

文章编号:1671-6833(2007)04-0075-05

## 基于小波变换的水下超声波测距方法研究

邓跃红, 聂双双

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:**通过分析传统的阈值检测法超声波测距的缺点,提出了基于小波变换的水下超声波测距方法.应用数字信号处理技术,设计出基于 Hamming 窗函数的数字带通滤波器,对采样信号进行数字滤波,构造高斯小波基.介绍了一种将采样信号与小波基做卷积进行小波变换,精确捕捉回波信号到达时刻的超声波水下测距系统.在实验室水池中分别用传统的阈值检测法和基于小波变换的超声波测距法进行了实验测量,并对测量数据进行了比较,验证了基于小波变换的水下超声波测距可以达到更高的测量精度,优于传统的阈值检测法.

**关键词:**超声波;小波变换;阈值检测;测距

**中图分类号:** TN 911 **文献标识码:** A

### 0 引言

超声波测距是通过捕捉超声波脉冲的回声,根据超声波在介质中的传播时间来确定被测目标的距离.常用的回波捕捉方法有固定电平阈值法<sup>[1]</sup>,可变阈值检测法<sup>[2]</sup>,皆采用回波信号的电压来触发比较器,以判断回波到达时刻,这种方法简单、成本低、实时性好,但测量精度不高,对于反射表面平整,环境干扰比较小的情况可以有较好的测量效果.对于超声波水下微地形探测,其外部环境噪声干扰厉害、水体中包含各种悬浮物引起超声波散射严重,地面不平而造成回波散射,实际接收换能器接收到的是体积混响、背景噪声和反向散射回波的混合信号,要把真实回波信号从混合信号中准确分离出来用纯硬件的方法很难实现,用阈值法来捕捉回波前沿会出现比较严重的误测或漏测,测量精度也难以提高.

信号中不规则的突变部分和奇异点往往包含了信号的许多重要信息,它是信号的重要特征之一.小波变换具有表征信号局部特征的能力,适于分析信号中的瞬态和奇异现象,并可展示其成份<sup>[3-4]</sup>.笔者通过高速采样并对采样信号进行数字滤波和小波变换,找出小波系数模最大值所对应的采样点,从而精确捕捉到回波信号的到达时

刻,计算出测量距离.

### 1 基于小波变换的超声波测距原理

超声波测距是通过捕捉超声波脉冲回声信号的到达时刻,根据超声波在介质中的传播时间来确定被测目标的距离,

$$s = c \times t / 2 \quad (\text{m}) \quad (1)$$

式中: $t$ 为超声波从发射到接收的传播时间, $s$ ;  $c$ 为超声波在介质中的传播速度,  $\text{m/s}$ . 超声波在水中的传播速度不是一个定值,它是温度、含盐量、深度(静压力)的复杂函数,这种函数关系一般不易用解析形式表示,工程上常用经验公式表示,式(2)是诸多经验公式中的一种<sup>[5]</sup>.

$$c = 1492.9 + 3 \times (T - 10) - 6 \times 10^{-3} (T - 10)^2 - 4 \times 10^{-2} (T - 18)^{-2} + 1.2 \times (S - 35) - 10^{-2} \times (T - 18)(S - 35) + Z/61 \quad (2)$$

式中: $c$ 是超声波传播速度; $S$ 是水的含盐度,‰; $T$ 是温度,℃; $Z$ 是深度,  $\text{m}$ .

在一定测量环境下,通过测量水的温度  $T$ ,盐度  $S$ ,深度  $Z$  可以求出相应的超声波传播速度,对于深度变化不大的近程测量,可以用平均深度来代替,测量距离的关键是准确获得超声波渡越时间  $t$ . 若函数  $\Psi \in L^2(R)$  满足容许性条件

收稿日期:2007-07-16;修订日期:2007-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50474052)

作者简介:邓跃红(1960-),女,湖南益阳人,中南大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为海洋采矿和微地貌测量与可视化研究. E-mail: shsh\_101582@163.com.

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3)$$

则称  $\Psi$  为小波母函数. 将尺度因子记作  $a$ , 则  $\Psi_a(t) = (1/a) \Psi(t/a)$  称作小波基. 小波变换就是将信号  $f(x)$  与小波基做卷积,

$$W_{\psi}f(a, x) = f * \Psi_a(t) \quad (4)$$

将小波基  $\Psi_a(t)$  进行伸缩和平移, 就得到函数

$$\Psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, \tau \in R; \quad a > 0 \quad (5)$$

式中:  $a$  为尺度因子;  $b$  为位移因子;  $\Psi_{a,\tau}(t)$  为依赖于参数  $a, b$  的小波基函数.

小波变换具有独特的时-频局部化特性, 这些特性依赖于尺度因子  $a$  和位移因子  $b$ ,  $a$  越大相当于频率越低,  $a$  越小则频率越高, 即低频时小波变换的时间分辨率较低, 而频率分辨率较高; 高频时小波变换的时间分辨率较高, 而频率分辨率较低, 这正符合信号变化的特点.

将回波信号与小波基进行卷积, 其小波系数模最大值对应的采样点即为回波到达的起点. 根据采样频率可以计算出渡越时间, 将  $t$  代入到超声波测距公式(1)中, 计算得测量距离.

## 2 测距系统的组成

本实验系统是由传感器、发射电路、回波接收电路、主控电路、工控机等部分组成. 其传感器是收发一体式的超声波换能器, 其中超声波发射电路由信号产生电路、功率放大电路和收发一体式超声波换能器组成; 回波接收电路由前置放大电路、时间增益控制(TGC)电路、带通滤波电路、PCI-1714 高速采集卡和台式计算机组成; 主控电路是以 AT89C52 为核心的单片机系统, 主要完成超声波脉冲信号的产生、对 PCI-1714 高速采集卡的同步触发以及 TGC 电路中增益的调整. 整个实验系统装置如图 1 所示. 收发一体式超声波换能器的谐振频率为 500 kHz, 3 dB 波束角为 3°, 直径 140 mm. 在本系统中, 超声波发射频率为 500 kHz, 采样频率为 16 MHz.

本系统的实验台是一个长 × 宽 × 深 = 2 000 mm × 1 600 mm × 1 800 mm 的矩形水池, 把底质水平铺设好, 对水池进行注水并使水深达到 1 700 mm, 确保超声波换能器浸在水中. 每次测量时, 保持换能器垂直于底质表面进行发射超声波, 换能器高度从距离底质表面 400 mm 开始到 1 400 mm, 每间隔 100 mm 测量一次.

万方数据

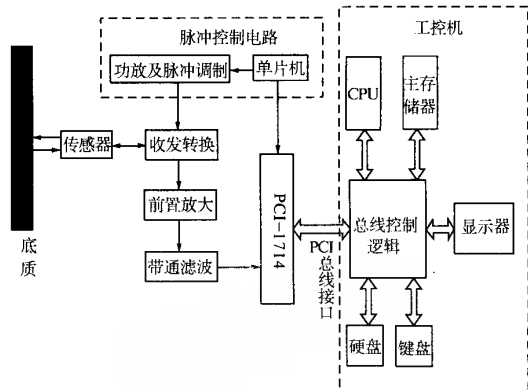


图 1 超声波水下测距系统框图

Fig. 1 Diagram of the underwater ultrasonic distance measure system

实验系统的工作过程是: 给超声波水下测距系统供电以后, 超声波换能器通过信号线垂入水中, 由芯片 AT89C52 作为信号主控电路, 启动测距系统开始测距. 工控机的操作系统内安装有数据采集和信号处理程序, 负责对超声波信号进行采样和数据处理. 当工控机做好准备工作以后, 按下信号主控电路中的控制键, AT89C52 立刻启动 555 振荡电路产生 500 kHz 的方波信号, 同时启动 PCI-1714 高速采集卡开始采样. 4 个周期的方波信号经过功率放大以后, 激励换能器发射超声波; 在启动测距的同时, 单片机对 TGC 电路的放大倍数根据时间的延长进行调整, 确保回波信号被足够放大; 测距完成后, 单片机内部的控制程序就使主控电路处于下次发射控制的准备状态.

超声波发射信号碰到物体后反射回来并被超声波换能器接收, 回波信号经过前置放大、模拟带通滤波、TGC 电路以后, PCI-1714 高速采集卡对其进行 A/D 转换, 转换次数由预先设定的总采样点数决定.

## 3 回波信号预处理及小波基的构造

### 3.1 回波信号放大及噪声抑制

由于在探测过程中, 受到环境噪声、机器噪声等背景噪声和系统自噪声的干扰, 并且回波信号是 mV 级的微弱信号, 在此设计了放大滤波电路, 前置放大器选用精密运算放大器 OP37, 为了与换能器功率进行匹配, 其放大器输入阻抗与换能器的输出阻抗数值相近. 带通滤波电路由精密低噪声的运算放大器 TL082 和 R、C 网络构成, ±12 V 双电源供电.

为了进一步消除系统自噪声对测量结果的影

响,在对采样信号与小波做卷积之前,需要先进行滤波,本系统选用 FIR 滤波器,将滤波系数序列  $h(n)$  与采样信号序列  $x(n)$  作线性卷积

$$Y = x(n) * h(n) \quad (5)$$

式中:  $Y$  是对回波信号  $x(n)$  进行滤波后的结果。

本系统利用 Hamming 窗设计的带通数字滤波器的中心频率为 500 kHz,上限截止频率为 505 kHz,下限截止频率为 495 kHz,99 阶带通数字滤波器的幅频和相频特性如图 2 所示。

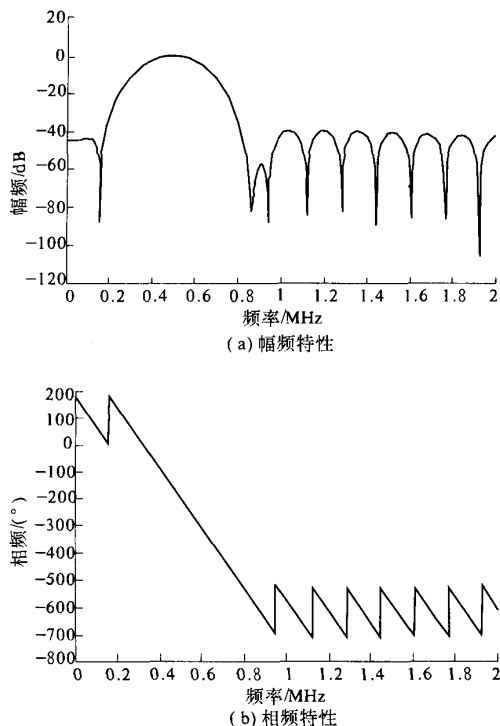


图 2 FIR 带通滤波器幅频响应

Fig.2 The rang - frequency response of pass - band filter

从图 2 可以看出,滤波器对 500 kHz 的信号增益为 0 dB,对通带以外的信号增益迅速减小;通带内的都保持了线性相位。由于选用了 Hamming 窗函数,滤波器的阻带被进一步的压低,第一旁瓣幅度下降速率较快,可以满足实际要求。

### 3.2 小波基的构造

如何选择小波基函数目前还没有一个理论标准,但是小波变换的小波系数为如何选择小波基函数提供了依据。小波变换后的小波系数表明了小波与被处理信号之间的相似程度,如果小波变换后的小波系数比较大,就表明小波和信号的波形相似程度较大;反之则较小。另外还要根据信号处理的目的来决法尺度的大小。如果小波变换仅仅要反映信号整体的近似特性,往往选用较大的

尺度;反映信号细节上的变换则选用尺度较小的小波。

在一般情况下,常选取紧支集或近似紧支集(具有时域的局部性),且具有正则性(具有频域的局部性)的实数或复数函数作为小波母函数。在实际应用场合,通常希望所使用的小波是某一平滑函数的导数<sup>[6]</sup>。高斯函数是常用的平滑函数,其一阶导数即高斯小波可作为小波基与信号做卷积,进行小波变换<sup>[7]</sup>。本文构造的高斯函数的滤波器长度为 20,幅度  $A = -1/\sqrt{2\pi}$ ,尺度为 0.25,将构造的高斯小波进行能量归一化。

## 4 测量实验及结果分析

在真实距离为 1 200 mm 水深处,底质为细沙底质情况下用该系统进行测距。系统采样所得到的超声波信号的原始信号、滤波信号、小波变换系数及小波变换后的模值波形如图 3 所示。

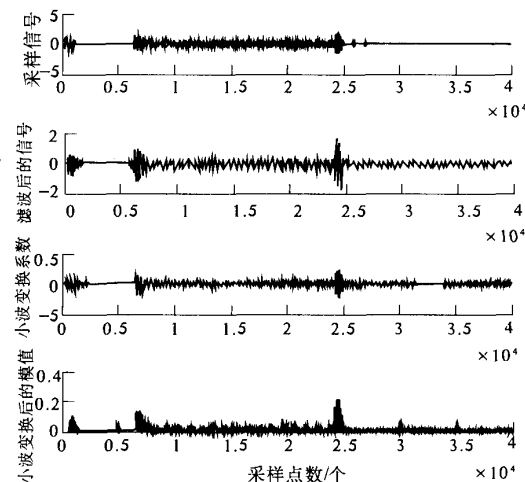


图 3 单点测量波形图

Fig.3 Waveform of a measurement point

由于超声波换能器是收发一体式的,通过对原始采集信号波形的多次观察和统计,求得发射信号的平均长度为 500 个点,将超声波采样信号进行数字滤波,截取前 500 个点后在对应位置上补零,得到新的信号序列,然后将新的信号序列与 gauss 小波基做卷积,其模最大值对应的时间点就是回波到达的起点,根据采样频率可以计算出渡越时间,将代入到超声波测距公式(1)中,计算得测量距离。本测距系统中对超声波信号的数字滤波过程和渡越时间的计算过程都是通过 MATLAB 软件编程实现的。

程序运行结果显示,模最大值对应的采样点是 24 452,计算得出的测量距离为 1 211.5 mm。

而阈值检测法测量的距离为 1 220 mm,通过实例验证可知,小波变换运用到超声波测距系统中,可以得到比较高的测距精度.

进一步实验,分别选用细沙底质、模拟海泥底质和平整的水泥底质用该系统和阈值法进行测量,部分测量数据分别如表 1,2,3 所示.

表 1 细沙底质两种测量方法部分测量数据的对比  
Tab.1 The comparison with segmental measure data using the two methods of silver sand bottom

序号	标定值	小波变换 法测量值	测量 误差	mm	
				阈值法 测量值	测量 误差
1	600	602.56	2.56	620	20
2	700	707.71	7.71	720	20
3	800	809.67	9.67	0	-800
4	900	910.94	10.94	630	-270
5	1 000	1 004.10	4.1	1 010	10
6	1 100	1 106.10	6.1	1 110	10
7	1 200	1 211.50	11.5	1 220	20

表 2 模拟海泥底质两种测量方法部分测量数据的对比  
Tab.2 The comparison with segmental measure data using the two methods of simulated sea mud

序号	标定值	小波变换 法测量值	测量 误差	mm	
				阈值法 测量值	测量 误差
1	600	602.30	2.30	910	310
2	700	702.70	2.70	0	-700
3	800	806.16	6.16	0	-800
4	900	908.32	8.32	0	-900
5	1 000	1 003.20	3.20	0	-1 000
6	1 100	1 110.10	10.10	420	-680
7	1 200	1 218.50	18.50	1 230	30

表 3 平整的水泥底质两种测量方法部分测量数据的对比  
Tab.3 The comparison with segmental measure data using the two methods of flat cement

序号	标定值	小波变换 法测量值	测量 误差	mm	
				阈值法 测量值	测量 误差
1	600	603.08	3.08	610	10
2	700	705.53	5.53	710	10
3	800	805.27	5.27	810	10
4	900	905.15	5.15	910	10
5	1 000	997.45	-2.55	1 010	10
6	1 100	1 093.90	-6.10	1 120	20
7	1 200	1 201.50	1.50	1 210	10

从表中数据可以发现,基于小波变换的超声波测距系统远比阈值检测法测距系统在测量精度上高得多,且测距系统的性能稳定,不会出现测距失败的情况.运用小波变换进行超声波测距,测量精度基本可以达到厘米级,并且不受被测表面底质影响,而一般阈值检测法受被测表面底质和平整度影响严重<sup>[1-2,8]</sup>.这是因为,在测距过程中,只要存在超声波回波信号,即使其振幅非常小(不能小于噪声信号的振幅),小波变换一样会得到最大值,只是这个最大值比较小而已,不影响这种测距系统对距离的有效测量,而用传统的阈值检测法很难准确捕捉到回波信号到达时刻的时间点,引起测量误差,并且可能出现误测和漏测现象.

5 结束语

小波变换应用到超声波水下测量,可以准确捕捉回波到达时刻,提高测距精度.在实验室环境下进行实际测量,实际情况与理论吻合,测得数据明显优于用传统的阈值检测法所测得的数据,具有更高的测距精度,该测量方法对于水下微地形测量及河流动力学研究等要求较高测量精度的水下测距具有重要意义.

参考文献:

[1] 张健,李钢. 超声波测距系统的研究与设计[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2004,27(6): 640-643.

[2] 杨劲松,王敏,黄心汉. 超声波可变阈值测距装置[J]. 电子技术应用,1998,(7):6-8.

[3] 秦前清,杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994.

[4] 费璐璐,王华斌. 小波变换在回波信号检测中的应用[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2004,24(1):55-58.

[5] 邢志刚,封金星,刘伯胜. 水声测距数学模型研究[J],哈尔滨工程大学学报[J],2000,21(3):24-28.

[6] MALLAT S,SIFEN Z. Characterization of signals from multiscale edges[J]. IEEE Trans on PAMI,1992,14(7):710-732.

[7] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.

[8] 童峰,许天增. 一种移动机器人超声波导航系统[J]. 机器人,2002,24(1):55-58.

## Research into Distance Measurement Method With Underwater Ultrasonic based on Wavelet Transform

DENG Yue - hong, NIE Shuang - shuang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The disadvantages of traditional ultrasonic distance measure method by detecting threshold of echo are analyzed, and the distance measure method by underwater ultrasonic based on wavelet transform is proposed. With the digital signal processing technique, the digital pass - band filter based on Hamming window function is designed and the sampling signal is filtered. Gauss wavelet is constructed. An underwater ultrasonic distance measure system is presented, which catches the echo time accurately with the wavelet transform by convoluting the sampling signal and the wavelet. The experiments are done using the traditional method by detecting threshold and the ultrasonic distance measure method based on wavelet transform separately in the laboratory pool and the measure data are compared. It proves that the distance measure method with underwater ultrasonic based on wavelet transform can gain higher precision and excels the traditional method by detecting threshold.

**Key words:** ultrasonic wave; wavelet transform; detection of threshold; distance measurement

(上接第54页)

### 参考文献:

- [1] 丁明, 张静, 李生虎. 基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 38 - 42.
- [2] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48 - 52.
- [3] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 复杂配电系统的可案性评估[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(8): 9 - 13.
- [4] 张鹏, 王守相. 电力系统可靠性经济评估的区间分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 71 - 77.
- [5] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 271 - 272.
- [6] 任震, 万官泉, 黄雯莹. 参数不确定的配电系统可靠性区间评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 68 - 73.
- [7] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes basic system data and results [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813 - 821.

## Interval Algorithm of Distribution Reliability Evaluation

WANG Xu - dong, CHEN Gen - yong

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** An interval arithmetic based approach to evaluate the reliability of complex distribution networks is proposed. To simplify the network model, according to the complex distribution network characteristic, this paper obtains the simple radiation pattern network using the network-equivalent method through upward equivalent and the downward equivalent process. This algorithm analyzes and processes the primitive distribution system component reliability parameter, based on which it obtains various component reliability primitive interval parameters and working-out the load and the system reliability interval indices and the power cut economic loss interval value. Through the application of the proposed algorithm in the evaluation of RBTS-BUS2 system, the results show that this algorithm is flexible, highly effective, and has practical engineering value.

**Key words:** complex distribution network; reliability evaluation; interval algorithm; network-equivalent