

基于小波变换的高精度测距系统设计及 DSP 实现

翟宇鹏¹, 张志杰^{1,2}, 张浩¹

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 太原 030051;

2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: **目的** 为了解决传统物流行业机器人避障系统中存在的测距精度低、抗干扰性差等问题。**方法** 提出一种基于 DSP 的温补与小波阈值滤噪的高精度超声测距系统, 包括 DSP 最小系统、超声波传感器、LCD 显示模块、温度补偿电路和报警电路等。超声波测距系统通过实时采集环境温度来修正声速值, 采用小波阈值变换算法对回波信号进行处理, 以提升回波信号的信噪比和起始点锐度。**结果** 应用 CCS4.2 软件与 DSP 芯片进行调试、实验, 实验表明在距离 0~1200 mm 内, 系统的测量误差为 ± 4 mm。**结论** 采用小波阈值变换算法和温补电路, 提高了传统物流机器人避障系统的测距精度。

关键词: 超声波测距; DSP28335; 温度补偿; 小波阈值变换; 物流机器人

中图分类号: TB486.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)07-0148-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.07.022

Design and Implementation of High Precision Ranging System Based on Wavelet Transform and DSP

ZHAI Yu-peng¹, ZHANG Zhi-jie^{1,2}, ZHANG Hao¹

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement,
Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problems of low ranging accuracy and poor anti-interference in the traditional logistics industry robot obstacle avoidance system. A high precision ultrasonic ranging system based on DSP temperature compensation and wavelet threshold noise filtering was proposed, including the minimum system of DSP, ultrasonic sensor, LCD display module, temperature compensation circuit and alarm circuit. The ultrasonic ranging system corrected the sound velocity by collecting the ambient temperature in real time, and used the wavelet threshold transform algorithm to process the echo signal, which improved the signal-to-noise ratio and the starting point sharpness of the echo signal. CCS4.2 software and DSP chip were used for debug and experiment. The experiment showed that within the distance of 0~1200 mm, the measurement error of the system was ± 4 mm. Wavelet threshold transform algorithm and temperature compensation circuit are used to improve the ranging accuracy of traditional logistics robot obstacle avoidance system.

KEY WORDS: ultrasound ranging; DSP28335; temperature compensation; wavelet threshold transform; logistics robot

随着包装和物流行业的快速发展, 物品的快速包装和高效运输成为了行业研究的重点内容。针对高效

运输工具, 传统仓储移动机器人的避障系统多基于超声波测距原理, 利用 51 系列的单片机为主控芯片,

收稿日期: 2019-01-10

作者简介: 翟宇鹏 (1994—), 男, 中北大学硕士生, 主要研究方向为智能机器人设计研发。

通信作者: 张志杰 (1965—), 男, 中北大学教授、博导, 主要研究方向为动态测试和信号处理。

实现机器人的测距与避障功能。由于其主频仅有 12 MHz, 且芯片外设较少, 导致测距系统精度较低, 抗电磁干扰能力较弱, 实时控制效率较差, 并且对于复杂且要求速度较高的控制系统, 单片机已经严重影响了算法功能的实现。文中采用主频 150 MHz 的 DSP28335 为主控制器, 通过加入温度补偿电路、小波阈值变换算法和中值滤波算法, 提高测距精度, 且能够实时显示和保存测量数据^[1], 满足了货物运输中精确避障的要求, 提高了系统的安全性与实时性。

1 超声波测距原理

超声波的能量传输遵循反射、折射、散射和衍射的物理定律。与光信号不同的是, 超声波需通过介质的分子运动才能传播。由于其超声频率高, 线性和方向性强, 因此在介质中传播时能量损失小, 并且测距范围更宽。市场上压电结构的超声波传感器最为常见, 以压电晶片为材料, 其同时具有发射和接收超声波的功能。压电晶片是可逆的, 当外部环境被周期性电压激发时, 晶片变形产生振动, 并且通过振动效应产生超声波; 对应的超声波接收器受到超声波压力作用, 压电晶片产生形变, 从而产生电荷形成电压^[2]。

一般情况下, 超声波粒子位移函数为:

$$L(t) = A(l) \cos(\omega t + kl) = A_0 e^{-\alpha x} \cos(\omega t + kl) \quad (1)$$

$$\alpha = A_e f^2 \quad (2)$$

式中: $L(t)$ 为位移值; A_0 为初始振幅值; ω 为角频率; t 为传播时间; l 为传播距离; α 为衰减系数; k 为波数; A_e 为传播介质; f 为振动频率。

由式 (1) 和 (2) 可知, 超声波振动频率越低, 其衰减系数越小, 信号强度越强, 但是能量越少。在超声波信号中, 高频信号相比低频信号, 具有能量大、传播距离远、反射能力强的特点。基于此特性, 距离检测中利用超声波作为载体, 通过超声波遵循的反射定律, 检测到超声波在空气中的传播时间, 从而计算出检测距离^[3]。目前主要的测距方法有声波幅度检测方法、相位检测方法和渡越时间检测方法。渡越时间法常用于测距范围广、测量时间精度高的场合^[4], 渡越时间法测距的原理见图 1。

图 1 中距离和声速之间的函数关系为:

$$2l = vt \quad (3)$$

$$b = l \cos \theta \quad (4)$$

$$a^2 + b^2 = l^2 \quad (5)$$

式中: v 为当前环境温度的声速; l 为超声波传播的路程; t 为超声波传播的时间; θ 为发射器发射超声波的入射角; b 为障碍物与传感器的垂直距离; a 为发射器与接收器一半的距离值。综合式 (3—5) 可得测试距离:

$$b = \sqrt{\left(\frac{vt}{2}\right)^2 - a^2} \quad (6)$$

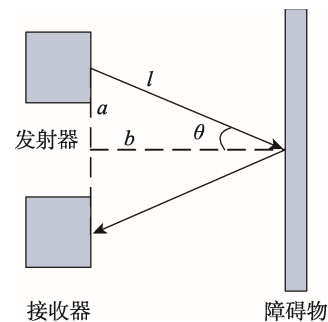


图 1 渡越时间法测距的原理

Fig.1 Principle of transit time method for ranging

2 测量偏差的分析

2.1 超声波发射器发散角和障碍物形状

分析超声波发射器发散角对测量的影响。超声波发射器产生的超声波和障碍物相遇示意图 2。当能量一定时, 发射器发散角越大, 能量越分散, 作用距离越短, 抗干扰能力也越弱, 为了采集到强度较强的回波信号系统, 选用发射角较小的发射头。若 2 个障碍物不是处于同平面, 超声波路程出现偏差, 必然会导致测量精度的下降, 所以要避免探测遇到这种结构体的障碍物。

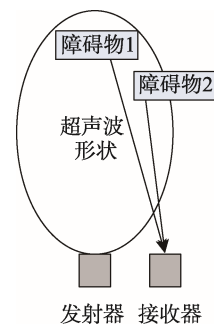


图 2 发射器产生的超声波和障碍物相遇示意

Fig.2 Schematic diagram of the encounter between the ultrasonic wave and the obstacle produced by the transmitter

2.2 环境温度

超声波声速与环境温度有关, 在测距过程中需要考虑温度补偿的问题。通过研究发现, 当环境温度升高 1 °C 时, 声速下降 0.607 m/s。空气中超声波速度与温度之间的关系是:

$$v = 331.4 \sqrt{1 + T / 273} \approx 331.4 + 0.607T \quad (7)$$

式中: v 为声速 (m/s); T 为环境温度 (°C)。由式 (7) 可得到, 当系统处于不同环境温度时, 超声波声速也会不同, 导致测距误差偏大。

2.3 渡越时间的误差

回波信号中含有大量的环境耦合噪声,测距系统中对回波信号始点的识别至关重要。许多研究学者对超声波信号耦合噪声的处理方法中,一般常用的是设计滤波法、频谱分离法和反馈神经网络法等,它们存在相同的缺点:只能应用于单时域分析信号^[5-6]。因本研究中采取的信号属于 40 kHz 高频超声波,其耦合噪声会发生较大变化。利用 TMS320F28335 硬件乘法器和浮点控制器的优点,采用小波阈值变换算法进行滤波,它是一种时域和频域结合的信号处理方法,可以有效增加来的信号的信噪比,使回波信号的提取更加可靠、精确^[7-8]。

3 系统硬件与软件设计

3.1 DSP 控制系统总体设计

系统采用了 TMS320F28335 芯片,因其拥有主频 150 MHz 和 32 位的浮点计算的优势,可满足系统的复杂性与时效性。根据丰富的外围资源接口,设计了电机驱动模块、LCD 显示模块、报警模块、超声波测距模块和电源模块等。移动机器人避障导航系统构成见图 3,移动机器人实物见图 4。

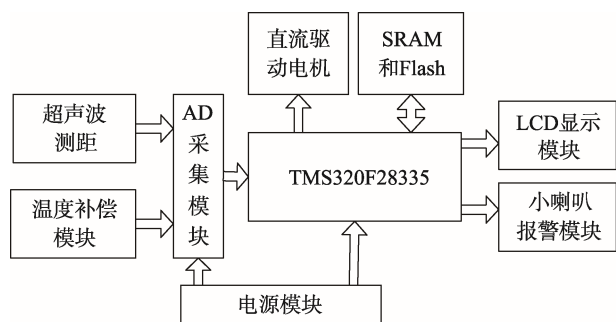


图 3 移动机器人避障导航系统构成
Fig.3 Composition of obstacle avoidance navigation system for mobile robot

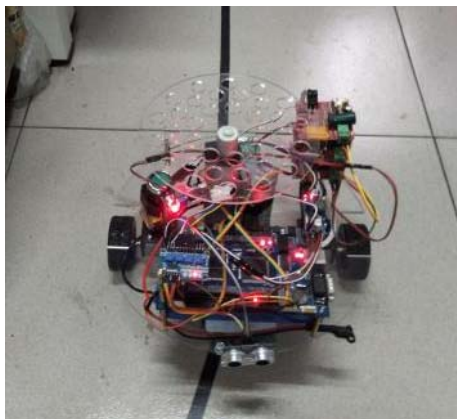


图 4 移动机器人实物
Fig.4 In kind of mobile robot

3.2 超声波发射与接收系统设计

根据文献[9]可知村田公司开放式压电 MA40S4S 超声波传感器的超声频率-声压级特性(输入电压关系)曲线,可以看出在 40 kHz 附近,超声波发射的超声能量最强,并且在中心频率 40 kHz 的两侧连续减小,同时在一定条件下,电压驱动越大,其能量也越大,这表明可以适当提高驱动电压,以提高测量距离。在工业中,一般选择频率为 40 kHz 的超声波。

对于超声波的触发电路,通常窄脉冲触发的激励电路的开关器(大功率场效应管)需要直流高压供电,对于移动机器人显然满足不了;调制脉冲谐振电路仅需要振荡电路来产生高频振荡,以触发换能器发射超声波,振荡电路产生的频率与发射器固有频率相同时,即可输出最佳的超声波信号^[10-11]。系统采用了单脉冲发射电路,由脉冲产生和放大电路组成,由 DSP 发送的方波信号经 PNP 型晶体管放大,并由变压器芯片升压,以驱动换能器产生超声波信号,单脉冲触发电路见图 5。

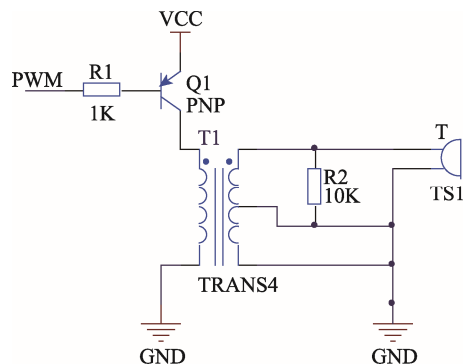


图 5 系统超声波单脉冲触发电路
Fig.5 Single pulse trigger circuit of system ultrasound

超声波信号经过空气传播和障碍物表面吸收后的回波信号的强度会不断减小,并且受环境影响会造成强度不稳定。为了提高增强回波信号的采集效果,设计了一种稳定可靠的接收电路,主要采用了超声波专用芯片 TL852,其 20 ~ 90 kHz 的工作频率满足系统 40 kHz 的超声波信号,包括了回波信号的放大、滤波、增益和整形的功能。超声波接收器的频率-灵敏度特性与输出电阻密切相关,在输出电阻较大的情况下(例如高于超声波传感器阻抗),频率特性容易出现共振现象,这也使得其灵敏度显著提升。在外接电阻较小的情况下(例如 1 kΩ 以下),则频率特性曲线变得平滑,带宽变宽,灵敏度降低,甚至最大灵敏度也在逐渐向频率减小的方向变更^[12],因此,要想提高接收端的灵敏度,可以通过改变相关参数使得超声波接收器的工作状态与高输入电阻匹配的前端放大器工作状态相同,回波信号接收电路见图 6。

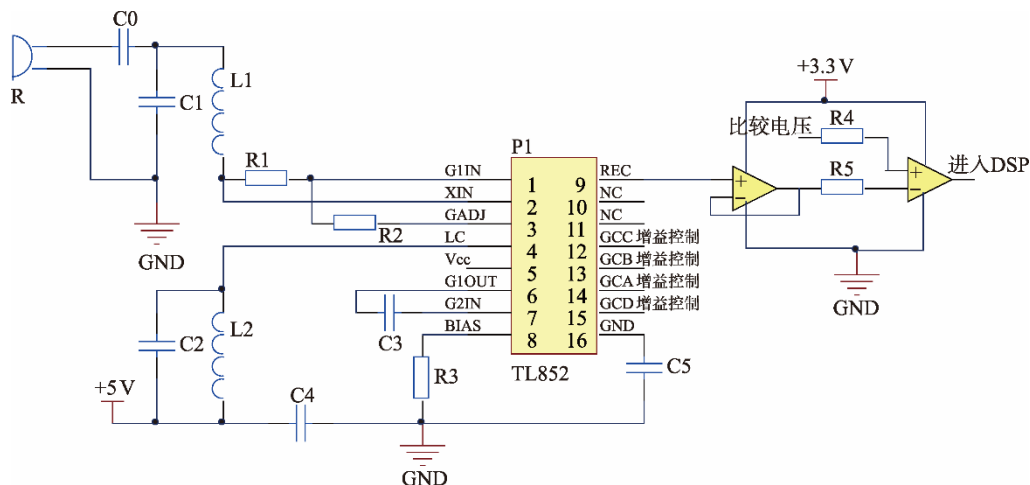


图 6 回波信号的接收电路

Fig.6 Receiving circuit of echo signal

根据传感器工作时序可知,当 F28335GPIO 口输出激励信号 TRIG (至少 $10\text{ }\mu\text{s}$ 高电平信号),模块内部将自动产生 8 个 40 kHz 脉冲信号来触发发射器产生超声波。超声波在接触目标障碍物一瞬间,就会反射回超声波回波信号,检测到有回波信号并将其转换为电信号,作为超声测量信号,经过 AD 采集模块把数据记录到 DSP 芯片中^[13]。

3.3 温度补偿系统设计

温度补偿电路采用了 National Semiconductor 公司的 LM35DZ 芯片, 其测温精度可达 $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 线性度比较高, 且无需外部校准。当 LM35DZ 的输出温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 输出为 0 V , 灵敏度为 $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。移动机器人工作时根据实际环境温度, 换算出超声声速, 实现了实时温度补偿。温度测量电路见图 7。

3.4 小波阈值去噪子程序设计

小波去噪方法很多,常用的为阈值去噪法、极大值去噪法和尺度相关去噪法。针对以 DSP 硬件实现小波去噪,因阈值去噪法计算量小且能够保持信号奇异性,所以选用了小波阈值去噪法处理超声回波信号。超声波测距系统中,当被测距离较远时,回拨信号强度会急速衰减,因此需要放大电路处理,经过放大电路后耦合噪声也随即放大,从而信噪比下降,严重时甚至会淹没有用信号。超声波信号耦合噪声(高斯白噪声)的去除一般采用设计滤波法、频谱分离法和反馈神经网络法等,它们只能适用于单时域分析信号^[14]。小波阈值变换算法本质上是一种多通道带通滤波器,可以处理时域和频域中的回波信号,阈值法可把噪声全部抑制且使原始信号得到完好保留,使信号的最大均方误差最小化,也不会

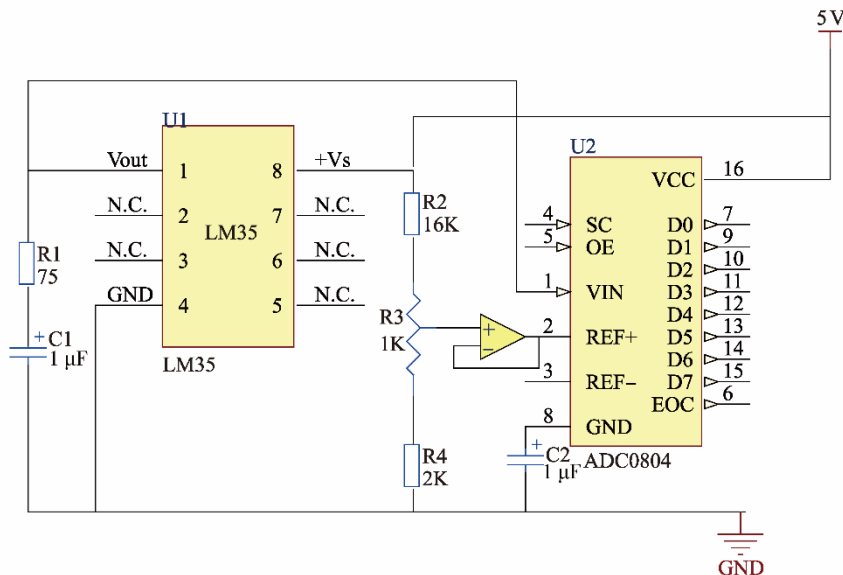


图 7 温度测量电路

Fig.7 Temperature measurement circuit

产生附加的振荡信号。文中使用小波滤波阈值分层和重构后,使回波信号具有良好的滤波效果。回波信号经过 5 次分层分解后,小波阈值去噪前后的回波信号曲线见图 8。

由图 8 可知,通过采用小波阈值去噪中阈值函数对回波信号进行处理,并将降噪处理以后的高频分量和低频分量重构,实现的去噪信号可以明显找到信号的始点,提高了测量的精度。

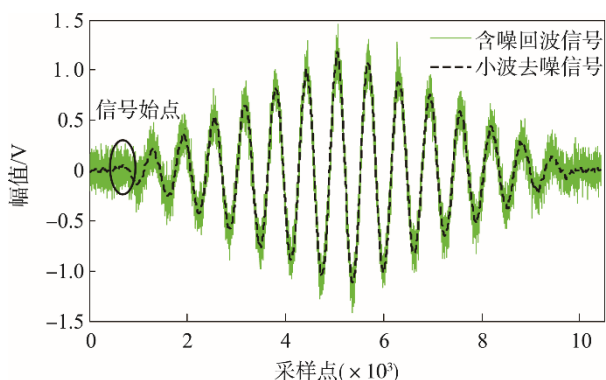


图 8 小波阈值去噪前后的回波信号曲线
Fig.8 Echo signal curve before and after wavelet threshold denoising

3.5 软件流程设计

该系统软件设计的开发环境是基于 C 语言编程的 CCS4.2,整体软件设计流程见图 9。软件程序主要包括主函数、中断子函数、小波阈值去噪函数、中值滤波函数、超声波测距函数及阈值报警函数。系统上电后首先主控芯片进行初始化操作,随后移动机器人开始运动,同时超声波模块和温度传感器模块开始工作,将所测距离与阈值对比,当距离小于阈值时,移动机器人停止并且系统开始报警,并且将距离实时显示到 LCD 屏幕上。小波阈值去噪是处理超声回波信号,以减少环境噪声的干扰,更有利于提取回波信号起点的值。中值滤波算法是将测得距离值去掉一个最大值和一个最小值,然后将剩余值求平均值。此方法可以去除偶然误差,提高了测距精度。利用 DSP 实现小波阈值去噪算法的程序主要设计为 3 部分:小波分解、阈值量化和小波重构。小波分解应用了 Matllat 算法,节省了大量的计算量,计算出的小波系数进入阈值量化模块,处理后的小波系数再进入小波重构模块,最终得到去噪后的有用信号,小波分解示意图见图 10。程序中小波分解的设计思想步骤为:将采取的回波信号视为数组 s_0 ,将 s_0 与低通滤波器系数 y 卷积得到低频数组 s_1 ;将数组 s_0 与高通滤波器系数 x 卷积得到高频数组 k_1 ;完成第 1 级小波分解,低频数组 s_1 进行第 2 级小波分解;完成 5 级小波分解后,得到各级高频数组系数和第 5 级低频数组系数。

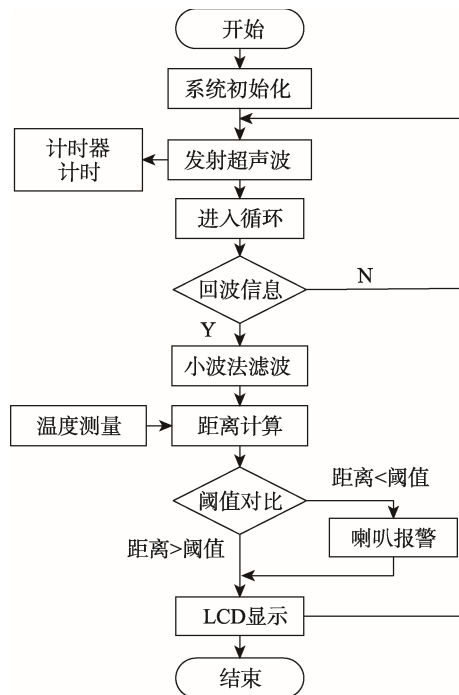


图 9 软件设计流程
Fig.9 Software design flow

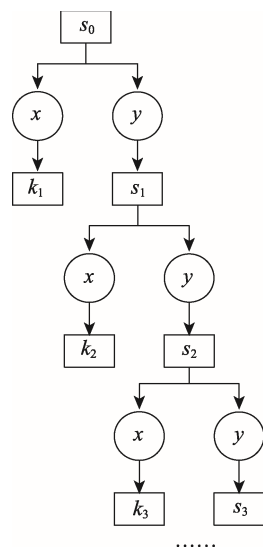


图 10 小波分解示意
Fig.10 Wavelet decomposition diagram

高、低通滤波器的系数 x 与 y 由 Matlab 工具箱中 wfilters 滤波器计算得出。程序中回波信号长度取 128 个字节,可满足系统实时性的要求。小波重构流程和小波分解流程是相反的,经过 3 部分后,就得到滤除噪声的回波信号^[15]。通用阈值法缺乏自适应性,根据噪声小波系数的分布特征,在程序中对通用阈值法进行改进,选取方法为:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln(N)} / \lg(j+1) \quad (8)$$

式中: λ 为小波阈值; σ 为信号噪声强度; N 为选取的信号长度; j 为小波分解尺度。可以看出,阈

值随着分解尺度 j 的增加而减小,符合噪声系数分布特征。回波信号硬件仿真见图 11,小波阈值去噪后回波信号硬件仿真见图 12。可以明显看出,经过小波阈值变换去噪后的回波信号起始点锐度得到了提升,便于 DSP 精确识别回波信号电压值,提高了测量精度。

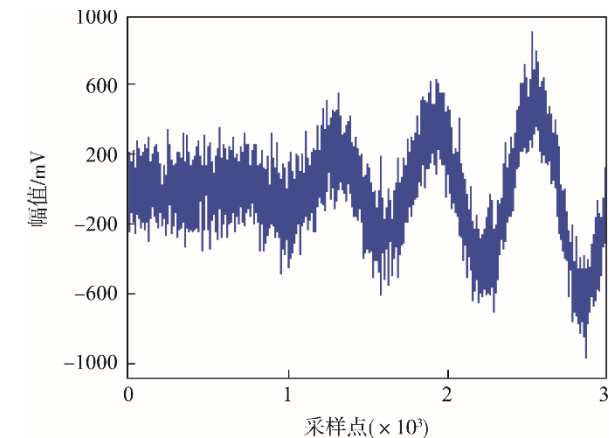


图 11 回波信号硬件仿真
Fig.11 Hardware simulation of echo signal

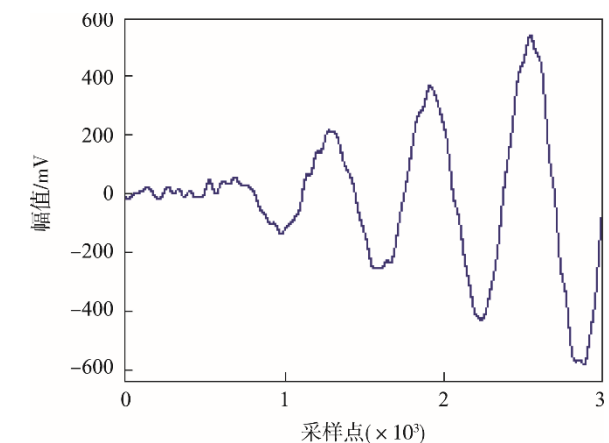


图 12 小波阈值去噪后回波信号硬件仿真
Fig.12 Hardware simulation of echo signal after wavelet threshold denoising

4 系统场地实验

以仓库室内避障导航为应用背景,选择了室内作为实验环境,分别应用了单时域处理的设计滤波法和小波阈值变换算法,一般设计滤波法的过程是傅里叶变换过程,而依据小波阈值变换算法设计的滤波器是根据信号变换尺度进行解析的过程。在实际工程应用中,超声波信号是非平稳信号,傅里叶变换无法处理非平稳信号,而小波阈值变换是一个时间和频率的局部变换,具有良好的空间域和频率域局部化特性,因而能有效地从非平稳信号中提取信息,通过伸缩和平移等运算功能,对函数或信号进行多尺度细化分析,对高频采用逐渐精细的时域或空域步长,可以聚焦到分析对象的任意细节,解决了 Fourier 变换不能解决的许多难题^[16]。在室温条件下选取了 8 个不同距离的测试点,表 1 为室温 20℃ 下设计滤波法和小波阈值变换算法的实验结果。由表 1 可以看出,经过小波阈值变换算法去噪和采用中值变换算法的测距精度都得到了明显提升,相对误差降低了 1%。同时,再加入温度补偿电路后,在小波阈值算法和中值算法条件下,典型温度中有无温补电路的实验结果见表 2,图 13 为在加入温度补偿、小波阈值算法和中值算法后,典型温度条件下测量距离与测量相对误差之间的关系。加入温补电路后,可看出该系统具有较强的环境自适应调节能力,测量精度更高,在典型温度条件下相度误差较小且稳定。

系统导致的误差主要来源于 DSP 芯片产生超声波与开始计时之间存在一定偏差,因为在程序设计中,两者之间存在先后顺序;还可能是硬件电路设计造成的干扰,因布线不合理造成有用信号的信噪比降低,从而使测量精度下降。在测试过程中,尽量使超声波传感器平面与障碍物平面平行,这样可以减少因系统放置问题造成的偶然误差。若采用对超声波吸收率高的障碍物材料,也会影响回波信号的能量和最终的测量精度。

表 1 室温下 (20℃) 设计滤波法和小波阈值变换算法实验结果
Tab.1 Experimental results of filtering method and wavelet threshold transform algorithm designed at room temperature (20℃)

序号	实际值/cm	设计滤波法			小波阈值变换算法		
		测量值/cm	绝对误差/cm	相对误差/%	测量值/cm	绝对误差/cm	相对误差/%
1	15.0	15.1	0.1	0.67	15.0	0	0
2	30.0	29.6	0.4	1.33	29.8	-0.2	0.67
3	45.0	45.9	0.9	2.00	45.4	0.4	0.89
4	60.0	61.3	1.3	2.17	59.4	-0.6	1.00
5	75.0	76.3	1.3	1.73	74.3	-0.7	0.93
6	90.0	91.8	1.8	2.00	90.9	0.9	1.00
7	105.0	107.2	2.2	2.10	106.2	1.2	1.14
8	120.0	122.6	2.6	2.17	121.3	1.3	1.08

表 2 典型温度中有无温补电路的实验结果
Tab.2 Experimental results of temperature compensation circuit in typical

序号	实际值/cm	10 ℃测量值/cm		20 ℃测量值/cm		30 ℃测量值/cm	
		无温补	有温补	无温补	有温补	无温补	有温补
1	15.0	15.1	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0
2	30.0	29.6	29.8	29.8	30.1	30.1	29.9
3	45.0	44.7	45.2	45.4	45.1	45.3	44.9
4	60.0	59.3	59.7	59.4	60.2	60.4	60.1
5	75.0	75.4	74.7	74.3	74.8	75.3	75.1

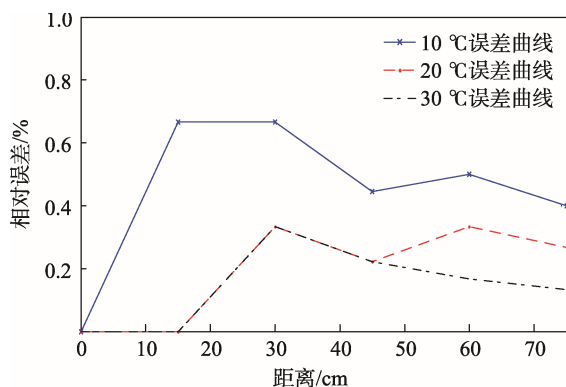


图 13 典型温度条件下测量距离与测量误差之间的关系
Fig.13 Diagram of the relationship between measurement distance and measurement error at typical temperature

5 结语

首先分析了利用 DSP 芯片进行超声波测距的优越性和实时性,设计研究了一种具有温度补偿和小波阈值滤噪的避障导航测距系统。通过小波阈值变换算法提高了回波信号的信噪比,使其信号始点的锐度得到提升;温度补偿提高了系统环境自适应调节能力。该系统具有结构简单、经济性高、环境温度自适应调节能力强和测量精度高等优点,此系统除了可应用到物流机器人避障导航外,还可以考虑应用于家庭服务型机器人等智能家居领域。

参考文献:

- [1] 张磊,董改花,贾利英,等.基于DSP的超声波测距模块标准化SCI接口设计[J].机械工程与自动化,2018(5):188—189.
ZHANG Lei, DONG Gai-hua, JIA Li-ying, et al. Standardized SCI Interface Design of Ultrasonic Ranging Module Based on DSP[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2018(5): 188—189.
- [2] 李修权,刘杰,黑创,等.基于STM32的超声波精确测距系统设计[J].长江大学学报(自然版),2018,15(17):29—32.
LI Xiu-quan, LIU Jie, HEI Chuang, et al. Design of An Accurate Ultrasonic Ranging System Based on STM32[J]. Journal of Yangtze University (Nature Edition), 2018, 15 (17): 29—32.
- [3] 崔靛,王冠龙,朱学军.超声波测距系统的设计与实现[J].传感器与微系统,2019,38(1):72—74.
CUI Liang, WANG Guan-long, ZHU Xue-jun. Design and Implementation of Ultrasonic Ranging System[J]. Sensors and Microsystems, 2019, 38(1): 72—74.
- [4] 潘康福,周西峰,郭前岗.多方位超声波倒车防撞系统设计[J].传感器与微系统,2019,38(1):117—118.
PAN Kang-fu, ZHOU Xi-feng, GUO Qian-gang. Design of Multi-directional Ultrasonic Backing Anti-collision System[J]. Sensors and Microsystems, 2019, 38(1): 117—118.
- [5] DONG Xiao-gang, YUE Yang, QIN Xi-wen, et al. Signal Denoising Based on Improved Wavelet Packet Thresholding Function[C]// 2010 International Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (ICMCE), 2010.
- [6] WANG Jian-fei. A Wavelet Denoising Method Based on the Improved Threshold Function[C]// 2014 International Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR), 2014.
- [7] MISRA A, KARTIKEYAN B, GARG S. Wavelet Based SAR Data Denoising and Analysis[C]// 2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC), 2014.
- [8] QIN Xi-wen, YUE Yang, DONG Xiao-gang, et al. An Improved Method of Image Denoising Based on Wavelet Transform[C]// 2010 International Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (ICMCE), 2010.
- [9] 邢强,虞凯西,谷玉之.基于测距超声波传感器的间距平衡避障策略[J].现代电子技术,2018,41(20):97—99.
XING Qiang, YU Kai-xi, GU Yu-zhi. Spacing Balance Obstacle Avoidance Strategy Based on Ranging Ultrasonic Sensor[J]. Modern Electronic Technology, 2018, 41(20): 97—99.
- [10] 郭志俊,薛婷.基于红外测距原理的防爆倒车报警装置的应用[J].煤矿机电,2018(6):60—63.
GUO Zhi-jun, XUE Ting. Application of Explosion-proof Peversing Alarm Device Based on Infrared

- Ranging Principle[J]. Coal Mine Electrical and Mechanical, 2018(6): 60—63.
- [11] 李杰. 基于单片机的超声波测距报警系统的设计[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(9): 7—8.
- LI Jie. Design of Ultrasonic Ranging Alarm System Based on Single Chip Computer[J]. Digital Technology and Application, 2018, 36(9): 7—8.
- [12] 曹鹏, 陈梦超, 胡玉钦, 等. 基于HC-SR04超声波传感器安全泊车测距模块设计[J]. 南方农机, 2018, 49(15): 17—18.
- CAO Peng, CHEN Meng-chao, HU Yu-qin, et al. Design of Safe Parking Distance Measurement Module Based on HC-SR04 Ultrasonic Sensor[J]. Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(15): 17—18.
- [13] 高甜甜, 刘文斌. 超声波倒车装置的设计与实现[J]. 农家参谋, 2018(15): 233.
- GAO Tian-tian, LIU Wen-bin. Design and Implementation of Ultrasonic Reversing Device[J]. Farmer's Staff, 2018(15): 233.
- [14] LIU Li-na, JIAN Ji-shun. Using Stationary Wavelet Transformation for Signal Denoising[C]// Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2011 Eighth International Conference on, 2011.
- [15] 李昕颖. 基于DSP MC56F8037超声波测距仪的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- LI Xin-ying. Research on the Ultrasonic Range Finder Based on DSP MC56F8037[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.
- [16] 申莎莎. 基于小波变换与傅里叶变换对比分析及其在信号去噪中的应用[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2018, 32(3): 27—32.
- SHEN Sha-sha. Based on the Comparative Analysis of Wavelet Transform and Fourier Transform and Its Application in Signal Denoising[J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 32(3): 27—32.