

一种高精度的超声测距系统实现方法

古 叶¹, 孙海信^{1,2*}, 齐 洁¹, 成 垦¹, 卢晓莹¹, 周小平²

(1. 厦门大学信息科学与技术学院, 2. 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了减小超声波测距系统的测量盲区, 提高测距精度, 本系统采用收发异体模式, 以高斯脉冲调制信号作为超声波的发射信号, 通过调节高斯信号的脉冲形成因子, 改善发送信号波形, 使其具有更好的抗干扰能力. 在接收端, 采用相关算法检测回波到达时刻, 在不需要增加额外硬件电路的基础上, 即可实现高精度的测距功能. 实验结果表明, 本系统具有良好的测距效果, 系统稳定, 测距精度达到 1 mm, 相对误差在 1.5% 以内, 无测量盲区.

关键词: 超声波测距; 波形设计; 高斯脉冲; 相关运算

中图分类号: TP 274.5

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2016)03-0396-05

超声波是频率高于 20 kHz 的声波, 超声波测距系统具有易于实现、成本低等特点, 被广泛应用于视觉识别、物体定位、工程测量等. 大部分的超声波测距系统是基于渡越时间(time of flight, TOF)技术, 系统误差主要由换能器振幅延迟和惯性现象导致^[1]. 目前, 我国对提高超声测距精度进行的研究主要侧重于如何获取准确的 TOF. 主要方法有: 阈值检测法、包络峰值检测法、相位检测法等. 阈值检测方法实现简单, 但测距精度低^[2]. 包络峰值检测不受幅度随距离变化和虚假回波的影响, 但需要额外增加电路抑制尖峰信号^[3]. 相位检测根据相位延迟计算距离, 但回波信号幅值随距离成指数型衰减影响测量精度^[4]. 在收发一体结构模式下, 由于漫反射或者镜面反射, 影响回波到达时刻判决^[5]. 并且由于超声波余振的影响会产生测量盲区. 测距精度不高、测量盲区的产生等因素都会造成超声波测距方法适用的局限性.

本系统将使用收发异体结构模式, 采用高斯脉冲调制信号作为超声波发射信号, 引入相关算法, 实现超声回波到达时刻的检测和小信号的获取, 提高超声波测距系统抗噪声性能和抗衰减能力.

1 超声波测距的基本原理

超声波测距系统利用超声波发射探头将电能转

化为超声波振动能^[6], 接收探头获得回波信号. 通过计算超声波 TOF 得到传播距离, 从而实现测距. 本系统采用收发异体的测距模式解决超声波余振问题, 实现无测量盲区的超声测距系统. 超声测距模块分为发送和接收模块, 超声波传播距离计算公式为:

$$D = vt, \quad (1)$$

式中, v 为超声波在介质中的传播速度, t 为超声波 TOF. 由式(1)可以看出, 超声波测距精度取决于测量超声波 TOF 以及传播速度大小的准确性.

超声波测距系统包含温度补偿部分, 通过获取介质温度, 对超声波传播速度进行修正, 从而提高测距精度. 超声波在空气中的传播速度由下式计算得到:

$$v = 331.4 \sqrt{1 + \frac{t + T_0}{273}}, \quad (2)$$

式中: t 为空气介质的温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_0 为常量, 且 $T_0 = 273.16$, v 的单位为 m/s .

超声波测距的另一个关键因素则是 TOF 的测量. 由于硬件本身的局限性, 系统都存在计时误差, 但可选择适当的措施提高时间准确性. 超声波 TOF 的获取主要是对超声回波的分析计算得到. 除此之外, 超声波探头具有带通特性, 系统应产生带宽小的脉冲信号作为发射波形, 当发射脉冲带宽小于超声波探头的带宽时, 即可完全保留发射信号的相关信息. 由于实际情况下, 不能通过时域信号的无限展宽而实现信号频域压

收稿日期: 2015-07-23 录用日期: 2015-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(61471309); 福建省自然科学基金(2013J01258)

* 通信作者: hxsun@xmu.edu.cn

引文格式: 古叶, 孙海信, 齐洁, 等. 一种高精度的超声测距系统实现方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(3): 396-400.

Citation: GU Y, SUN H X, QI J, et al. An implement method for high-precision ultrasonic distance-measuring system[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2016, 55(3): 396-400. (in Chinese)



缩,因此,超声波发射信号的选取是超声波测距系统的首要问题.

2 超声波发射波形设计

超声波传感器可以看作为一个已知中心频率 f_c 和带宽 B 的带通滤波器^[7].发射超声波频谱中超出该带通滤波器带宽范围的部分将被抑制,从而影响发射波的时域波形.在同一硬件设备中,当激励信号一致时,超声波回波信号具有相关性和窄带性^[8],超声波信号随探测距离的改变只有信号强弱的变化,回波信号与发射信号以及回波信号和回波信号之间密切相关.

常用的超声波发射波形为正弦调制矩形脉冲信号,用一个 f_c 为振荡频率的正弦波周期信号调制一个矩形脉冲信号,表达式如下所示:

$$p(t)=u(t)\sin(2\pi f_c t),$$
$$u(t)=\begin{cases} 1,0\leq t\leq T, \\ 0,\text{其他}, \end{cases}$$

式中, $p(t)$ 为正弦波调制矩形脉冲信号, $u(t)$ 为矩形脉冲信号, T 为矩形脉冲信号的长度. $p(t)$ 在频域上表现为 $u(t)$ 在频谱上的搬移,通过设置正弦波频率来实现将矩形脉冲的中心频率搬移到 f_c 处,矩形脉冲信号的频域表达式为一个Sa函数,如下式所示:

$$|F(j\omega)|=\frac{T}{2}e^{j\omega\frac{T}{2}}\left|\text{Sa}\left(\frac{\omega T}{2}\right)\right|.$$

当设定 $T=10\text{ ms}$, 占空比为 $1:9$, 载波频率为 40 kHz , 采样频率为 1 MHz , 则矩形脉冲调制信号的时域和频域波形如图 1 所示.

矩形脉冲信号的频谱为 Sa 函数,除了强度最大的主瓣外还具有很多副瓣.主瓣能量小,抗干扰能力低,主瓣和副瓣相差小.通常情况下我们要求副瓣比主瓣低,副瓣越低,主瓣越高,能量越集中,抗干扰能力

则越强.

本文提出一种新型的超声波发射脉冲信号,利用正弦波调制高斯脉冲信号作为超声波发射信号.通过改变高斯脉冲信号的脉冲形成因子,可以灵活地改变发射脉冲带宽.随着脉冲形成因子的增大,脉冲宽度拓宽,传输信号带宽压缩^[9].正弦波调制高斯脉冲信号时域表达式如下所示^[10]:

$$q(t)=g(t)\sin(2\pi f_c t),$$
$$g(t)=\frac{\sqrt{2}}{\alpha}e^{-\frac{2\pi f_c t}{\alpha^2}},$$

式中, $q(t)$ 为正弦波调制高斯脉冲信号,即超声波发送信号的时域表达式, $g(t)$ 为高斯脉冲基带信号, f_c 为载波频率,起到频谱搬移的作用, α 为脉冲形成因子.脉冲形成因子越大,时域宽度越宽,传输信号频域带宽越小,越适用于窄带传输系统,但是由于考虑到波形宽度影响采样点数,以及整个系统的计算效率,所以不能无限制地延长信号宽度而减小带宽.

在超声测距系统中,高斯脉冲调制信号作为测距系统发射信号具有较好的频域特性.例如设定系统发射脉冲宽度 $T=10\text{ ms}$, 载波频率为 40 kHz , 采样频率为 1 MHz , 高斯脉冲形成因子 $\alpha=10^{-3}$, 那么高斯脉冲调制信号的时域波形和频域波形如图 2 所示.

由图 2 可知,高斯脉冲信号幅频特性具有单峰性,在频率为载波频率处具有较大的峰值,不易受噪声的干扰.对比图 1 和图 2 可知,高斯脉冲调制信号具有主副瓣比高,频域带宽较小的优点,相对于矩形脉冲调制信号而言,更适合作为具有窄带特性的超声波测距系统的发射信号.选择其作为发射信号,系统具有更好的抗干扰能力,经过超声波探头抑制作用以及传输过程中的衰落,信息大部分仍可保留.在此基础上,可实现接下来的回波信号相关处理,获得超声 TOF 精度的提高.

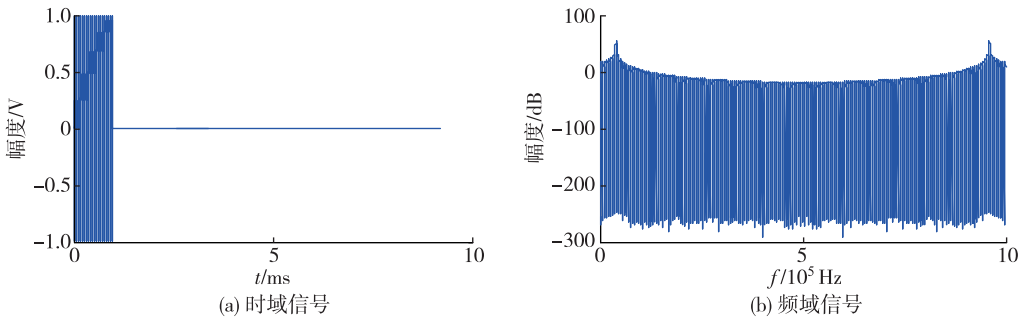


图 1 矩形脉冲调制信号时域频域图
Fig. 1 The time and frequency domain signal of the rectangular pulse

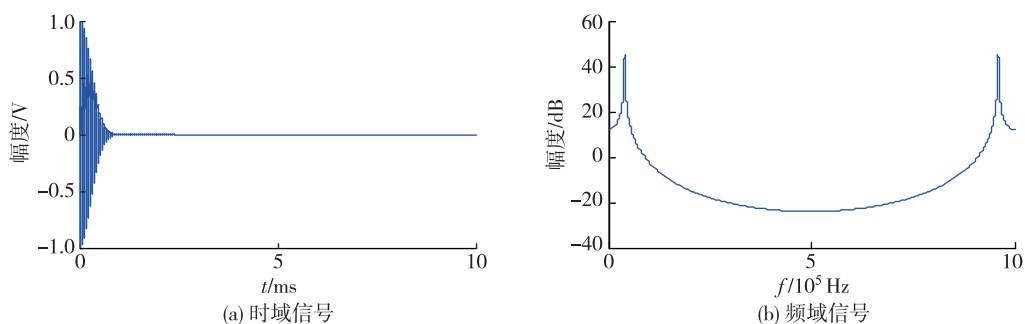


图 2 高斯脉冲信号时域频域图

Fig. 2 The time and frequency domain signal of the Gaussian pulse

3 相关运算在超声波测距中的应用

在超声测距过程中,声波呈指数型衰落,超声远距离测距精度低.在目标所在位置基本不变的情况下,雷达常采用相关算法进行回波信号处理.利用连续时间内接收到的多个回波信号之间具有相关性的特点,通过对同一距离下的多个回波信号进行相位和幅度的叠加,增加其信号能量,对微弱回波信号进行检测,实现长距离检测.将相关运算处理方法运用于超声波测距系统,能够提高系统的抗干扰能力,实现在相同条件下的长距离高精度测距功能.

超声波接收探头的压电晶片具有一定的振动惯量,回波信号作用在压电晶片上,获得的接收信号幅度按照指数曲线增加,经过若干个振动周期后到达饱和状态;超声波发射探头发送完信号,压电晶片仍会保持几个周期的余振^[11].因此,常对单脉冲超声回波信号建模为具有高斯包络的正弦调制信号,有

$$p(t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \sin(2\pi f_c t),$$

式中, β 为回波信号衰减因子, f_c 为超声波探头中心频率, α 为超声波探头带宽因子.建模的目的在于使用模型充分表达所研究的对象,但模型和现实对象总存在一定差距,可在充分实验过程中对相关参数进行修正以达到模型和实际对象逼近的目的^[12].

当发射端和接收端之间的相对距离随时间具有小范围变化时,接收端接收到的多个回波可表示为

$$x_r(t) = x_r(t_n, t_m) = \sum_i A_i p(t_n, t_m) e^{-j\frac{2\pi f_c}{v} R_i(t_m)}, \quad (3)$$

式中 $t_m = mT$, $t = t_n - mT$, T 为脉冲重复周期, A_i 和 $R_i(t_m)$ 分别为第 i 点目标回波的幅度和 t_m 时刻的距离, p 为归一化回波包络, f_c 为载波频率.

由式(3)可得其傅里叶变换为

$$X_r(f, t_m) = P(f) \sum_i A_i e^{-j\frac{2\pi}{v}(f_c + f)R_i(t_m)},$$

其中 $P(f)$ 和 $p(t)$ 是一对傅里叶变换对.

本系统引入匹配滤波对各频率分量的相位进行矫正,按照信号频谱幅度加权,提高信噪比.匹配滤波器的输出结果在时域上看,相当于将回波信号与滤波器的冲激响应作卷积计算.在回波信号已知的条件下,其冲激响应应为该回波信号的共轭倒置.采用频域上先共轭相乘,再对其作离散傅里叶逆变换(IFFT)的方法实现匹配滤波降低运算量.通过匹配滤波处理后,可将 $X_r(f, t_m)$ 化为

$$X_r(f, t_m) = P^*(f) X_r(f, t_m) = |P(f)|^2 \sum_i A_i e^{-j\frac{2\pi}{v}(f_c + f)R_i(t_m)}.$$

假设连续接收到的回波数为 N , 每个回波信号由 M 点离散信号组成,根据 N 组回波信号的采样点可获得一个 $N \times M$ 的矩阵,每一列数据都是相关的,对矩阵的每列数据进行同相相加.对每列数据进行离散傅里叶变换(FFT),实现多个回波信号的相关运算,该方法即加快运算速度,又能对相位差进行补充.

在已知环境温度条件下,对多个回波信号进行匹配滤波再进行相关运算的输出结果如图 3 所示.根据相关运算输出结果的峰值求超声波传输距离.由图 3 可见,输出包络具有唯一的最大值,容易检测.

4 实验结果

超声波测距系统框图如图 4 所示,整个系统在 STM32F103 单片机上实现, Cortex M3 作为发送端和接收端的数据处理模块核心部分,运行相关算法和控制部分外设.

在发送端,通过数字模拟转换器(DAC)输出管脚

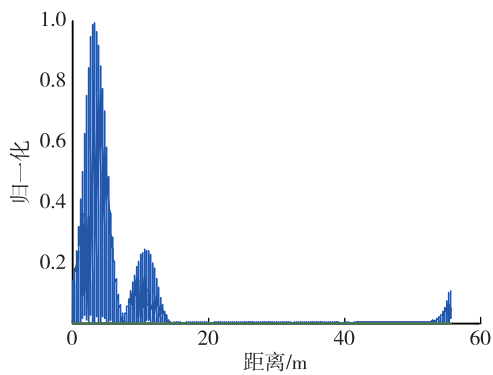


图 3 相关运算结果
Fig. 3 The result of relevant operation

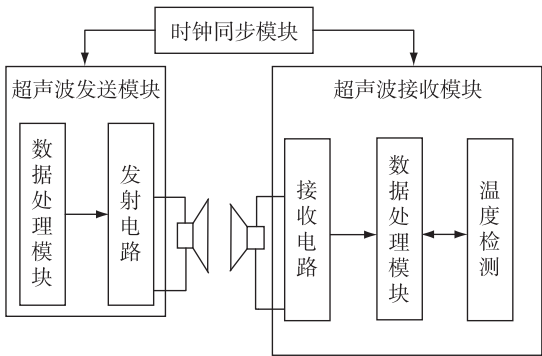


图 4 超声波测距系统框图
Fig. 4 Block diagram of ultrasonic distance measuring system

给发射电路产生一个高斯脉冲调制信号,信号相关参数如表 1 所示.原始信号经过功率放大后,作为超声波探头的激励信号源.

在接收端,接收电路对回波信号进行滤波和放大处理,经过模拟数字转换器(ADC)和直接内存存取(DMA)模块高速输出,在数据处理模块进行相关处理.温度检测部分利用数字温度传感器 DS18B20 芯片实现温度采集,根据式(2)的温度和声速转换公式获取

表 1 发送信号参数					
Tab. 1 Signal parameters					
包络	调制信号	载波频率/ kHz	脉冲宽度/ ms	脉冲形成因子	采样频率/ MHz
高斯信号	正弦信号	40	10	0.001	1

当前环境下超声波的传输速度.在已知温度条件下,通过相关运算计算出超声波传输距离,从而实现测距.

时钟同步模块实现系统同步,发送端发送信号后接收端同步开始进入 ADC 采集,在经过 16 个脉冲宽度的时间后对多个回波信号进行相关处理.

为了进一步提高系统测距准确性以及稳定性,最终的测距结果取 3 次测量的平均值.在所述硬件平台上,对本文所提出超声测距系统的实现效果进行验证,并传统的阈值比较法进行对比,不同距离的测量结果如表 2 所示.实际测量数据可以看出,在同一距离下的连续 3 次测量,传统阈值比较法测距结果波动较大,并且随着距离不断增加,接收到的信号幅度变化较大,测距结果受阈值和幅值影响很大,因此传统阈值比较法测距效果不稳定.基于本文提出的方法得到的测距效果不受距离变化的影响,同一距离下的测距结果浮动范围小,具有较稳定和精确的测量结果.在不同距离下,阈值比较法测距效果随着距离不断增加,波动不断增大.基于本文提出的方法测距效果不受距离变化的影响,随着距离的增加,一直维持较小的相对误差,具有较高的稳定性和精度.同时,由于本文提出的测距方法采用的是收发异体模式,因此该测距方法无测量盲区,可实现短距离测距.

5 结 论

在超声波测距系统中,如何正确获取超声波在介

表 2 超声波测距结果及误差

Tab. 2 Test results and errors of the system										
实际距离/ mm	第 1 次测量/mm		第 2 次测量/mm		第 3 次测量/mm		平均距离/mm		相对误差/%	
	改进	传统	改进	传统	改进	传统	改进	传统	改进	传统
34	34	31	34	36	34	36	34	34	0	0
120	123	125	119	132	123	125	121	121	0.8	0.8
210	208	225	209	227	208	225	208	225	0.9	7.1
330	326	326	331	324	335	324	330	324	0	1.8
420	424	425	420	418	421	426	421	423	0.2	0.7
1 500	1 504	1 497	1 500	1 236	1 508	1 488	1 504	1 407	0.2	6.2

质中的传输速度,以及正确检测超声波在介质中的传输时间,是提高超声波测距系统测量精度的关键之处.本文从超声波信号的产生出发,用高斯脉冲调制信号代替矩形脉冲调制信号,作为超声波发射信号;采用相关算法对多个回波信号进行处理,检测超声波传播距离,实现超声波测距功能.在接收端对数据的处理过程中,不需要增加额外的硬件电路,即可实现高精度的超声波测距.从上述实验结果可以看出:使用超声波收发异体的结构模式,在实现超声波测距时无盲区,系统能够实现超短距离的测距功能.当信号放大倍数足够大时,本系统的测距距离为收发一体可测最大距离的 2 倍.因此,该方法可实现精度高的长距离测距.

参考文献:

- [1] LEE K Y, HUANG C F, HUANG S S, et al. A high-resolution ultrasonic distance measurement system using vernier caliper phase meter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(11): 2924-2931.
- [2] 张海鹰, 高艳丽. 超声波测距技术研究[J]. 仪表技术, 2011, 9: 58-60.
- [3] 卜英勇, 何永强, 赵海鸣, 等. 一种高精度超声波测距仪测量精度的研究[J]. 郑州大学学报, 2007, 27(1): 86-90.
- [4] 叶林, 周弘, 张洪. 相位差的几种测量方法和测量精度分析[J]. 电测与仪表, 2006, 43(4): 11-14.
- [5] 许天增, 许克平, 许茹, 等. 超声传输特性和超声传感系统研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(2): 303-310.
- [6] 施超, 陈爱华, 杨本全, 等. 基于 C8051F020 的高精度超声波测距系统设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(16): 15-16.
- [7] 葛万成. 相关法高抗干扰超声波距离测量中的信号处理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(1): 71-76.
- [8] 程晓畅, 王跃科, 苏绍, 等. 基于相关函数包络峰细化的高精度超声测距法[J]. 测试技术学报, 2006, 20(4): 320-324.
- [9] 贾占彪, 陈红, 蔡晓霞, 等. 正弦高斯组合的 UWB 脉冲波形设计[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(2): 195-198.
- [10] BEAULIEU N C, HU B. A novel pulse design algorithm for ultra-wideband communications [J]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2004, 5: 3220-3224.
- [11] 熊春山, 彭刚, 黄心汉, 等. 基于超声测距的三维精确定位系统与设计[J]. 自动化仪表, 2001, 22(3): 7-10.
- [12] 罗佳, 李永祯, 王雪松, 等. 相控阵雷达仿真系统模型校验方法的研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1380-1385.

An Implement Method for High-precision Ultrasonic Distance-measuring System

GU Ye¹, SUN Haixin^{1,2*}, QI Jie¹, CHENG Ken¹, LU Xiaoying¹, ZHOU Xiaoping²

(1. College of Information Science and Engineering, Xiamen University, 2. Key Laboratory of Underwater

Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to reduce the range of blind areas and improve measurement accuracies, this ultrasonic distance-measuring system adopts the model, in which the sender and the receiver are separated. Gaussian pulse modulated signal is proposed as the transmitter signal. By adjusting the parameters of the Gaussian signal, it can improve the waveform and anti-interference abilities. During the processing of signals, the relevant operation is used to detect the time of echo arrival. Without needing extra hardware circuits, the existing system can achieve high-precision measurements. Experimental results show that the measuring system possesses great distance-measuring capability, system stability, relative error lying within 1.5%, the accuracy at 1mm, and zero measuring-blind area.

Key words: ultrasonic distance measurement; waveform design; Gaussian pulse; correlative algorithm