

◇ 研究报告 ◇

超声动态测距的一种直接数字解调处理方法^{*}

赵治俊¹ 王选择^{1,2†} 张雨¹ 王科¹ 罗应瑞¹ 翟中生^{1,2}

(1 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068)

(2 湖北省现代制造质量工程重点实验室 武汉 430068)

摘要 为了减少传统的相位差超声动态测距的复杂性,提出了一种基于直接数字解调的信号处理方法。运用 STM32 内部两路 A/D 同步采集超声测量信号与参考信号,对这两组信号数据通过最小二乘椭圆拟合方法,计算 $[-\pi, \pi]$ 单周期范围内的实时相位差。在此基础上,对实时相位差进行解包裹运算,得到绝对相位差。最后,通过绝对相位差的变化量与距离变化量成正比的关系,计算出实时的动态变化距离值。实验结果表明:当目标速度不超过 2.5 m/s 时,该方法能够准确地将距离值直接解调出来,满足动态变化条件下跟踪测距要求。

关键词 数字解调,超声动态测距,椭圆拟合,相位差,解包裹

中图分类号: TH741.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2017)02-0155-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.02.010

A direct digital demodulation method for dynamic ultrasonic distance measurement

ZHAO Zhijun¹ WANG Xuanze^{1,2} ZHANG Yu¹ WANG Ke¹

LUO Yingrui¹ ZHAI Zhongsheng^{1,2}

(1 School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

(2 Hubei Key Laboratory of Modern Manufacture Quality Engineering, Wuhan 430068, China)

Abstract In order to simplify the traditional dynamic ultrasonic distance measurement system by phase difference, a signal-processing method based on direct digital demodulation is proposed in this article. Specifically, two internal A/D of the STM32 are used to collect the ultrasonic metrical signal and reference signal synchronously. Then the two sets of signal data are fitted using the least square ellipse fitting method in order to calculate the real-time phase difference in one-period($[-\pi, \pi]$). Based on the real-time phase difference, the absolute phase difference can be calculated, using the unwrapping algorithm. Finally, the real time dynamic changing of distance is obtained base on the proportion relationship between the change of phase difference and the change of distance. The results of the experiment indicate that when the speed of the target is less than 2.5 m/s, the method proposed in this article can accurately track the change of distance, which meets the requirement of dynamic distance tracking and calculating.

Key words Digital demodulation, Dynamic ultrasonic ranging, Ellipse fitting, Phase difference, Unwrapping

2016-05-05 收稿; 2016-08-23 定稿

^{*}国家自然科学基金(51275157, 51275158, 51575164), 湖北省科技支撑计划项目(2015BCE047)

作者简介: 赵治俊(1990-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向: 传感器信号处理。

[†]通讯作者 E-mail: wangxz@mail.hbut.edu.cn

1 引言

超声测距是一种便捷的非接触式测距方法^[1]。由于超声波具有方向集中^[2]、能量衰减慢^[2]、穿透力强、在介质中传播距离远等特点,被广泛应用于现代工业,如距离测量^[3]、车辆定位导航^[4]、液位、温度^[5]等动态变化情况下的物理量的测量。

目前应用最广泛的超声动态测距原理可分为三种:飞行时间检测法^[5]、多频测距法^[5]、相位差检测法^[5]。飞行时间检测法的关键技术难点是时延估计^[6],常用的时延估计方法有互相关函数法^[6],可变阈值检测法^[5]。在互相关函数法中,其相关函数在极值附近波动^[7],导致搜索其相关函数的极值变得困难^[7],且受噪声干扰影响较大^[7],其准确性随着信噪比的降低而显著降低^[5]。可变阈值检测法以信号过零检测为基础^[5],只适用于信噪比较高的条件下。如果测距距离过远使得噪音干扰加重^[8],或者环境本身的噪声干扰就比较严重,则难以通过阈值检测测得准确距离。多频测距法^[5]是指在同一距离下发射多个不同频率的超声波^[9-11]实现测距,多频测距方法要求实现起来较复杂,对硬件要求较高。相位差法^[12]是通过比较超声波接收时的相位与发射时的相位差,再通过相位差与声波波长的关系^[5]计算出距离值,其精度较飞行时间检测法和多频测距法而言更高。但是传统相位差检测法是通过模拟电路将所测量的两路信号整形为方波信号或者脉冲,再对方波信号或者脉冲处理^[5]。这种硬件电路的实现方法,测量系统电路复杂,容易受外界噪声的干扰,测量精度受到影响。同时飞行时间检测

法与多频测距法由于有测量时间的限制,难以满足动态测量的要求。

针对以上超声动态测距方法及其信号处理方法上的缺点,本文以相位差检测法原理为基础,提出一种基于直接数字解调式的信号处理方法,来获取距离值。具体思路如下:首先设计基于相位差检测法的测量电路,并运用STM32单片机对超声测量信号和参考信号同步A/D采样。其次,运用椭圆拟合算法^[13-14]和相差方向判断对两路采样信号拟合出 $[-\pi, \pi]$ 单周期范围内的实时相位差,在此基础上,运用相位解包裹^[15]算法对实时相位差进行拼接处理,将绝对相位差解调出来。最后,将绝对相位差的变化转换成距离值的变化,计算出距离值的动态变化值,从而达到动态测距的目的。

2 超声测距系统

本系统采用收发式的超声测距方法,测量原理图如图1所示。系统可分为信号发射端和信号接收端。

信号发射端由STM32单片机1连续输出频率为40 kHz的正弦激励信号,该激励信号同时加载在超声发射电路和激光发射电路。超声发射器受激励后发射40 kHz的超声波信号,激光器也同步发射频率为40 kHz的光信号。信号接收端的超声换能器接收到超声发射器产生的超声波信号,并将其转换为电信号,作为超声测量信号。同时,光电管接收到激光器同步发射的光信号,将其转换为电信号。由于光速远远大于声速,光电转换信号与信号发射端近似同相,因此,光电转换信号作为参考信号。由于

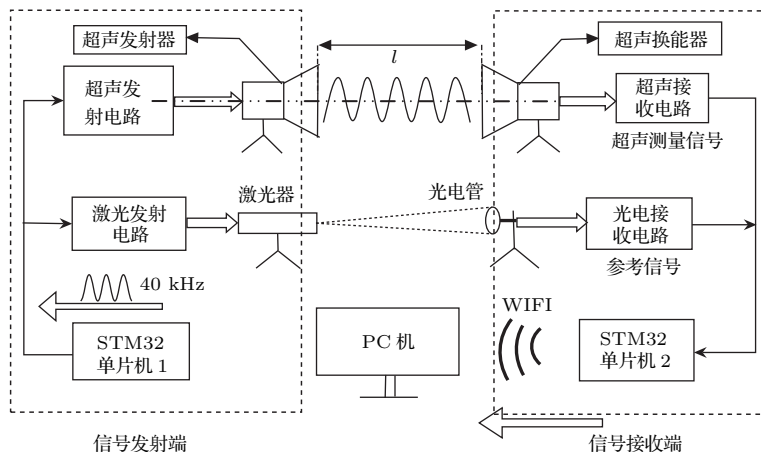


图1 测量原理图

Fig. 1 Measuring principle chart

超声测量信号与参考信号是来源于同一个正弦信号激励源的作用结果, 因此它们具有相同的频率。另外, 由于声波的传输延迟, 超声测量信号与参考信号之间存在一定的相位差, 且相位差随发射端与接收端之间距离的变化发生改变。

为了实时获取测量信号与参考信号的相位差, 本文设计了通过STM32单片机2对超声测量信号和参考信号进行同步A/D采集, 并对采集的两路信号进行椭圆拟合与相差方向判断, 得到 $[-\pi, \pi]$ 单周期范围的实时相位差, 然后运用解包裹算法将实时相位差还原成绝对相位差。最后, 将绝对相位差通过WIFI传输给PC机显示, PC机再根据绝对相位差的变化与距离变化量的正比关系, 即可计算出动态变化下的距离值。采样信号处理流程图如图2所示。

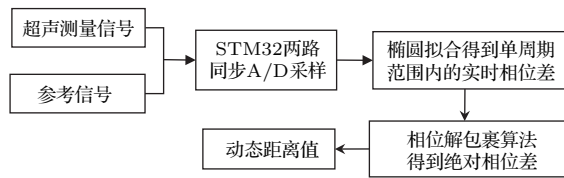


图2 采样信号处理流程图

Fig. 2 Flow chart of sampling signal processing

3 椭圆拟合提取相位差方法

3.1 基于最小二乘法原理的椭圆拟合思想

对于参考信号和超声测量信号, 可以用如下数学表达式来表示

$$\begin{cases} x(t) = A_1 \cos(2\pi ft) + C_1, \\ y(t) = A_2 \cos(2\pi ft + \varphi) + C_2, \end{cases} \quad (1)$$

其中 x 是参考信号, y 是超声测量信号, A_1, A_2 分别为这两组信号的幅值, C_1, C_2 分别为这两组信号的偏置, f 是激励频率, 本系统设计为40 kHz。 φ 是超声波测量信号与参考信号的单周期实时相位差。

为了得到 φ 的大小, 式(1)的椭圆参数方程可以转化为如下的直角坐标系方程^[11-12]:

$$x^2 + a_0xy + a_1y^2 + a_2x + a_3y + a_4 = 0, \quad (2)$$

且式(1)和式(2)之间参数满足如下关系:

$$\begin{cases} \varphi = \arccos\left(\frac{a_0}{-2\sqrt{a_1}}\right), \\ C_2 = \frac{a_0a_2 - 2a_3}{4a_1 - a_0^2}, \\ C_1 = -\frac{a_2}{2} - \frac{a_0}{2}C_2, \\ A_1 = \frac{\sqrt{C_1^2 + a_1C_2^2 + a_0C_1C_2 - a_4}}{\sin\varphi}, \\ A_2 = \frac{A_1}{\sqrt{a_1}}. \end{cases} \quad (3)$$

如果将采样所得的两组离散量化的A/D转换结果 x_i, y_i 代替式(2)中的 x, y , 应用最小二乘法拟合方法, 就可以求解得到直角坐标系方程的系数。令最小二乘拟合目标函数为

$$\begin{aligned} f(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4) \\ = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + a_0x_iy_i + a_1y_i^2 + a_2x_i + a_3y_i + a_4)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, N 为采样总点数。

为使式(4)的结果最小, 对目标函数各参数 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 求偏导数^[12], 并令其等于0, 可以得到关于 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 的线性方程组, 应用矩阵方程求解此线性方程组可得

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i & N \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^N x_i^3 y_i \\ -\sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 \\ -\sum_{i=1}^N x_i^3 \\ -\sum_{i=1}^N x_i^2 y_i \\ -\sum_{i=1}^N x_i^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在获取 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 的基础上, 再利用公式 (3) 的第一个等式, 即反余弦函数, 可求 $[0, \pi]$ 半周期范围内的实时相位差 φ 。

为了保证拟合相位差具有尽可能高的精度, 采样长度尽量为整周期数。

在实验环境尽可能相同的条件下, 每次实验距离不变, 对周期长度为 21 点的采样数据进行拟合, 实时处理 10 组单周期数据, 得到某个测量距离下的拟合实时相位差结果。依此, 在两种距离条件下, 各测 10 组数据所拟合的实时相位差结果如表 1 所示。

表 1 两种距离条件下的相位差拟合结果
Table 1 The fitting results of phase difference between two kinds of distance

距离条件	拟合实时相位差 (rad)										标准方差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
距离 1	2.371	2.389	2.399	2.390	2.351	2.389	2.376	2.420	2.391	2.389	0.011
距离 2	2.728	2.751	2.753	2.752	2.773	2.748	2.762	2.765	2.736	2.744	0.014

从实验结果来看, 拟合相位差具有较高的重复性, 标准方差小于 0.02 rad, 最大最小拟合结果之差小于 0.1 rad。根据相位差与测量距离的关系, 换算成测量距离, 对于 0.1 rad 的相位差, 相当于 0.135 mm 的误差。对于超声测距而言, 具有较高的分辨率。

3.2 相位差 φ 的符号判断

由于反余弦获得的半周期实时相位差范围仅为 $[0, \pi]$, 不能反映超声测量信号在一个周期内是超前还是滞后的。如图 3 所示, 图 3(a) 中超声测量信号超前参考信号, 图 3(b) 中超声测量信号滞后参考信号, 且超前与滞后量接近。但它们形成椭圆具有同样的形状, 因此不能仅仅根据椭圆的形状来判断超声测量信号是超前还是滞后于参考信号。为了不影响后续的相位解包裹算法, 需要准确判断式 (3) 中 φ 的符号。

式 (3) 中的 φ 的计算值取值范围为 $[0, \pi]$, 实际测量过程中, 若超声测量信号超前, 则不变; 若滞后, 则 φ 取反, 范围为 $[-\pi, 0]$, 如何将反余弦所求 φ 的区间由 $[0, \pi]$ 扩展为 $[-\pi, \pi]$, 从而得到前面所叙述的单周期范围内的实时相位差, 还需要对椭圆的旋转方向进行判断。判断方法用以下的方案解决。

实验发现: 采样点 (x_i, y_i) 构成的椭圆形状与相位差的大小有关, 而超声测量信号超前或滞后与采样点随时间形成的椭圆旋转方向有关。若椭圆顺时针旋转, 则 $\varphi > 0$, 若椭圆逆时针旋转, 则 $\varphi < 0$, 因此可以通过椭圆旋转方向来判断超前与滞后。假设原始椭圆是由一系列点 (x_i, y_i) 构成, 以

拟合椭圆的中心 (c_1, c_2) 为起点, 原始椭圆上的点 (x_i, y_i) 为端点可以构成 N 个向量。不妨记这些向量为 $\mathbf{a}_i = (x_i - c_1, y_i - c_2, 0)$, 在如图 4 所示的三维空间中, 考察任意相邻两点与拟合椭圆中心点构成的两个向量 $\mathbf{a}_i$ 和 $\mathbf{a}_{i+1}$ 的向量叉乘结果 $\mathbf{s}_i$, 并且记向量 $\mathbf{s}_i$ 沿 z 轴方向的分量坐标为 d 因此有

$$d_i = (x_i - c_1)(y_{i+1} - c_2) - (x_{i+1} - c_1)(y_i - c_2), \quad (6)$$

当 $d_i > 0$ 时, 也即 $\mathbf{s}_i$ 的方向朝向 z 轴正半轴时, 此时的路径是由点 $(x_i, y_i, 0)$ 转向 $(x_{i+1}, y_{i+1}, 0)$, 椭圆是顺时针转动, 此时所求的 $\varphi > 0$; 同理当 $d_i < 0$ 时, 椭圆是逆时针转动的, 此时 $\varphi < 0$ 。如果仅凭某两点形成的向量来判断椭圆的旋转方向和 φ 的符号有失偏颇, 因为可能存在某一两个点抖动而导致 d 的符号判断失误。这也可以从图 3 原始椭圆的点的分布情况可看出某个别点存在反复现象, 因此为保证判断旋转方向的可靠性, 消除局部误差点的影响, 这里对所有分量坐标 d_i 求和, 判断 φ 的符号, 即有

$$d = \sum_{i=1}^{N-1} [(x_i - c_1)(y_{i+1} - c_2) - (x_{i+1} - c_1)(y_i - c_2)], \quad (7)$$

且有以下结论: 当 $d > 0$ 时, $\varphi < 0$; 当 $d < 0$ 时, $\varphi > 0$ 。

考虑到反余弦获得的相位差为无符号的 $[0, \pi]$ 范围, 当得到相位差符号后, 就能获取 $[-\pi, \pi]$ 单周期范围内的实时相位差, 也就能反映一个周期内的超前与滞后信息了。

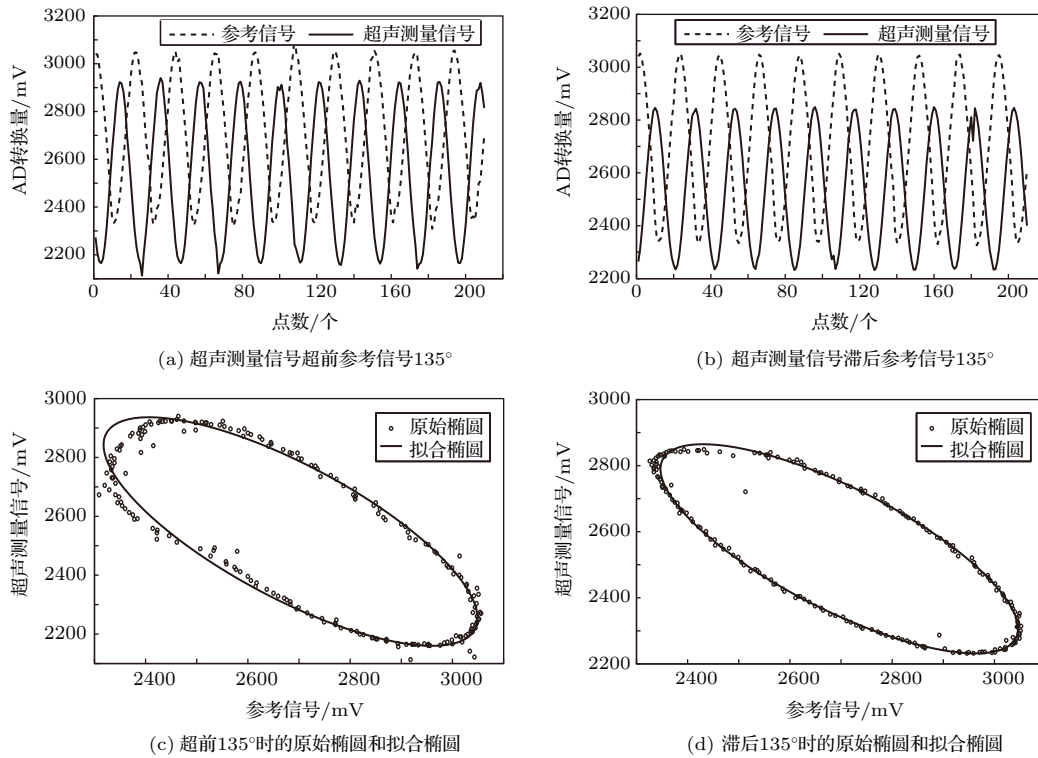


图3 原始信号采集图

Fig. 3 Original signal acquisition map

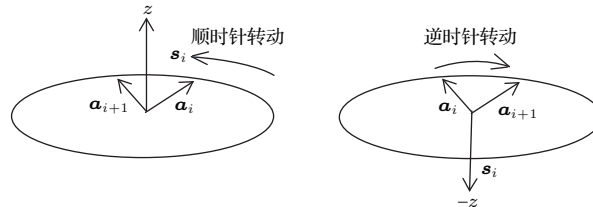


图4 椭圆旋转方向示意图

Fig. 4 Rotational direction of elliptical map

4 相位解包裹原理

在测量过程中,相位差变化一个周期 2π 则对应距离变化超声波的一个波长 λ 。前面椭圆拟合所解出的单周期范围内的实时相位差 φ 在 $[-\pi, \pi]$ 之间变化,故仅凭前面的单周期实时相位差 φ 所得的距离变化值范围为 $[-\lambda/2, \lambda/2]$ 。在实际场合,距离的测量范围远远不止一个波长 λ ,所以这里的 φ 不能反映绝对距离变化值。考虑当距离变化超过一个周期时, φ 的计算结果存在跳变^[14],且跳变量的大小超过 π 。

为了测出距离值,就必须还原绝对的相位差变

化,需要进行前面所提取 $[-\pi, \pi]$ 单周期区间内的实时相位差进行相位解包裹运算,也即对这些跳变点进行拼接^[15]处理。具体的算法采用以下公式来实现。

$$\psi_i = \begin{cases} \psi_{i-1} + \theta_i - \theta_{i-1}, & |\theta_i - \theta_{i-1}| \leq \pi, \\ \psi_{i-1} + \theta_i - \theta_{i-1} + 2\pi, & \theta_i - \theta_{i-1} < -\pi, \\ \psi_{i-1} + \theta_i - \theta_{i-1} - 2\pi, & \theta_i - \theta_{i-1} > \pi, \end{cases} \quad (8)$$

i 为序列号, $i = 1 \sim n$, θ_i 为解包裹前的单周期范围内的实时相位差, ψ_i 为解包裹后的绝对相位差。

相位解包裹程序流程图如图5所示。

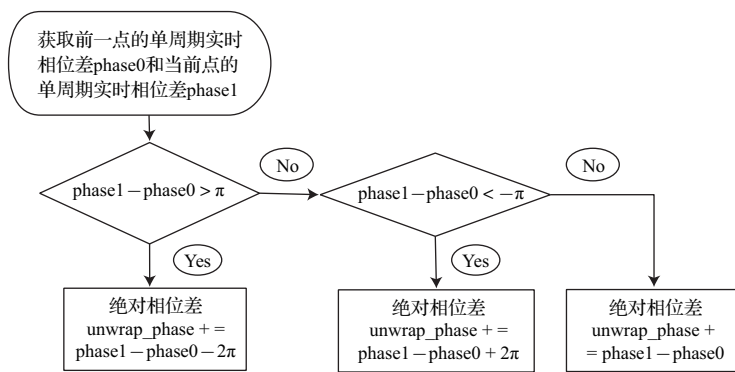


图5 相位解包裹程序流程图

Fig. 5 Flow diagram of phase unwrapping

5 距离测量实验结果与分析

实验过程中,测量系统采用激励频率为 40 kHz 的 TCT40-16R/T 型分体式超声波传感器, CPU 频率为 72 MHz 的 STM32F103 型单片机。实验开始前,固定信号发射端,随后在发射接收直线距离上不断移动信号接收端(距离增大或减小),移动过程中,信号接收端的 STM32 单片机的 A/D 采样周期为 1.17 μ s,每次采样数据量为 1 个周期,即 21 个数据。单次采样完毕后,再进行椭圆拟合与解包裹运算,最后将解包裹运算所得的绝对相位差传输给 PC 机。传输完成后,下一次 A/D 采样开始,依次循环之。

由于椭圆拟合运算所耗时间与采样数据量成正比,因此,每次参与拟合的采样数据要尽量少。试验中取一个周期的数据,拟合耗时 1.7 ms。因此 STM32 单片机每隔 1.7 ms 做一次椭圆拟合运算,而解包裹运算成功的前提是相邻两次椭圆拟合的相位差不能超过 π 。因此当超声换能器在 $\Delta t = 1.7$ ms 内移动距离不超过 $\lambda/2$,也即移动速度理论上应满足条件: $v \leq \lambda/2/\Delta t = 2.5$ m/s,此方法满足一般测距场合的需要。

图6和图7分别为解包裹前的单周期范围内的实时相位差和解包裹后的绝对相位差随时间的变化图。对比图6和图7可以看出,解包裹前的单周期实时相位差 φ 从 π 跳变到 $-\pi$ 和从 $-\pi$ 跳变到 π 时,解包裹后的绝对相位差都能准确地衔接处理。当所测距离连续变化,解包裹算法能够将绝对相位差解调出来,再跟据绝对相位差的变化计算出距离值的变化值,实现了超声动态测距的目的。

若记 t_0 时刻解包裹所得的绝对相位差为 φ_0 , t

时刻解包裹所得绝对相位差为 φ_t , 超声波的波长为 λ 。由于距离值变化值与解包裹后的绝对相位差的变化值成正比例关系,则所测距离值 l 的表达式如式(9)

$$l = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda = \frac{(\varphi_t - \varphi_0) v_{\text{声}}}{2\pi f}, \quad (9)$$

其中 $v_{\text{声}} = 340$ m/s, $f = 40$ kHz, 距离变化曲线图如图8所示。

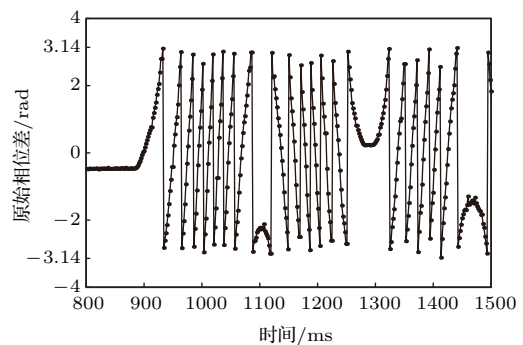


图6 解包裹前的单周期实时相位差

Fig. 6 The real-time phase difference before unwrapping in one-cycle

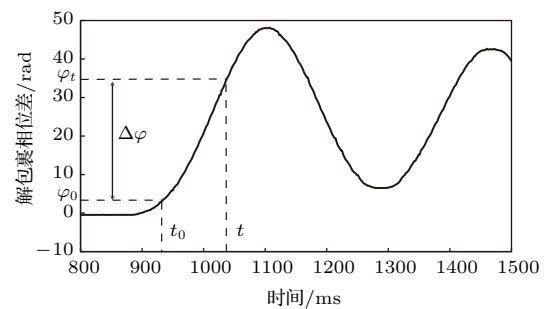


图7 解包裹后的绝对相位差

Fig. 7 The absolute phase difference after unwrapping

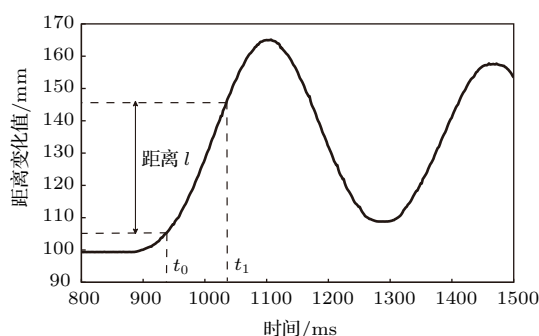
图8 距离 l 的变化曲线

Fig. 8 The changing curve of the distance

6 结论

本文以相位差法实现超声动态测距为基础,提出了一种直接数字解调信号处理方法,该方法主要包括两步:第一,通过椭圆拟合和相差判断提取限于一周内的单周期相位差;第二,通过相位解包裹算法获取连续性质的绝对相位差。在移动目标变化速度不超过 2.5 m/s 时,该方法能够在 $[-\pi, \pi]$ 之间变化的单周期实时相位差准确地还原成绝对相位差。通过绝对相位差的变化计算出相应的距离值变化值,能够满足一般动态测距场合的需要。如果进一步采用高频率的 STM32 单片机,算法处理所耗时间可以缩短,移动极限速度还可以进一步得到提高。

该方法将所采集的超声测量信号和参考信号直接运用数字解调得到相位差,而传统的相位差超声测距法是通过模拟电路处理提取相位差,相比较而言,本文所提方法省去了硬件解调中设计电路的复杂性,避免了因电路复杂导致测量系统的信噪比降低,直接通过算法程序拟合提高了测量系统的灵活性,且测量系统也具有较高分辨率。

参 考 文 献

- [1] QUEIRÓS R, ALEGRIA F C, GIRÃO P S, et al. A multi-frequency method for ultrasonic ranging[J]. Ultrasonics, 2015, 63: 86–93.
- [2] JACKSON J C, SUMMAN R, DOBIE G I, et al. Time-of-flight measurement techniques for airborne ultrasonic ranging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2013, 60(2): 343–55.
- [3] LUKIĆ J, DENIĆ D. A novel design of an NTC thermistor linearization circuit[J]. Metrology & Measurement Systems, 2015, 22(3): 351–362.
- [4] 宋灿, 刘石, 任思源. 基于超声波飞行时间的温度测量系统实验研究[J]. 应用声学, 2015, 34(4): 351–357.
- SONG Can, LIU Shi, REN Siyuan. Based on the ultrasonic time of flight of the temperature measurement system experimental study[J]. Journal of Applied Acoustics, 2015, 34(4): 351–357.
- [5] 沈梦婷. 基于相位检测的高精度异体收发式超声波测距系统[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [6] 王宏江, 郭会军, 李军怀. 超声回波信号包络相关时延估计优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(20): 154–157.
- WANG Hongjiang, GUO Huijun, LI Junhuai. Optimization algorithm of TDE based on ultrasonic echo envelope correlation[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(20): 154–157.
- [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.
- CHENG Xiaochang, SU Shaojing, WANG Yueke, et al. Algorithm of TDE based on ultrasonic echo demodulation and its envelope correlation[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2006, 19(6): 2571–2562.
- [8] SAAD M M, BLEAKLEY C J, DOBSON S. Robust high accuracy ultrasonic range measurement system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(10): 3334–3341.
- [9] 吴军, 沈梦婷. 高精度多频脉冲超声测距法研究[J]. 计算机工程, 2015, 41(2): 278–281.
- WU Jun, SHEN Mengting. Study on high accurate ultrasonic ranging method using multi-frequency pulse[J]. Computer Engineering, 2015, 41(2): 278–281.
- [10] 张兴红, 张慧, 陈锡侯, 等. 一种精密测量超声波传输时间的方法[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(6): 717–721.
- ZHANG Xinghong, ZHANG Hui, CHEN Xihou, et al. A method to precisely measure ultrasonic transmission time[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(6): 717–721.
- [11] 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.
- LI Ge, MENG Xiangjie, WANG Xiaohua, et al. Research and application status on domestic ultrasonic ranging[J]. Science of Surveying & Mapping, 2011, 36(4): 60–62.
- [12] 张向珂, 张世庆, 闻凤连, 等. 高精度相位法超声测距系统研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(2): 45–47.
- ZHANG Xiangke, ZHANG Shiqing, WEN Fenglian, et al. Study of a phase ultrasonic range measurement system with high precision[J]. Transducer & Microsystem Technologies, 2010, 29(2): 45–47.
- [13] 王选择, 孔德靖, 翟中生. 微悬臂振动干涉测量非正交信号的处理算法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(4): 444–448.
- WANG Xuanze, KONG Dejing, ZHAI Zhongsheng. A processing algorithm of non-orthogonal signal for micro-cantilever vibration interferometry measurement[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(4): 444–448.
- [14] 王选择. 正交衍射光栅计量原理及在超精密工作台上的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [15] 钱晓凡, 饶帆, 李兴华, 等. 精确最小二乘相位解包裹算法[J]. 中国激光, 2012, (2): 183–187.
- QIAN Xiaofan, RAO Fan, LI Xinghua, et al. Accurate least-squares phase unwrapping algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, (2): 183–187.