8	14.12	14.01	8.78	7.42
MSE		0.52	0.51	0.49	0.50	0.65	0.7

在波峰值的位置看, 小波消噪的硬阈值和改进阈值处理方法对仿真回波峰值的位置没有发生改变, 而软阈

FIR 滤波发生了微小的改变, IIR 滤波发生了较大的改变. (3)从信噪比和波形上看, IIR 和 FIR 滤波后的波形消噪不彻底, 信噪比提高不多. 软阈值法过于平滑, 失真较多, 信噪比较大; 硬阈值振荡较厉害, 振荡点较多, 信噪比在小波三种消噪法中最小; 改进阈值法通过调节 α 因子可以调节波形、信噪比和伪吉布斯现象, $\alpha=15$ 时, 波形有较小的振荡点, 信噪比较大, $\alpha=3$ 时波形较好, 信噪比最大. 可见, 选择合适的 α 可使去噪后的信号具有较好光滑性的同时尽量保留原始信号特征, 视觉效果上优于软硬阈值方法, 对超声波形 α 取值较小时信噪比和波形良好. 因此, 提出的改进阈值算法总体优于其它方法, 综合分析消噪效果和图 2 的函数曲线, α 选取范围缩小至 $\alpha \in [2, 15]$.

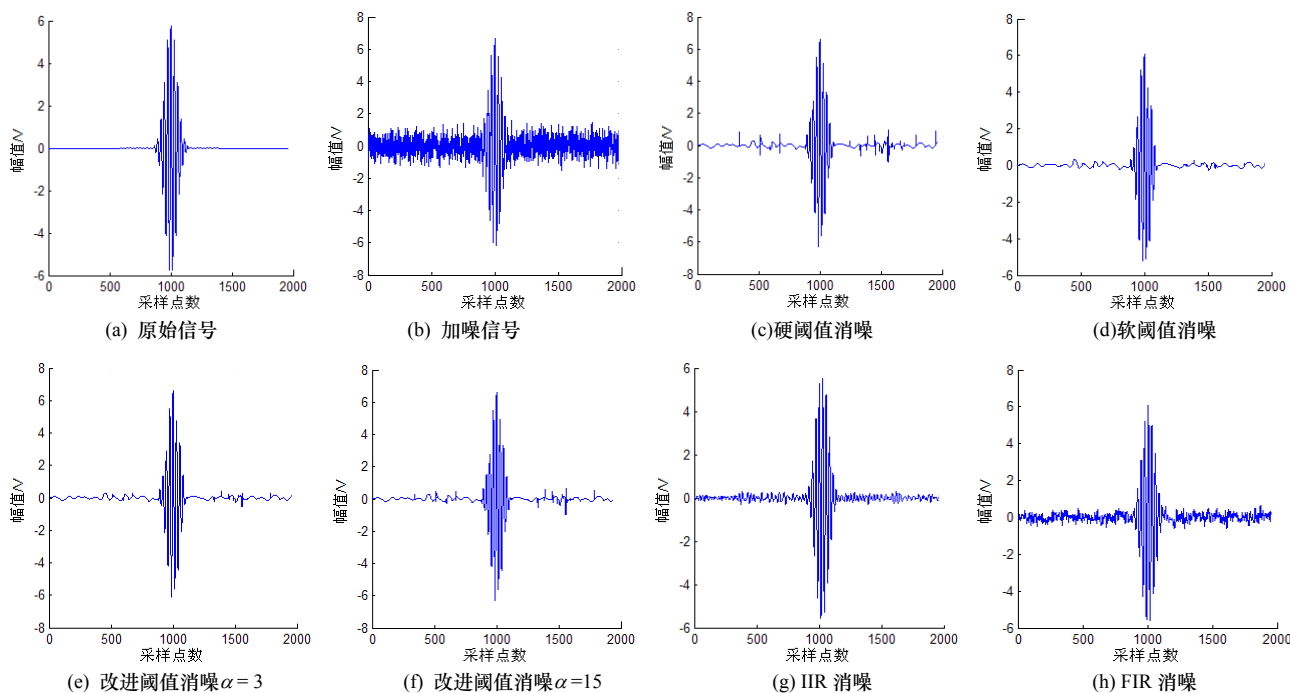


图3 不同方法的超声仿真信号消噪结果

Fig.3 Denoising effect of ultrasound simulation signal with different methods

5 实验结果与分析

在 15 m、20 m 远距离情况下进行测量实验. 比较小波消噪的硬阈值、软阈值和改进阈值三种方法, 滤波前后的数据指标见表 4 和表 5, 20 m 处的消噪效果图见图 4. 这里调节因子取 $\alpha=5$.

观察表 4、表 5 和图 4, 可见实际数据回波噪声较严重, 其消噪结果与第 4 节仿真结果相似: (1) 从被测物回波的峰值点幅值来看, 硬阈值和改进阈值的峰值幅值差不多, 软阈值的峰值幅值偏小; (2) 从被测物回波的峰值坐标来看, 小波消噪的三种方法消噪前后没有时间延迟, 对我们的测距值无影响, 满足要求. (3) 从信噪比角度, 与表 1 和表 2 中的 IIR 滤波和 FIR 滤波消噪比, 同等距离处小波消噪方法的回波信噪比远大于传统数字滤波, 均方误差远小于传统数字滤波. 小波阈值处理方法中, 改进阈值的信噪比最大、均方误差最小, 硬阈值信噪比最小和均方误差最大, 软阈值法介于二者之间. (4) 从波形上看, 软阈值法最平滑, 失真较多; 硬阈值降噪不彻底, 振荡较厉害, 连续性不好, 最大振荡点接近 0.4 伏, 对信号的检测和测距有影响; 改进阈值法波形较为光滑, 消除了噪声信号的同时对波形特征进行了较好的保留. 文中改进算法的消噪效果总体上具有较高的信噪比和更光滑的外观, 满足有效提取信号的要求.

6 结论

针对超声远距离测量中回波信号受噪影响大的问题, 分析传统 IIR 和 FIR 数字滤波方法进行回波消噪后, 回波峰值位置有时间延迟, 远距离信噪比较低和均方误差较大, 影响测距准确度和目标信号的检测. 分析传统的软硬阈值小波消噪的优缺点, 提出改进的小波阈值函数消噪法. 仿真和实验结果表明: (1) 基于小波改进阈值的超声消噪方法回波峰值位置没有时间延迟, 同等距离处较传统的数字滤波信噪比大大提高, 均方误差大大减小; (2) 在视觉效果、信噪比和均方误差定量指标上均明显优于常用的软、硬阈值, 发挥了

小波软、硬阈值消噪法的优点, 避免它们的缺点, 其消噪效果总体良好; (3)适当的调整改进函数中的调节参数的大小, 可灵活调节去噪效果, 可为目标测距的准确度和目标识别提供良好的保证. 由此说明本文提出的改进阈值函数降噪方法能较好的满足适用要求.

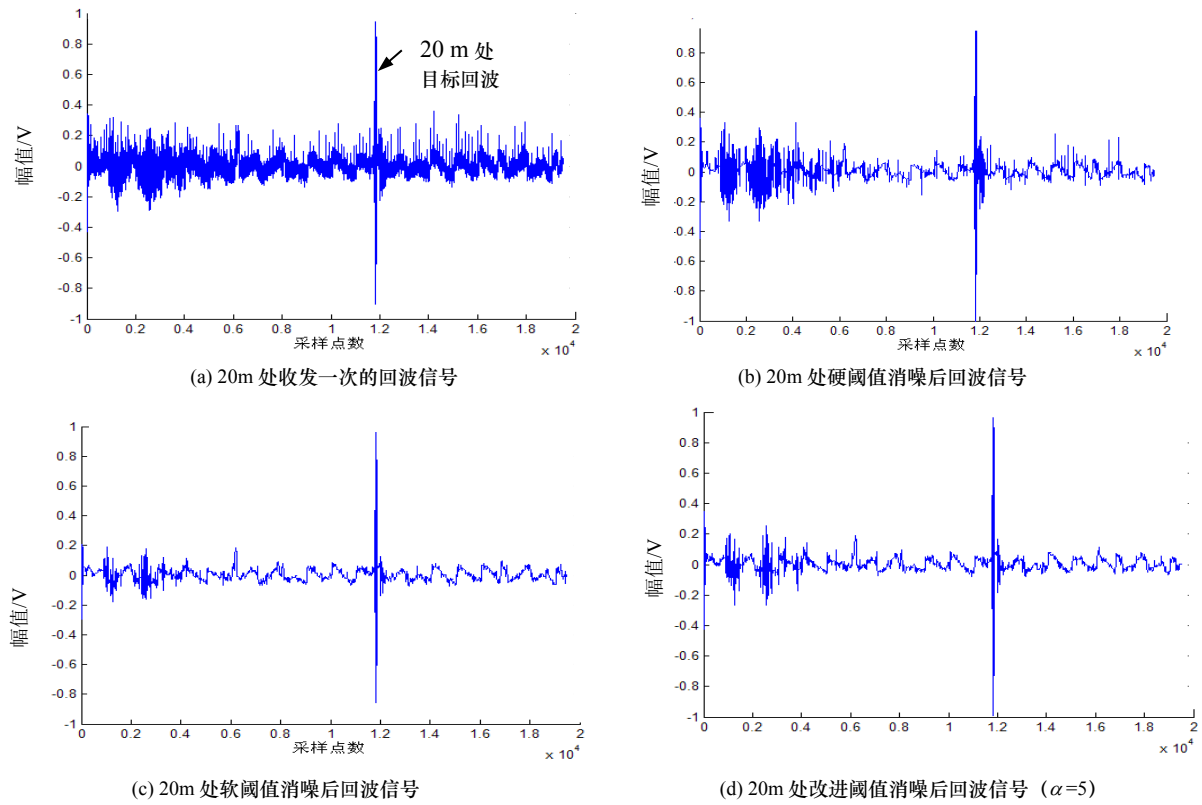


图 4 20 m 处三种阈值方法的超声实验信号消噪效果

Fig.4 Denoising effect of ultrasonic experimental signal with three kinds of threshold methods at the 20 m

表 4 15 m 处三种阈值方法消噪效果比较

Tab.4 Denoising effect comparison with three kinds of threshold methods at the 15 meters

15m	消噪前	硬阈值	软阈值	改进阈值
回波峰值点幅值/V	3.69	3.61	3.54	3.61
回波峰值点坐标	9150	9150	9150	9150
SNR/dB		36.59	39.52	41.19
MSE		0.024	0.021	0.019

表 5 20 m 处三种阈值方法消噪效果比较

Tab.5 Denoising effect comparison with three kinds of threshold methods at the 20 meters

20m	消噪前	硬阈值	软阈值	改进阈值
回波峰值点幅值/V	0.978	0.965	0.957	0.965
回波峰值点坐标	11915	11915	11915	11915
SNR/dB		21.19	24.42	26.69
MSE		0.021	0.018	0.016

参考文献 References

[1] GU Lichen, JU Xiaotao, YAN Xiaole. Time delay estimation of long distance ultrasonic echoes based on model matching[C]//The Fifth Conference on Vibration Utilizing Engineering in China & The Fourth Workshop on Ultrasonic Motor Techniques in China, 2012.

[2] 廖勤武, 王朝立, 梅迎春. 基于超声的非完整移动机器人避障控制[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(4): 402-405.

LIAO Qinwu, WANG Chaoli, MEI Yingchun. Obstacle avoidance control for nonholonomic mobile robots based on ultrasonic sensors[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2009, 31(4): 402-405.

[3] 陈先中, 王伟, 张争等. 低噪声回波测距系统的电路设计与系统分析[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(4): 488-492.

CHEN Xianzhong, WANG Wei, ZHANG Zheng, et al. Design and analysis of the lower electronic noise circuit with a ultrasonic pulse echo ranging system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(4): 488-492.

[4] 陈先中, 张争, 王伟. 大量程超声波回波测距系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 179-182.

CHEN Xianzhong, ZHANG Zheng, WANG Wei. Study of long distance pulse echo system with ultrasonic wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 179-182.

[5] TOMASZ J. Licznarski, Jarosław Jaroński, Dariusz Kosz. Ultrasonic system for accurate distance measurement in the air[J]. Ultrasonics, 2011, 51(8): 960-965.

[6] 潘泉, 张磊, 孟晋丽, 等. 小波滤波方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

PAN Quan, ZHANG Lei, MENG Jinli, et al. Wavelet filter method and application[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2011.

[7] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, (81): 425 - 455.

- [12] 李铭洋, 樊治平, 刘洋. 一种基于偏好序信息的双边匹配方法[J]. 运筹与管理, 2012, 21(4): 112-118.
LI Mingyang, FAN Zhiping, LIU Yang. A method for two-sided matching based on preference ordinal information[J]. Operations Research and Management Science, 2012, 21(4): 112-118.
- [13] 乐琦. 考虑主体心理行为的双边匹配决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 120-125.
YUE Qi. Decision method for two-sided matching considering agents' psychological behavior[J]. Systems Engineering and Electronic, 2013, 35(1): 120-125.
- [14] LAWLER E L. Combinatorial optimization: networks and matroids[M]. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.

Research on personnel-post matching decision-making with uncertain preference information

YANG Qian^{1,2}, ZHENG Hui², ZHANG Zhichang²

(1. School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Economics and Management, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Employee satisfaction is an important basis for personnel-post matching decision-making. In the situation of job satisfaction which is expressed in uncertain preference ordinals, and in order to minimum the maximum gap between the actual satisfaction and expectation satisfaction of each employee, a personnel-post matching decision-making model is established. Furthermore after analyzing the solutions for the model, algorithm A is designed, showing that the time complexity is $O(n^4)$. Finally, an example is given to confirm the model and algorithm to be both effective.

Key words: employee satisfaction; personnel-post matching; min-max problem; algorithm

(本文编辑 桂智刚)

(上接第 603 页)

- [8] DONOHO D L. Denoising by soft-threshold [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [9] 陈益, 李书. 改进的小波阈值消噪法应用于超声信号处理[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(4): 466-470.
CHEN Yi, LI Shu. Application of improved threshold denoising based on wavelet transform to ultrasonic signal processing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(4): 466-470.
- [10] GAO Hongye, BRUCE A G. WaveShrink and semisoft shrinkage[R]. StaSci Research Report 1995, 39.
- [11] 叶重元, 黄永东. 小波阈值去噪算法的新改进[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(12): 141-145.
YE Chongyuan, HUANG Yongdong. New improvement of wavelet threshold denoising algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(12): 141-145.
- [12] 柳建楠, 刘文峰, 王伯雄, 等. 应用于超声测距的小波变换滤波算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(7): 951-955.
LIU Jiannan, LIU Wenfeng, WANG Boxiong, et al. Wavelet denoising algorithm for ultrasonic ranging[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2012, 52(7): 951-955.
- [13] Chen Hanxin, ZUO MingJ, WANG Xiaodong, et al. An adaptive morlet wavelet filter for time-of-flight estimation in ultrasonic damage assessment[J]. Measurement, 2010, 43(4): 570-585.
- [14] 寇雪芹, 谷立臣, 闫小乐, 等. 基于虚拟仪器的超声信号测量与测距研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(6): 17-20.
KOU Xueqin, GU Lichen, YAN Xiaole, et al. Research on ultrasonic signal measurement and distance measurement based on virtual instrument[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(6): 17-20.
- [15] 靳希, 杨尔滨, 赵玲. 信号处理原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
JIN Xi, YANG Erbin, ZHAO Ling. Signal processing principle & application [M]. Beijing: Tsinghua University press, 2008.
- [16] CUI Huimin, ZHAO Ruimei, HOU Yanli. Improved threshold denoising method based on wavelet transform[J]. Physics Procedia, 2012, 33: 1354-1359.
- [17] 王拴中, 朱玉田. 改进小波阈值去噪法的对比性仿真实验与分析[J]. 噪声与振动控制, 2012, (2): 128-132.
WANG Shuanzhong, ZHU Yutian. Comparative simulation study of evolutionary wavelet based on denoising algorithms[J]. Noise and Vibration Control, 2012, (2): 128-132.
- [18] DEMIRLI R. Model based estimation of ultrasonic echoes: analysis, algorithms and application [D]. Graduate College of the Illinois Institute of Technology 2001.

Study of long-range ultrasonic signal denoising in the tower crane anti-collision system

KOU Xueqin, GU Lichen

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: According to the need of long-range obstacles detection in tower crane anti-collision system and for long-range ultrasonic target detection, after echo denosing by traditional digital filtering, there are delay of echo peak position and low signal to noise ratio (SNR) of long-range ultrasonic. These factors affect the accuracy of distance measurement and the target detection. Improved wavelet threshold function denoising method is proposed for echo denoising. Simulation and experimental results show that ultrasonic echo denoising based on improved threshold method makes ultrasonic echo peak position without delay, and can significantly improve the SNR. Its denoising effect is better than the traditional digital filtering and the wavelet soft and hard threshold denoising methods. This method is suitable for long-range ultrasonic measurement and effective detection of target.

Key words: ultrasonic echo; long-range ultrasonic measurement; wavelet threshold denoising; SNR

(本文编辑 吴海西)