

一种高精度超声波测距处理方法^①

童 峰 许水源 许天增

(厦门大学海洋学系 厦门 361005)

摘要 根据声的发射、反射及传输理论推出并用实验验证了测距回波包络曲线的近似方程, 据此提出了一种高精度超声波测距信号处理方法. 介绍了以单片机实现该方法的超声测距系统, 该系统在 2.5~12 m 范围内测距误差不大于 0.25%.

关键词 超声测距, 信号起伏, 单片机

中国图书分类号 TB 551

超声测距是一种非接触的检测方式, 和红外、激光及无线电测距相比, 在近距范围内超声测距有其不受光线影响、结构简单、成本低等特点, 因此在工业控制、建筑测量、机器人定位等方面得到了广泛的应用. 这方面国内外都做了很多工作^[1~4]. 由于信号起伏、温度对声速的影响等原因, 超声测距系统测距精度的提高受到很大的限制, 这也影响到了超声测距系统在一些精度要求较高的场合的应用, 所以, 这个问题的研究有很大的现实意义.

本文在我系和厦门大学电子工程系联合研制的 863 项目“超声地形障碍检测系统”中测距部分的基础上, 对这个问题作了较深入的研究, 提出了一个实时性好, 在较大测距范围内具有较高精度的新的回波信号处理方法, 并完成了以 8051 单片机为核心的实际系统的设计和调试, 结果表明, 测距精度取得了较大的提高.

1 测距脉冲回波包络研究

在超声测距系统中, 测距误差也即声脉冲传输时间 t 的测量误差, 实际上是对测距脉冲回波前沿的检测误差. 为了能精确地推算出其前沿, 必须对测距脉冲回波包络的特性进行分析.

1.1 理想回波包络

首先研究理想条件下, 即空气介质均匀、不存在起伏时回波信号的包络特性.

超声换能器通过压电晶片的逆效应——电致伸缩, 在空气介质中产生超声波. 测距所用超声波一般都是间断单脉冲发射, 每测距一次, 发射、接受一次. 所以在测距脉冲的发射过程中, 发射换能器晶片经历了受迫振动、平衡振动和衰减振动三种状态. 根据声的发射、反射理论及应用力、声类比, 我们可推出理想条件下的测距回波包络曲线方程^[5], 波形见图 1.

在各段中回波声压 p 方程如下

$$p = \begin{cases} p(t) & 0 < t < q \\ \frac{1}{\omega C} [a_0 - e^{\lambda(t-q)}] & q < t < f \\ \frac{S_m}{e^{\lambda t}} e^{-\lambda t} & t > f \end{cases} \quad (1)$$

^① 本文 1998-02-23 收到; 国家 863 计划资助项目

其中: 1) $0 \sim q$ 段因时间短, 检测不方便, 且表达式较复杂, 故不作进一步研究; 2) $d_0 c_0$ 为空气密度和声速, f 为发射脉宽; 3) s_m 为理想回波的声压峰值, 是与换能器及反射介质有关的常数; 4) q 为发射换能器发射时受迫振动段持续时间, 是与换能器材料有关的常数; 5) $C X_{a0}$ 是与换能器、反射介质有关的常数.

1.2 起伏回波包络

起伏是引起超声测距误差的主要原因, 所以有必要对起伏条件下回波曲线的特性进行分析, 从而找出能克服起伏的处理方法.

1) 起伏信道 同理想条件相比, 空气介质中的起伏是非常复杂的, 是一随机时、空、频变的过程. 其原因主要是空气介质中声速、衰减和散射系数的随机不均匀. 可把空气介质看作一随机时、空、频变信道, 输入为理想信号 $s(t)$, 输出为起伏信号 $y(t)$:

$$s(t) \xrightarrow{H(k, t, r)} h(k, t, r) \xrightarrow{\quad} y(t)$$

起伏反映在输出信号 $y(t)$ 上有两方面的效果, 一是造成了信号幅度的起伏; 二是造成了回波信号在时域的漂移. 这两方面的起伏既影响了信号的检测, 也是造成测距误差的主要原因.

2) 简化起伏模型 为了对复杂的起伏效应进行深入的分析, 提出一简化的起伏模型. 在测距脉冲脉宽 τ 很短 (一般测距系统均满足) 的条件下:

$$\text{时域起伏 } y_s(t) = s(t + \Delta t)$$

Δt 为漂移时间, 简化后在 τ 范围内认为是常量;

$$\text{幅域起伏 } y_u(t) = U^0 s(t)$$

U 为幅度起伏系数, 简化后在 τ 范围内认为是常量;

$$\text{总起伏信号 } y(t) = U^0 s(t + \Delta t) \quad (2)$$

该模型实质是略去空气介质在短时间范围 τ 内起伏的变化, 与实际情况相比不可避免会引入误差. 本文只是利用其中引入的参数对起伏回波做一简单的分析, 分析结果有待实验证实.

3) 起伏回波包络分析 根据上述结果, 对回波曲线的上升段分析其起伏特性. 因图 1 中 II 段曲线易于检测, 故以此为分析对象.

$$\text{理想条件下 } s(t) = d_0 c_0 C^0 [a_0 - e^{-X(t-q)}] \quad q < t < f \quad (3)$$

$$\text{起伏条件下 } y(t) = U^0 d_0 c_0 C^0 [a_0 - e^{-X(t-q+\Delta t)}] \quad q < t < f \quad (4)$$

对两曲线进行归一化处理

$$S(t) = s(t) / s_{\max} = d_0 c_0 C^0 [a_0 - e^{-X(t-q)}] / s_m \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Y(t) &= y(t) / y_{\max} = U^0 d_0 c_0 C^0 [a_0 - e^{-(t-q+\Delta t)}] / (U^0 s_m) \\ &= [d_0 c_0 C / s_m]^0 [a_0 - e^{-X(t-q+\Delta t)}] \end{aligned} \quad (6)$$

可见经归一化处理后幅域的起伏已被消去. 接下来进行近似处理: 由泰勒公式, 在小区间 $[0, t]$ 内, 有

$$e^{-X} = 1 + (-X)^0 + [(-X)^2 / 2]^0 t^2 + \cdots + [(-X)^n / n!]^0 t^n + R_n(t)$$

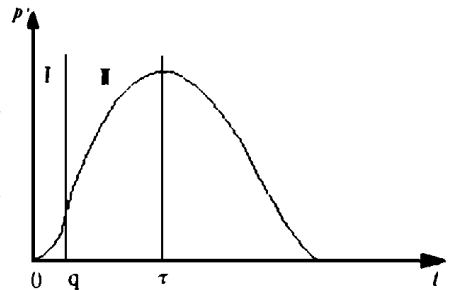


图 1 测距回波包络曲线图

Fig. 1 Envelope of receiving signal

$$\cong 1-X_e t$$

(7)

则起伏回波归一化曲线 $Y(t)$ 化为

$$\begin{aligned} Y(t) &= [d_0 c_0 C / s_m]^\circ [a^0 - (1-X_e t)^\circ e^{X_{q-\Delta t}}] \\ &= [d_0 c_0 C / s_m]^\circ [X_e e^{X_{q-\Delta t}} \circ t - e^{X_{q-\Delta t}} + a_0] \\ &= [d_0 c_0 C / s_m]^\circ [(X_e e^{X_{q-\Delta t}}) \circ t - (X_e e^{X_{q-\Delta t}})^\circ (1/X_e) + a_0] \end{aligned}$$

(8)

由此得到了回波归一化曲线上升段的线性近似方程,可表示为

$$Y(t)=K^\circ t-K^\circ A+B$$

(9)

其中 $K=[d_0 c_0 C / s_m]^\circ X_e e^{X_{q-\Delta t}}$,为时域起伏因子; $A=[d_0 c_0 C / s_m]^\circ (1/X_e)$,为常数; $B=[d_0 c_0 C / s_m]^\circ a_0$,为常数.

分析方程形式可知回波归一化包络曲线上升段在起伏条件下可近似看作是一族直线.方程中的 K 因子反映了时域起伏情况, A 、 B 因子则是与换能器及反射介质材料有关的常数.

1.3 实验研究

1) 拟合直线方程 通过测距实验得到相同反射面不同距离时的回波归一化包络上升段曲线,对其进行线性回归后如表 1.

表 1 线性回归方程 (反射面: 均质木板)

Tab. 1 Linear regression equations (reflecting face: mean plank)

距 离 (m)	线 性 方 程	距 离 (m)	线 性 方 程
$d_1=5.576$	$Y=1.101t+0.334$	$d_{12}=9.071$	$Y=1.478t-0.260$
$d_2=6.116$	$Y=1.048t+0.250$	$d_{13}=9.728$	$Y=1.375t-0.406$
$d_3=6.236$	$Y=1.510t+0.700$	$d_{14}=9.968$	$Y=1.428t-0.326$
$d_4=7.027$	$Y=1.405t+0$	$d_{15}=10.203$	$Y=1.344t-0.464$
$d_5=7.901$	$Y=1.388t-0.121$	$d_{16}=10.476$	$Y=1.226t+0.358$
$d_6=7.936$	$Y=1.341t-0.136$	$d_{17}=10.616$	$Y=1.219t+0.036$
$d_7=8.141$	$Y=1.413t+0.001$	$d_{18}=10.867$	$Y=1.313t+0.037$
$d_8=8.305$	$Y=1.562t+0.165$	$d_{19}=11.340$	$Y=1.352t-0.143$
$d_9=8.455$	$Y=1.290t-0.019$	$d_{20}=11.575$	$Y=0.922t+0.167$
$d_{10}=8.671$	$Y=1.342t-0.108$	$d_{21}=12.632$	$Y=1.260t-0.234$
$d_{11}=8.869$	$Y=1.438t-0.095$	$d_{22}=14.710$	$Y=0.795t+0.016$

参照方程 (9),对以上线性方程进行拟合,可得 A 、 B 因子

$$A=0.424, B=0.520$$

$$y=K^\circ t-0.424^\circ K+0.52$$

2) 理论误差分析 用方程 $y=K^\circ t-0.424^\circ K+0.52$ 代表回波归一化曲线对前述 22 点实验数据进行推算,误差范围: $-0.39\% \sim 0.26\%$,平均误差: 0.023% .可得出这种拟合算法的误差情况.由图 2可知,理论推导和实验情况符合得较好.由上述误差计算发现有少数点的误差远大于平均值.其原因在于空气介质的瞬时强烈起伏,此时不满足前述曲线包络方程推出的起伏条件,这样就造成了较大的误差.由于大误差点是由随机瞬时剧烈起伏引起,故可采用多次平均处理将其抑制.

1.4 新的抗起伏处理方法

由以上理论分析与实验结果,可提出一种基于归一化包络曲线方程的抗起伏信号处理方法,其步骤为:

- 用一定的检测方法计算出方程中的起伏参数;
- 根据包络方程推算出回波的理想前沿;
- 得到准确的声波传输时间;
- 乘声速除 2 即得距离。

对空气介质瞬时剧烈起伏引起的大误差则采用软件平均处理加以抑制。这种算法的特点在于:同时考虑回波的时域漂移和幅域的起伏。

2 基于新处理方法的超声测距系统

2.1 算法原理

检测及算法步骤如下(见图 3):

a. 由电平 V_1 、 V_2 检测得对应时间 T_1 、 T_2 , 其中 $T_1 = t_0 + t_1$, $T_2 = t_0 + t_2$ (t_0 为脉冲前沿到达时间), 并经峰值检测得回波峰值 V_m ;

b. 回波归一化包络曲线近似方程 $y = K \cdot t - 0.424^\circ K + 0.52$, 而 $y = \frac{V}{V_m}$, 则从 V_1 、 V_2 两个检测电平可得两个方程

$$y_1 = \frac{V_1}{V_m} = K \cdot t_1 - 0.424^\circ K + 0.52,$$

$$y_2 = \frac{V_2}{V_m} = K \cdot t_2 - 0.424^\circ K + 0.52;$$

c. 由这两个方程可推出时域起伏因子 K $= \frac{y_1 - y_2}{t_1 - t_2}$, 其中 $t_1 - t_2 = T_1 - T_2$, 则

$$K = \frac{V_1 - V_2}{(T_1 - T_2)V_m};$$

d. 可算出脉冲前沿到达时间 $t_0 = T_1 - t_1 = T_1 - \frac{y_1 + 0.424^\circ K - 0.52}{K}$;

e. 声速 $C = 331.45 + 0.61t$, t 为温度 ($^\circ\text{C}$);

f. 得到距离 $d = \frac{C \cdot t_0}{2}$ 。

系统中取 $V_1 = 1.6V$, $V_2 = \frac{2}{3}V_1$ 。

2.2 系统硬件部分^[6]

系统的换能器、发射、前置接收、盲区处理及包络检出部分采用原 863 项目中超声测距部分前级的电路, 提高测距精度的信号处理部分则基于新的处理方法设计。系统硬件框图见图 4。

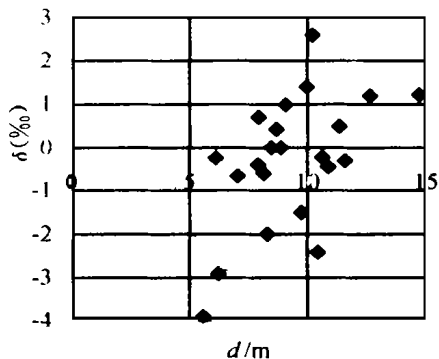


图 2 理论误差示意图

Fig. 2 Diagram of theoretical ranging accuracy

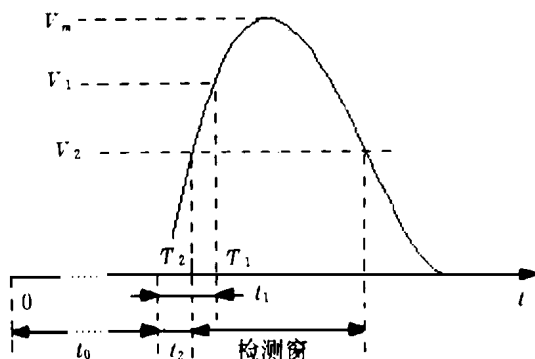


图 3 检测原理图

Fig. 3 Diagram of detection principle

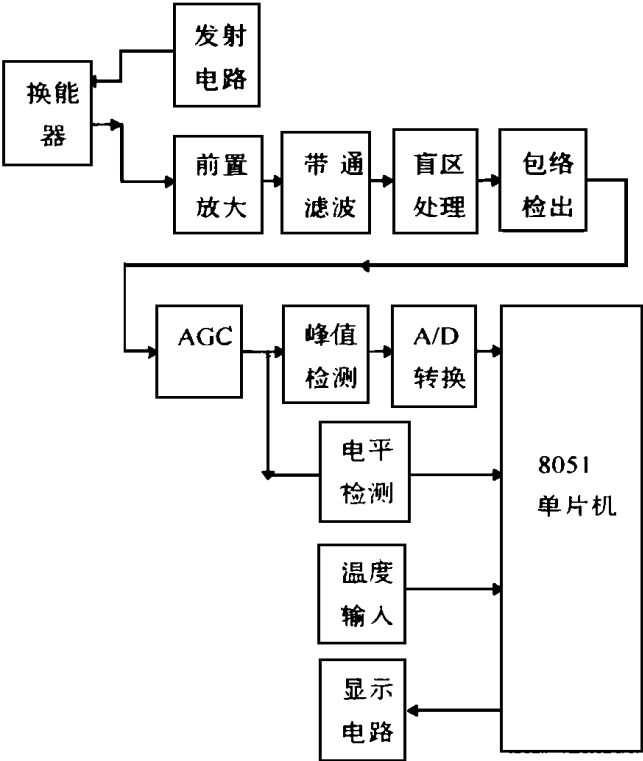


图 4 系统硬件框图

Fig. 4 Block diagram of system hardware

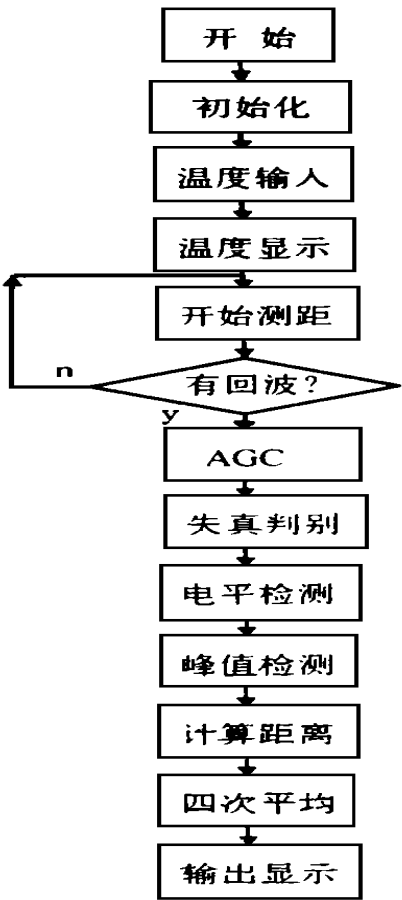


图 5 系统软件流程图

Fig. 5 Flow chart of system software

2.3 系统软件部分^[7]

系统软件部分有以下功能: 软件校正温度变化; 自动增益控制 (AGC); 严重失真判别; 4 次平均处理; 显示输出。图 5 为系统软件框图。

2.4 系统测距结果

不同距离处系统测距结果如表 2 所示。结果表明, 在 2.5~12 m 范围内, 系统最大测距误差为 0.24%, 且有较高的稳定性。

3 结 论

- 本文提出的起伏模型及推出的起伏回波归一化包络曲线方程基本符合实际情况。
- 以本文提出的抗起伏信号检测方法为基础的超声测距系统具有较高的精度和稳定性。

表 2 测距精度表

Tab. 2 The results of distance measurement tests

d_0 (m)	d_i (测距结果 , m)					W(相对误差 ,‰)				
2. 465	2. 471	2. 468	2. 467	2. 469	2. 462	2. 4	1. 2	0. 8	1. 6	- 1. 2
3. 893	3. 896	3. 891	3. 899	3. 898	3. 897	0. 8	- 0. 5	1. 5	1. 3	1. 0
4. 841	4. 842	4. 847	4. 845	4. 844	4. 850	0. 2	1. 2	0. 8	0. 6	1. 9
5. 570	5. 568	5. 566	5. 570	5. 571	5. 569	- 0. 4	- 0. 7	0	0. 2	- 0. 2
6. 542	6. 535	6. 534	6. 537	6. 537	6. 535	- 1. 1	- 1. 2	- 0. 8	- 0. 8	- 1. 1
7. 319	7. 313	7. 314	7. 314	7. 308	7. 314	- 0. 8	- 0. 7	- 0. 7	- 1. 5	- 0. 7
8. 064	8. 058	8. 055	8. 052	8. 058	8. 057	- 0. 7	- 1. 1	- 1. 8	- 0. 7	- 0. 9
9. 185	9. 173	9. 175	9. 169	9. 172	9. 176	- 1. 3	- 1. 1	- 1. 7	- 1. 7	- 1. 0
10. 234	10. 232	10. 236	10. 241	10. 225	10. 233	- 0. 2	0. 2	0. 7	- 0. 9	- 0. 01
11. 898	11. 887	11. 889	11. 885	11. 876	11. 888	- 0. 1	- 0. 1	- 0. 1	- 1. 8	- 0. 1

参 考 文 献

1 Figneroa J F, Lamancusa J S. A method for accurate detection of time of arriva Analysis and design of an ultrasonic ranging system. J. Acoust. Soc. Am. , 1992, 91(1): 486~ 494

2 Grmmel P M. Improve ultrasonic detection using the analytic signal magitade . Ultrasonics, 1981, 19(2): 73 ~ 76

3 翟国富,刘茂恺.一种实时高精度的机器人用超声波测距处理方法.应用声学,1990(1): 17~ 24

4 王春麟.提高超声回波检测测距精度的方法.电测与仪表,1995(2): 22~ 24

5 董峰.高精度超声测距系统研究: [硕士学位论文].厦门: 厦门大学海洋学系,1997 7~ 10

6 徐曼钧.智能化测量控制仪表原理与设计.北京:北京航空航天大学出版社,1995

7 吕俊芳.传感器接口与检测仪器电路.北京:北京航空航天大学出版社,1994

A Processing Method with High Precision for Ultrasonic Distance Measurement

Tong Feng Xu Shuiyuan Xu Tianzeng
(Dept. of Oceanog. , Xiamen Univ. , Xiamen 361005)

Abstract Based on the theory of ultrasonic's launching, reflecting and transmitting, an approximate equation descrbing the envelope of reflecting signal is derived and then verified experimentally. After that, a high-accuracy detection processing method is presented and a practical system realized with a 8051 single chip microcomputer is introduced. Distance measurement tests between 2. 5~ 12 m show that its accuracy is satisfied.

Key words Ultrasonic distance measurement, Signal fluctuation, Single chip microcomputer