DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.011

# 基于互相关法的超声波高精度回波定位方法研究\*

## 张从鹏,李 弘,周邦平

(北方工业大学 机械与材料工程学院,北京 100144)

摘要:为了解决传统的互相关算法没有自适应特性且运算量较大的问题,以提高超声波测距的精度,分析了不同距离下的超声波回 波信号的强度和持续时间,并结合了换能器的振动特性和声波的衰减特性,提出了一种精确定位超声波回波位置的算法。首先,采 用改进的互相关算法,确定了回波起始位置的范围,再进一步比较了回波信号各个周期的方差特性,最终得到了回波信号前沿的起 始位置;通过模拟仿真验证了该定位算法在低信噪比环境下的适应性,通过实际的测量实验验证了该算法的测量精度。研究结果 表明:在 3 000 mm 实测范围内,采用了该算法的超声波测距系统,其绝对误差 <1.3 mm,标准偏差 ≤0.097 mm,可满足大部分工业 测量需求。

文章编号:1001-4551(2019)08-0830-05

## Precise ultrasonic distance measurement method based on cross-correlation algorithm

ZHANG Cong-peng, LI Hong, ZHOU Bang-ping

(School of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology University, Beijing 100144, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional cross-correlation algorithm has no self-adaptive characteristics, and a large amount of computation, to improve the accuracy of ultrasonic ranging, the intensity and duration of the ultrasonic echo signals at different distances were analyzed, combined with the vibration characteristics of the transducer and the attenuation characteristics of the acoustic wave, an algorithm for accurately locating the ultrasonic echo position was proposed. Firstly, the improved cross-correlation algorithm was used to determine the range of the echo start position. Then the variance characteristics of each period of the echo signal were compared to obtain the starting position of the leading edge of the echo signal. The adaptability of the algorithm in low SNR environment was verified by simulation. And the measurement accuracy was verified by actual measurement experiments. The research results show that the ultrasonic ranging system with the algorithm has an absolute error <1.3 mm and a standard deviation  $\leq 0.097$  mm in the actual measurement range of 3 000 mm, which can meet most industrial measurement requirements.

Key words: ultrasonic ranging; cross-correlation; variance comparison; volatility test; repeatability test

0 引 言

超声波具有良好的指向和反射特性<sup>[1-2]</sup>,因此可以 用于距离检测。超声波测距法属于非接触式测量法, 具有不易磨损、便于维护、安装简便等优点<sup>[3]</sup>,因此, 在物位检测、液位测量、机器人避障和定位系统等方面 中得到了较为广泛的应用。在超声波测距中,经常使 用渡越时间法(TOF),即通过超声波换能器向外界发

基金项目:北京市教委基本科研计划项目(110052971803)

作者简介:张从鹏(1975-),男,河南鲁山人,教授,硕士生导师,主要从事智能装备技术方面的研究。E-mail:soaringroc@ncut.edu.cn

收稿日期:2019-01-01

射超声波,再接收从被测物体返回的超声回波,测量其 发射波与回波之间的时间长度,即可计算出被测距离。

超声波回波信号属于窄带信号,波形幅值的包络 线呈先增大后减小趋势,因此,首波信号幅值较小,且 易淹没于杂波信号之中,不易确定信号起始位置。南 京邮电大学的田文成运用可编程增益放大器放大不同 距离下的回波信号,以此捕捉了第一个回波信号前沿, 可达到0.4%的精度<sup>[4]</sup>;东华大学的杨令晨<sup>[5]</sup>基于硬 件系统设计,提出了利用回波信号包络线上的2个阈 值点拟合出的直线求得回波前沿时间,具有较好的波 形处理效果,但其拟合方式过于简单,对不同距离下回 波信号的适应性不强。

本文拟在互相关法基础上,通过回波信号周期波 动性的特征,确定回波的精确起始位置,以此提高超声 波测距的精度。

1 超声波传播时间获取算法

#### 1.1 回波信号描述

超声波在传播过程中会发生扩散衰减、吸收衰减 和散射衰减,因此,回波信号是分布在换能器谐振频率 为中心的一个较小的频域上的衰减振荡信号<sup>[6]</sup>。



Ⅰ区—发射信号;Ⅱ区—渡越时间;Ⅲ区—接收到的回波信号
 根据回波的窄带特性,典型回波的表达式为:

$$r(t) = \alpha \cdot s(t - \tau) + n(t), 0 < t < T \quad (1)$$

 $s(t) = a(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta), t_1 \le t \le t_2$  (2) 式中:r(t)—待处理信号,由未起振区、回波信号起振 区和外界噪声组成; $\alpha$ — 衰减因子;s(t)— 反射后的回 波信号; $\tau$ —时间延时;n(t)—与s(t)不相关的高斯白 噪声;T—回波信号的观测时间;a(t)—回波信号的包 络函数,其自变量取值范围在 $t_1$ 和 $t_2$ 之间; $t_1$ —回波信 号起始时刻; $t_2$ —回波信号结束时刻; $f_0$ —超声波的回 波频率; $\theta$ —回波信号的初始相位<sup>[7]</sup>。

#### 1.2 互相关算法确定回波信号区间

当信噪比较低时,阈值法将无法准确判别出回波

信号,造成测量上的误差。采用信号的互相关算法,通 过比较发射信号和接收信号的相似程度,即使在较低 的信噪比环境下,也可以识别出回波信号位置。离散化 的发射信号为:

$$y(n) = a \cdot \sin(2\pi f_0 n T_s), 0 \le n \le \frac{T'}{T_s} \quad (3)$$

式中:*a*—发射信号幅值;*T<sub>s</sub>*—采样周期;*T′*—超声波发射信号的持续时间;*n*—整数,且设定其初相位为0°。

将采集到的待处理信号 r(n) 与式(3) 进行 M 点 的互相关运算,表示为:

$$R_{yr}(m) = \sum_{n=0}^{M-1} y(n) \cdot r(n+m)$$
(4)

式中: $R_{y}(m)$ — 互相关信号, $m = 0, 1, \dots, M - 1; M$ — 加零延伸后回波信号的数据长度。

根据式(4) 计算出的 R<sub>yr</sub>(m) 信号表示待处理信 号与发射信号之间的相似程度,而一般噪声与 y(n) 不 相关,因此, R<sub>yr</sub>(m) 的峰值即为回波信号出现位置。

但式(4)的运算量较大,对于 *M* 点实数的互相关运算,需要 *M*<sup>2</sup> 次实数乘法运算和 *M*<sup>2</sup> – *M* 次实数加法运算。针对上述问题,运用一种改进的互相关性算法<sup>[8]</sup>,即:

$$R_{yr}(m) = y(-m) * r(m)$$
 (5)

式中:\*一卷积。

根据式(5),将式(4)转化成卷积形式,并根据时 域的线性卷积性质,运用快速傅里叶算法(FFT)对其 进行计算。

互相关法实现的系统框图如图2所示。



实现图2的快速卷积算法需满足下式:

$$I_1 = N_2 = N = 2^i$$
 (6)

式中:*N*<sub>1</sub>— 待测信号的数据量;*N*<sub>2</sub>— 发射信号的数据量;*i*— 整数。

由图2和式(6)可知:

改进的互相关算法需要进行两次 N 点的 FFT,N 次复乘法和一次 N 点的 IFFT 计算,但对于发射信号的 FFT 可以提前计算,故实际只需计算一次 FFT,N 次复 乘法和一次 IFFT,即需要  $4N + 4N\log_2 N$  次实数乘法和  $2N + 6N\log_2 N$ 次实数加法,当N的个数大于16时,改进 的互相关算法的计算效率有显著提高<sup>[9]</sup>。

进行互相关运算后,得到的结果如图3所示。





为使两个有限序列的线性相关可以用其圆周相关 代替,本研究对原始待处理信号和发射信号都进行了加 零延伸处理。*R<sub>v</sub>*(*m*)的函数图像如图 3(b)所示。

由图 3 可知,图 3(b)的极值点并非图 3(a)回波 信号的起始点,造成误差的原因为:

(1)由于超声波换能器的振动惯性,在初始时刻, 从起振到最大幅值之间需要一定时间,且当接收信号 停止后,换能器会产生小段余震,其持续时间不易测 量,造成发射信号与接收信号持续时间的误差;

(2)在传播过程中回波信号衰减,相对于发射信号,其波形强度和振荡时间产生了变化。

由于上述原因,使用互相关算法只能得到回波信号大致区间,并非信号起始点。由于回波信号包络线如图3(a)所示,即从起振点开始,幅值先缓慢增大,到达最高值后再逐渐衰减,则*R<sub>yr</sub>(m)*函数极大值*m<sub>pos</sub>与回波信号起始点 m<sub>start</sub> 需满足下式:* 

$$m_{\rm pos} - m_{\rm start} = KT_0 \tag{7}$$

式中: $T_0$ —超声波振动周期;K—整数。

#### 1.3 回波信号起始位置的定位

根据上述分析,单独运用互相关算法并不能准确 搜寻到回波信号的起始位置,为此本文提出一种波动 性评价函数,对接收信号的波动性进行定量检测,从而 找出第一个回波信号的位置。

信号波动评价函数为:

$$F = \frac{s^2}{\sigma^2} \tag{8}$$

式中:s<sup>2</sup>—当前周期方差值;σ<sup>2</sup>—相邻的前一个周期 方差值;F—信号波动特性。

波形周期的方差值表示为与波形均值的偏离程度,其值越高,则信号幅值起伏程度越大。当波形信号 未出现时,其方差值趋近于0,且F值变化较为平稳。 而从信号起振至最大幅值处,其振幅呈现递增趋势,其 接近起始波形处的斜率趋于平缓;波形未起振时刻各 个周期的方差值与产生回波信号后的方差值相比有较 大差距。因此,根据式(8)可知,在回波信号区与未起 振区的交界处,评价函数 F 将会出现极值。因此,在搜 索方向上,函数 F 出现的第一个极值所处的位置,即为 信号起始位置。

根据超声波的传播特性,以最大量程所能接收到的 回波信号的持续时间为基准,设定参考信号的持续时间  $T' = (t_1 - t_2) \min,则在超声波测距装置的量程范围内,$  $必满足 <math>m_{\text{pos}} \ge m_{\text{start}}$ 。根据采样频率 $f_s$ 与回波频率 $f_0$ 确定 单周期回波信号所占据的点数  $N = f_s/f_0, N$ — 整数。

自 m<sub>pos</sub>始,按波形衰减方向搜索,其算法示意图如 图 4 所示。



图 4 回波信号起始点提取算法示意图

从图4中可以看出:

由于起始波形的周期相较于前一周期会有较大波 动变化,按图4所示方向搜索到F<sub>max</sub>对应的位置,即为 波形起始位置。

### 2 实验验证

#### 2.1 实验平台的搭建

为验证所设计的回波信号起始点算法的有效性和 测距精度,本文搭建实验平台如图5所示。



图 5 实验系统

在实验平台中,超声波换能器型选用 DYA - 40 - 12C 型收发一体换能器,中心频率为40 kHz;传感器测 控部分采用自主开发的主控板,其中,温度测量和补偿

功能由 DS18B20 数字温度传感器和补偿算法实现<sup>[10]</sup>, 声速补偿为:

$$c = 331.09 \times \sqrt{1 + \frac{T(t)}{273.15}}$$
 (9)

式中:c-介质中的声速;T(t)-当前温度。

#### 2.2 波动评价函数的性能检测

本文从接收信号中抽取5组,对其进行数字滤波。 为保持滤波后相位不变,先用 IIR 椭圆带通滤波器设计 滤波参数,对待处理信号进行零相位滤波。根据回波频 率,设计通带频率[38 kHz,42 kHz],阻带频率[35 kHz, 45 kHz],通带纹波最大衰减为0.01 dB,阻带纹波最 小衰减为60 dB。

接收信号和滤波后信号如图6所示。



由于零相位滤波不会造成相位偏移,滤波后 m<sub>pos</sub> 的值较滤波前不会发生改变。本文拟采用零相位滤波 后的信号为理想超声波接收信号,并计算接收信号信 噪比,即:

$$SNR = 10 \times \lg \frac{\sum s_i^2}{\sum (s_i - s_{ni})^2}$$
(10)

式中:s<sub>i</sub>—理想超声波回波信号;s<sub>ni</sub>—含噪声的回波信号。

信噪比越大,则含噪声量越少,信号越纯净。

本研究分别对5组接收信号进行信噪比计算,并 采用本文设计的评价函数对滤波前后的信号进行起始 位置判断,结果如表1所示。

表1	不同信噪比下评价函数的效果
----	---------------

序号	SNR	$T_0$	$T_1$
1	17.4	6	6
2	8.7	6	6
3	7.0	5	5
4	6.6	2	2
5	5 2	1	2

SNR— 超声波回波信号的信噪比; $T_0$ — 未经过零相位滤波 的回波信号经过方差比较法测得 $m_{start}$  距 $m_{pos}$  的周期个数; $T_1$ — 经过零相位滤波的回波信号经过方差比较法测得 $m_{start}$  距 $m_{pos}$ 的周期个数 由表1可知:

利用方差比较法判定波形起始点具有较高的抗干 扰能力,且信噪比较低,即在信噪比于6 dB 左右的情 况下,也可以较为准确地完成初始波形的检测。

#### 2.3 测量实验

在该实验中,利用型材搭建支撑架固定超声波换 能器,并使之与水平地面平行,以此来测量换能器与地 面之间的距离。

利用下式计算被测距离:

$$d = \frac{1}{2}c \cdot T_{OF} \tag{11}$$

式中:d— 被测距离; $T_{or}$ — 超声波的渡越时间<sup>[11]</sup>。

通过定点多次测量及全量程距离测量实验,验证 传感器的测量精度和重复性。

实验数据如表2所示。

表2 重复性测量

实测/mm	400.00	1 000.00	1 600.00	2 200.00		
测量结果1	400.72	1 000.35	1 600.38	2 200.86		
测量结果2	400.79	1 000.51	1 600.42	2 200.71		
测量结果3	400.68	1 000.32	1 600.32	2 200.83		
测量结果4	400.75	1 000.47	1 600.29	2 200.75		
测量结果5	400.81	1 000.29	1 600.53	2 200.65		
标准差	0.052	0.097	0.094	0.086		

表2为多个定点在同一环境下,不同时间段连续 测量5次的结果,可知其样本标准差≤0.097 mm,距 离测量重复性高。

为验证本文提出的超声波测距方法的测量精度, 通过上述系统,在相同环境下,利用不同的测距方法对 已知距离进行测量,结果如图7所示。



图7结果表明:

在硬件系统相同的条件下,采用可控增益放大器 下的固定阈值法<sup>[12]</sup>,与实际测量值相比,其测量误差 最大误差值达到3 mm;而采用本文改进后的互相关算法,其测量结果较为稳定,测量误差可控制在1.3 mm 以内。

## **3** 结束语

本文提出了一种基于互相关法的超声波测距方 法,利用互相法和卷积的关系,使用快速卷积法减少 了计算量;通过分析超声波发射和接收信号的特点, 利用回波信号各周期方差比较的方法评价波形信号 的波动程度,在互相关算法的基础上寻找到了回波 信号的起始点,即使在信噪比较小的环境下,也能精 确地得到超声波脉冲信号的飞行时间,最后通过温 度传感器校正环境中的声速,有效地提高了超声波 测距的精度。

实验结果表明,在3000 mm 实测范围内,其误差 控制在1.3 mm 内,可满足大部分工业测量需求。

#### 参考文献(References):

- [1] 潘仲明,简 盈,王跃科.基于两步相关法的大量程超声 波测距技术[J].电子测量与仪器学报,2006,20(6):73-76.
- [2] 柯 涛,丁 松,吴化峰,等.反应堆压力容器接管内圆角 区超声检测方法研究[J].压力容器,2018,35(7):59-66.

- [3] 李 戈,孟祥杰,王晓华,等.国内超声波测距研究应用现状[J].测绘科学,2011,36(4):60-62.
- [4] 田文成,周西峰,郭前岗.一种改进的高精度超声波液位 测量方法的研究[J].微型机与应用,2017,36(9):78-80, 84.
- [5] 杨令晨,周武能,汤文兵,等.超声波测距系统的研究及其 硬件设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(2):41-47.
- [6] VIDAL B, FOMIER A, PELLETIER E. Wideband optical monitoring of nonquarterwave mulitilayer filters [J]. Appl Opt, 1979, 18(22): 3851-3856.
- [7] 程晓畅,苏绍景,王跃科,等.超声回波信号解调及其包络相关时延估计算法[J].传感技术学报,2006,19(6): 2571-2573.
- [8] 胡广书.数字信号处理——理论、算法与实现[M].第二版.北京:清华大学出版社,2003.
- [9] 张振宇,宣贵新,曾凡鑫.基于 FFT 的直扩序列周期相关
  函数的计算[J].计算机工程与应用,2007,43(10):93-95.
- [10] 于 姣.基于单片机带温度补偿的超声波测距仪设计 [J].电子科技,2015,28(8):56-59.
- [11] 彭映成,钱 海,黎小毛,等.基于时间互相关的超声测 距信号获取方法[J]. 仪表技术与传感器,2014(6):126-127,130.
- [12] 杨劲松,王 敏,黄心汉.超声波可变阈值测距装置[J]. 计算机应用,1998(7):7-9.

[编辑:程 浩]

#### 本文引用格式:

张从鹏,李 弘,周邦平.基于互相关法的超声波高精度回波定位方法研究[J].机电工程,2019,36(8):830-834.

ZHANG Cong-peng, LI Hong, ZHOU Bang-ping. Precise ultrasonic distance measurement method based on cross-correlation algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(8):830-834. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn