

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519518

基于混响抑制的超声测距盲区减小方法研究^{*}

刘朋涛¹ 郑恩让¹ 郭拓² 刘建国³

(1. 陕西科技大学电气与控制工程学院 西安 710021; 2. 陕西科技大学电子信息与人工智能学院 西安 710021;
3. 西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘要: 针对超声换能器在激励脉冲下产生拖尾,以及声波在罐壁多次反射、散射形成混响干扰,导致超声测距产生较大盲区的问题,提出使用具有抗混响能力的 LFM 波作为发射信号,并针对传统接收机直接采集实信号会产生镜像频谱,导致目标检测混淆以及运算量大的问题,提出在接收端采用正交解调技术,既可以得到抗干扰能力强的复信号,又能使系统的成本降低。本文通过分析超声波液位计的混响模型,仿真对比 CW 波和 LFM 波的模糊函数、Q 函数,得出 LFM 波具有更强的目标分辨能力,且其在目标静止时的抗混响能力更好。实验采用 LFM 波做为发射信号,在接收端通过正交解调得到复信号,然后对复信号匹配滤波。实验结果表明:该方法测量精度最大绝对误差小于 4 mm,盲区可减小到 8 cm,具有较高的实用价值和工程意义。

关键词: 超声波测距;盲区;脉冲压缩;正交解调;模糊函数;Q 函数

中图分类号: TN911.7;TB517 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on methods for reducing the blind zone in ultrasonic ranging based on reverberation suppression

Liu Pengtao¹ Zheng Enrang¹ Guo Tuo² Liu Jianguo³

(1. School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;
2. School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and Technology,
Xi'an 710021, China; 3. School of Marine Science and Technology,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To address the issues of trailing signals generated by ultrasonic transducers under excitation pulses and reverberation interference caused by multiple reflections and scattering of acoustic waves on the tank wall, which lead to a large blind zone in ultrasonic ranging, this paper proposes the use of Linear Frequency Modulated (LFM) waves with anti-reverberation capability as the transmit signal. Furthermore, aiming at the problems of image spectrum generation resulting in target detection ambiguity and high computational load when traditional receivers directly acquire real signals, quadrature demodulation technology is adopted at the receiver end. This approach not only obtains complex signals with strong anti-interference capability but also reduces system costs. By analyzing the reverberation model of the ultrasonic level meter and comparing the ambiguity function and Q-function of CW and LFM waves through simulation, this paper concludes that LFM waves possess superior target resolution capability and better anti-reverberation performance when the target is stationary. Experiments were conducted using LFM waves as the transmit signal. At the receiver end, complex signals were obtained via quadrature demodulation, followed by matched filtering. Experimental results demonstrate that the maximum absolute measurement error of this method is less than 4 mm, and the blind zone can be reduced to 8 cm, indicating high practical value and engineering significance.

Keywords: ultrasonic ranging; blind zone; pulse compression; quadrature demodulation; ambiguity function; Q function

0 引言

超声波技术因其无接触性、非破坏性、成本低廉等特点,被广泛应用于测量、成像、探伤等领域^[1]。超声波液位

计在工业生产中得到了广泛应用,特别是对环境复杂的罐体内液位的测量,比如一些易燃、易爆等大型油罐静态液面的精确测量。然而,超声波测量技术在实际应用中面临一个重要问题——盲区^[2]问题。一般情况下,行业内把从发

收稿日期:2025-08-03

* 基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JCYBMS561)项目资助

射脉冲结束,再到允许接收回波这段时间,超声波传播距离的一半被称为“盲区”。盲区的形成主要有两方面的原因:其一,对于收发一体的超声换能器,发射脉冲结束后,由于换能器非纯阻性的特点,在发射脉冲结束后,还会有一段时间的震荡衰减,称之为“拖尾”或“余振”^[3];因此,当测量目标距离较近时,“拖尾”的振幅很大,反射回来的回波会淹没在“拖尾”中,无法区分回波信号和拖尾信号,必须等到余振结束或者衰减到很小才能允许接收信号。其二,由于声波在容器管壁的多次反射以及罐内气体及气泡的存在引起的散射会产生混响^[4],导致真实液位回波被多个延迟的“伪回波”包围,难以区分真实的回波,只有等到混响衰减很小时才可以识别到真实的回波。

目前,已有多种方法被提出通过减小拖尾来减小超声波测量的盲区,王选择等^[5]从换能器的等效电路模型入手,建立了其振动输出与激励输入之间的传递函数,通过仿真分析反向激励周期数与拖尾抑制效果的关系,发现叠加特定周期的反向正弦信号可显著降低拖尾幅度。Yao 等^[6]在随钻测井卡径器方面,设计了一种结合自举门驱动器与金属-氧化物-半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)的全桥声发射电路、建立回波振幅-距离模型并应用时变增益补偿技术,实现了盲区缩小与远距检测能力的增强。Liu 等^[7]提出一种相位偏移驱动技术,通过提升有效发射时间占比,显著缩短了空气与水中的振铃时间,从而直接减小了测距盲区。然而,这些方法其发射信号都为单频矩形脉冲信号(continuous wave, CW),虽然在减小拖尾问题上有一定效果,但依然存在混响问题,测量时还会有较大的盲区。通过使用企业的外置式超声波液位计进行测量试验,发现盲区一般在 30 cm。

单频信号存在距离与分辨率不可兼得的根本矛盾,而线性调频信号(linear frequency modulated, LFM)具有大的时宽-带宽积,在接收端通过脉冲压缩^[8]技术可以很好的解决距离与分辨率的矛盾。目前 LFM 信号主要在雷达与声纳探测领域应用广泛,在速度未知的目标中用于对低速目标的检测,其并不太关注盲区问题。

同时,超声波液位计在接收部分通常的方案为放大、补偿、滤波、模拟信号到数字信号(analog-to-digital, AD)采集,然后通过互相关^[9]算法计算出液位高度。在噪声较大的工业检测场景中,这种方案采集到的信号信噪比较低,并且需要较高的采样率,对主控芯片的性能要求较高。况且直接采到的实信号会产生镜像频谱,会对目标检测有较大混淆,导致严重影响测量精度。

针对上述问题,本文通过分析超声波液位计的时频域混响模型,选择具有混响抑制能力的 LFM 来作为发射信号以及在接收机中采取时变增益(time-varied gain, TVG)电压补偿来减小盲区,通过正交解调以提高信号的信噪比、减小运算量,得以在低成本系统中应用。最终实验结果表

明该方法对混响有抑制作用,并且测量精度相对误差小于 1.2%,盲区可以减小到 8 cm,此方法具有一定的实用性和研究价值。

1 超声液位计时频域混响模型与仿真

在超声波液位计系统中,混响是由于声波在容器罐壁的多次反射,以及其在液面波动产生的散射等在超声换能器接收点的叠加。具体表现为紧跟发射信号,听起来是一段缓慢衰减的“颤音”。

混响与发射信号存在强相关性,和一般的白噪声相比,混响具有以下显著特征:1)混响的频谱特征与发射信号基本一致,因此无法在频域上区分;2)混响强度随时间呈指数型衰减,表现出显著的非平稳特性;3)混响的功率谱密度呈现明显的频率选择特性,与白噪声的平坦频谱分布有明显区别,其能量集中分布在发射信号的主频带范围内,属于色噪声^[10]。

混响强度的量化可通过散射强度^[11]参量表征,定义为:在距离散射体 1 m 处,由单位面积(或单位体积)散射体产生的散射声强与入射平面波声强的比值,并以分贝(单位为 dB)为计量单位,数学表达式为:

$$S_s = 10 \lg \left(\frac{I_{sc}}{I_{inc}} \right) \quad (1)$$

式中: S_s 为散射强度, I_{inc} 表示入射平面波声强度, I_{sc} 表示单位散射面积散射声强度。

1.1 超声液位计时频域混响模型

在实际混响研究中,受实验环境复杂性和设备性能限制,获取高质量混响实测数据存在显著困难且成本较高。因此,对混响进行较为真实有效的模拟对混响研究很重要,下面是在一定条件下对混响模型的仿真。

从物理机制来看,混响本质上是大量散射体对入射声波的二次辐射叠加效应^[12]。由于散射体在空间中呈非均匀分布,散射波到达换能器的距离不同。另外,发射信号距离散射体距离也不同,所以在任意观测时刻,仅部分满足时延匹配条件的散射体对瞬时混响场产生有效贡献。其数学模型可以表示为:

$$V(t) = \sum_{k=1}^n s(t_k) v(t - t_k) \quad (2)$$

式中: $s(t_k)$ 表示 t 时刻第 k 个散射体的随机振幅, $v(t - t_k)$ 表示单个散射信号的形状, n 表示 t 时刻散射体的个数。

通过前面的分析,混响的形成本质上是一个受多因素耦合影响的复杂随机过程。为建立可解析处理的混响理论模型,本文在保证核心物理机制准确性的前提下,对模型进行了合理的简化假设:1)声传播模型简化。采用直线传播假设,传播损失仅考虑球面扩展衰减和体积吸收效应,忽略多径传播等复杂声学现象。该假设适用于短距离、高声频的混响建模场景。2)散射体分布假设。假定在任意观测时

刻,有效散射区域内的散射体满足空间分布均匀性、数量充分性、散射独立性。3) 散射阶数限制。仅考虑一阶散射过程,忽略高阶散射贡献。因此,混响可以简化为3个过程:换能器发射信号经过介质传播至散射体,散射体产生散射波,散射波经过介质后被换能器接收。液位计的混响模型示意图如图1所示,路径选取了3条路径即,声源-液面-换能器,声源-散射体-换能器,声源-罐壁-液面-换能器。

混响产生过程为散射函数^[13] $P(t)$ 与发射函数 $x(t)$ 的卷积,因此 t 时刻的混响为:

$$R(t) = P(t) \otimes x(t) \quad (3)$$

式中: \otimes 表示卷积。散射函数描述了不同时刻散射体的贡献,假设某一时刻罐中的散射体个数为 N ,散射函数可表示为:

$$P(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot e^{-\alpha r_i} \cdot s(t - \tau_i) \cdot e^{j2\pi\Delta f_i(t - \tau_i)} \quad (4)$$

式中: σ_i 表示第 i 个散射体的散射截面, α 为液体中的声衰减系数, r_i 为换能器到第 i 个散射体的距离, $s(t)$ 为换能器的发射信号, τ_i 为传播延迟时间。根据傅里叶变换可得混响的频域表达式为:

$$R(f) = X(f) \cdot P(f) \quad (5)$$

其中, $X(f)$ 为发射函数 $x(t)$ 的频谱, $P(f)$ 为散射函数的频谱。假设在近场区域(液面高度 <30 cm),混响模型可以使用壁面多径反射模型和传感器余振模型的叠加,在远场区域(液面高度 >30 cm),混响模型使用壁面多径反射模型、传感器余振模型和体散射模型的叠加。

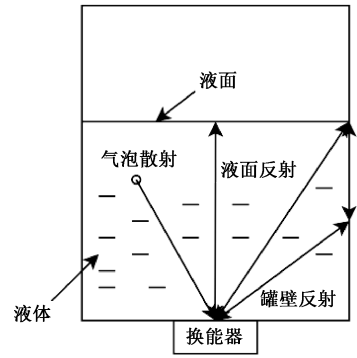


图1 混响模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the reverberation model

1.2 CW波和LFM波时频域混响仿真分析

根据上文的混响模型分析进行仿真可以得到液位计的混响信号。设罐内液位高度为5 m,罐底直径为2 m,超声波在水中的传播速度为1 500 m/s,CW波的脉宽为1 ms,频率为180 kHz,LFM波的中心频率为180 kHz,带宽为20 kHz,图2(a)、(c)为CW波和LFM波的时域混响仿真结果,由图可得,混响幅值都是先增大到最大值然后逐渐衰减,但LFM波的混响衰减会更大,当目标距离较近时都会被淹没到混响中难以区分。图2(b)、(d)为LFM波时域和频域混响仿真结果,可以发现混响信号频谱出现一些毛刺,表明其发生了频率畸变,导致信号频率分量的失真和变化。

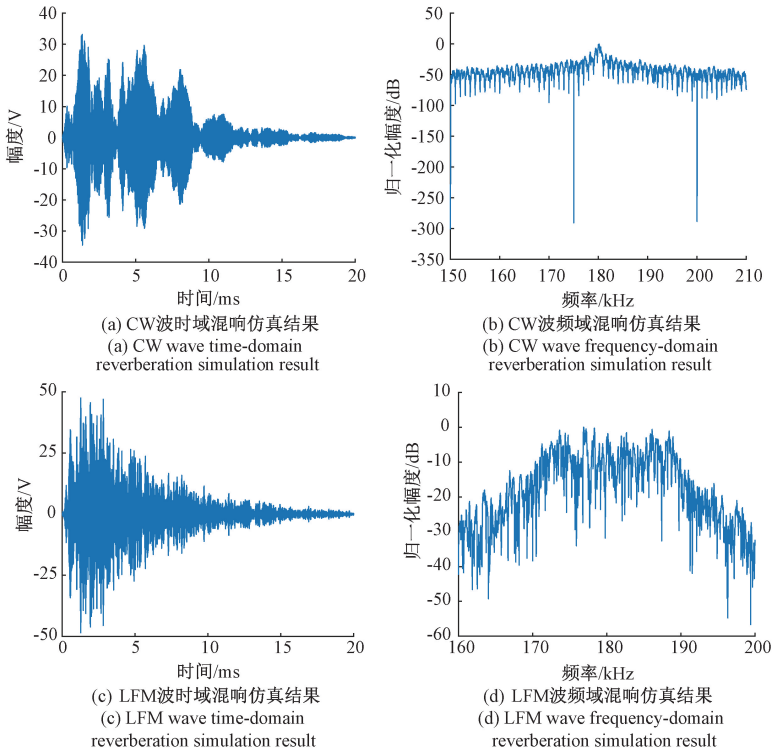


图2 CW波与LFM波混响仿真结果

Fig.2 Simulation results of CW versus LFM wave reverberation

1.3 基于 Q 函数的 CW 波和 LFM 波抗混响能力对比

信号的模糊函数是带有时延差和多普勒频移的目标回波信号经过匹配滤波^[14]处理后的输出,能够良好的表征信号的距离分辨力与速度分辨力。

对于窄带信号而言,其模糊函数表达式为:

$$|\chi(\tau, \xi)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x^*(t + \tau)e^{-j2\pi\xi t} dt \right| \quad (6)$$

式中: τ 为时延, ξ 为多普勒频移, $x(t)$ 为发射信号。

当信号的带宽较大时,窄带信号的模糊函数不再适用,应使用宽带信号的模糊函数定义:

$$|\chi(\tau, \eta)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x^*(\eta(t - \tau))dt \right| \quad (7)$$

式中: η 为多普勒因子,可表示为:

$$\eta = \frac{1 + v/c}{1 - v/c} \quad (8)$$

式中: v 为目标相对运动速度, c 为水中声速。

模糊函数关于原点对称,且在原点处取得最大值,最大值为发射信号的能量。模糊函数越大就越容易区分不同目标的回波,且主瓣越尖锐信号在时域及频域上的分辨力就越高。

混响是回波检测过程中的主要干扰之一,而 Q 函数^[15]表征了不同多普勒条件下匹配滤波器输出的混响强度,用来衡量不同发射波形的抗混响能力。

$$Q(\xi) = \int |\chi(\tau, \xi)|^2 d\tau \quad (9)$$

其中,积分项为模糊函数的平方,即 Q 函数为模糊函数在时延轴上的积分。且通常情况下, Q 函数值越小,抗混响能力越强,目标检测效果越好; Q 函数值越大,抗混响能力越弱,越不利于回波信号的检测。

最常用的发射信号为单频脉冲,常称为 CW 波,其时域表达式为:

$$x(t) = w(t)\exp(j2\pi f_c t) \quad (10)$$

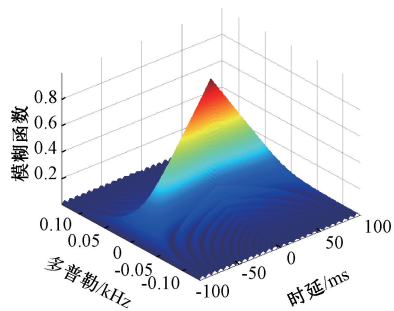
式中: f_c 为信号的中心频率, $w(t)$ 为窗函数,一个长度 T 且功率归一化的矩形窗可表示为:

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T}}, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

图 3(a)为 CW 波的模糊函数图,从图中可以看到模糊函数主瓣延时延方向下降缓慢,延移频方向下降迅速,说明 CW 波有较大的时延模糊,目标距离分辨能力差,但有利于目标速度的测量。

通常将信号模糊函数最大值降低到 0.707 倍(-3 dB)处的截面称为信号的模糊度图。时延测量精度为模糊度图与时延轴两个交点间时延差的一半。图 3(b)、(c)分别为 CW 波模糊函数对应的零多普勒切面与零时延切面,从图中可知,CW 信号时延测量精度为 29 ms,频移测量精度为 4.4 Hz。

图 4(a)为 LFM 波的模糊函数图,从图中可以看出



(a) 模糊函数
(a) Ambiguity function

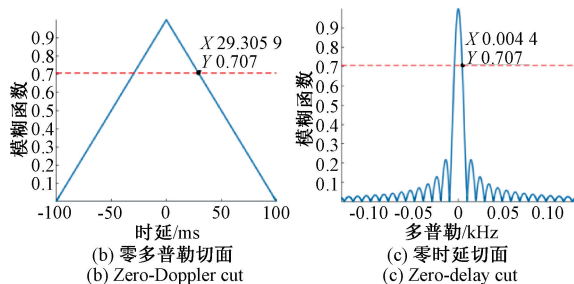
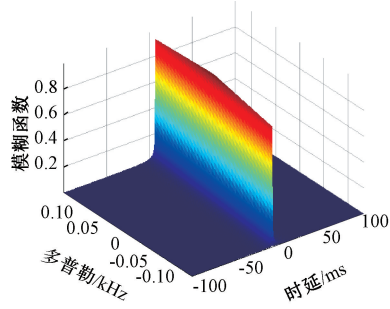


图 3 CW 信号模糊函数图与零多普勒切面、零时延切面图

Fig. 3 Ambiguity function diagram of the CW signal with zero-Doppler and zero-delay cuts

LFM 波的模糊函数呈刀刃状^[16],主瓣沿时延方向下降迅速,目标距离分辨能力强。图 4(b)、(c)分别为模糊函数对应的零多普勒切面与零时延切面,从图中可知, LFM 信号时延测量精度为 0.22 ms,频移测量精度为 4.5 Hz。相对而言, LFM 波更适合静止目标的检测。



(a) 模糊函数
(a) Ambiguity function

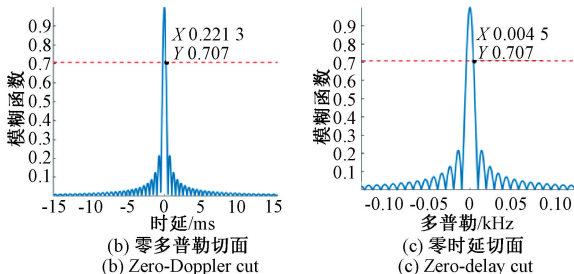


图 4 LFM 信号模糊函数图与零多普勒切面、零时延切面图

Fig. 4 Ambiguity function diagram of the LFM signal with zero-Doppler and zero-delay cuts

为了更直观地比较信号的抗混响性能,将不同信号在

不同速度下的 Q 函数输出进行对比, CW 波与 LFM 波输出的 Q 函数如图 5 所示, LFM 波的 Q 函数几乎不随目标速度变化而变化, 而 CW 波的 Q 函数随目标运动速度影响较大。并且在目标速度为 0 m/s 时, CW 信号的 Q 函数值远大于 LFM 波, 表明静止时 CW 信号受混响干扰很大, 不利于目标的检测; 随着目标速度的增加, CW 波的 Q 函数值不断减小, 当目标速度超过 3.5 m/s 时, CW 信号的抗混响性能已经优于调频信号; 且随着目标速度的继续增大, CW 信号的优势越发明显。

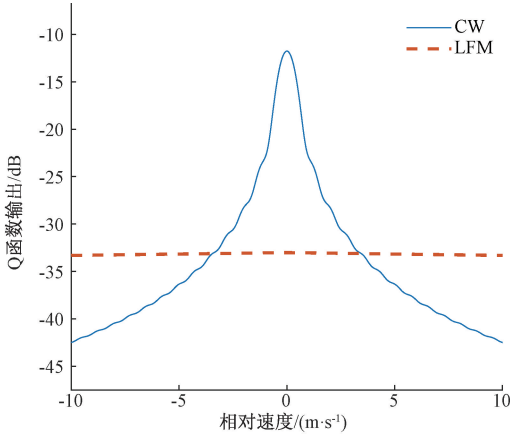


图 5 CW 波与 LFM 波 Q 函数输出对比

Fig. 5 Comparison of Q-function output for CW and LFM waves

通过分析 CW 波和 LFM 波的模糊函数和 Q 函数, 得出在目标静止时, LFM 波的目标分辨率更好且抗混响能

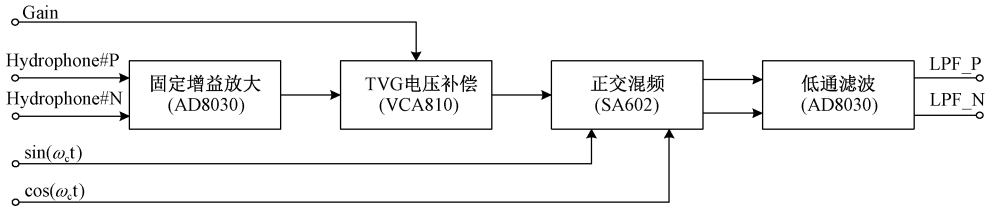


图 6 接收机结构图

Fig. 6 Block diagram of the receiver

正交解调主要包含两个步骤:

1) 实信号进行正交混频得到信号实部 $s_{real}(t)$ 和信号虚部 $s_{imag}(t)$, 设接收到的信号为:

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi) + n(t) \quad (13)$$

式中: ϕ 为相位差, $n(t)$ 为噪声。正交混频过程如式(14)、(15)所示。

$$s_{real}(t) = s(t) \cos(\omega_c t) =$$

$$\frac{A}{2} \{ \cos[(\omega_0 + \omega_c)t + \phi] + \cos[(\omega_0 - \omega_c)t + \phi] \} \quad (14)$$

$$s_{imag}(t) = s(t) \sin(\omega_c t) =$$

$$\frac{A}{2} \{ \sin[(\omega_0 + \omega_c)t + \phi] - \sin[(\omega_0 - \omega_c)t + \phi] \} \quad (15)$$

其中, ω_c 为解调频率。

2) 低通滤波, 通过低通滤波把混频得到得高频滤除,

力更强, 因此选择 LFM 波作为本系统的发射信号。

2 基于正交解调的超声液位测量接收电路设计

接收机的硬件结构框图如图 6 所示, 主要由固定增益放大、TVG 电压补偿、正交混频、低通滤波组成。因为超声波在水中传播时存在较大的衰减, 且传播距离越远衰减越大, 即回波的幅值随时间的推移逐渐减小。因此需要采用具有增益补偿功能的回波接收放大电路, 可以使近距离回波增益小, 远距离回波增益大, 这样一方面可以减少超声波发射脉冲结束后余震宽度, 从而减小盲区测量距离; 另一方面又可以增大测量量程和提高测量精度。本系统选用的 VCA810 芯片的增益控制电压调整范围为 0 ~ -2 V, 对应的增益为 -40 ~ 40 dB, 其控制电压与增益关系为:

$$G_{(v/v)} = 10^{-2(v_c+1)} \quad (12)$$

针对传统超声波液位计在接收端采集到的实信号具有镜像频谱, 可能会引起目标检测混淆, 并且实信号中对于信号振幅、相位、频率等特征信息表达不清晰的问题。本系统在接收端采用硬件混频后, 通过正交解调得到复信号, 复信号不仅具有较强的抗干扰能力, 还可以降低采样率, 提高运算速度。而且复信号对后续信号处理提供了便捷, 比如可以使用自适应滤波、小波变换等更好的抑制混响, 提高信噪比。正交解调^[17]本质是通过频谱搬移将中心频率的信号搬移到低频, 再经过低通滤波滤除高频分量, 得到低频正交分量。

留下低频分量。本系统使用四阶 Butterworth 低通滤波器^[18]如图 7 所示, 其具有平坦的通带和陡峭的阻带, 截至频率为 30 kHz。本系统选取 ADI 公司的运算放大器 AD8030, AD8030 是一款高速运算放大器, 它拥有 125 MHz 的带宽, 1 mA 的静态电流, 压摆率 60 V/ μ s。还具有低功耗, 低噪声, 低失真的特性。

正交解调后的信号通过电压抬升电路抬升到 0 ~ 3.3 V 范围内, 然后通过 AD 采集解调后的信号, 最后与参考信号进行匹配滤波得到目标回波的位置即液面高度。

3 实验与结果分析

前文通过 MATLAB 仿真了 CW 波和 LFM 波的模糊函数和 Q 函数, 得出 LFM 波的目标分辨能力好并且抗混

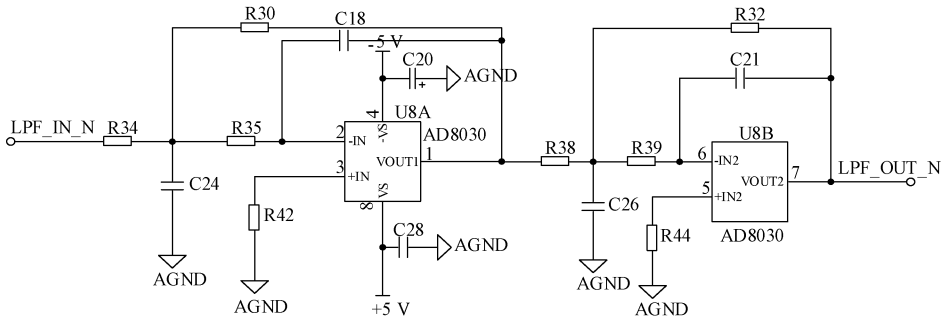


图 7 低通滤波电路图

Fig. 7 Circuit diagram of the low-pass filter

响能力强。下面通过实验验证 CW 波和 LFM 波的结果，本文使用 STM32L431 为主控来产生激励信号、补偿曲线、混频信号和算法实现等，STM32L431 是基于高性能 ARM Cortex-M4 32 位 RISC 内核的超低功耗微控制器，工作频率高达 80 MHz，具有高性能和低功耗的特点。Cortex-M4 内核具有单周期乘法和硬件除法指令，支持 DSP 指令集，适用于处理复杂的算法和任务。同时 STM32L431 专为低功耗应用而设计，具有多种省电模式，包括运行、睡眠、停止和备份模式。这些模式可根据应用的需求进行灵活配置，从而实现最佳的能源效率。

3.1 超声液位计系统组成

本系统由发射机模块、接收机模块、控制系统以及上位机组成，其中发射机模块实现了电源与功率放大电路之间的隔离，防止了大功率信号对接收模块和主控的损害，同时使用 MOSFET 驱动电路对驱动信号进行调理来驱动功率放大器，功率放大器采用 D 类功放^[19]实现能量的高效转换，最后与发射换能器进行阻抗匹配实现能量高效转换。接收机模块首先通过对换能器接收到的回波进行一级固定增益放大，然后通过 STM32 设置 TVG 电压补偿曲线对信号再次进行补偿，使不同距离的回波得到合适的放大，之后通过正交混频和低通滤波降采样，提高运算速度，最后通过 STM32 对信号进行采集和运算处理得到回波的位置，与上位机进行通信和显示。液位计系统实物图如图 8 所示，由电源主控板、超声波发射和接收端回波处理模拟板以及显示屏三部分组成。

由于本系统存在各个任务之间的并行或交替运行，所以使用了 FreeRTOS 操作系统^[20]。FreeRTOS 是一个完全免费的多任务实时操作系统，具有源码公开、可移植、可裁剪、调度策略灵活等特点，并且方便移植到 STM32L4 处理器中。FreeRTOS 实时操作系统，其功能包括任务管理、时间管理、消息队列、信号量、中断管理、软件定时器、协同例程管理等。它对系统资源要求较低，最小配置仅需 1 KB 的 Flash 及 0.5 KB 的 RAM 资源任务是系统资源的最小运行单元，任何时候只有一个任务得到运行，FreeRTOS 调度器决定运行哪个任务。系统中任务采用抢占式调度机制，高优先级的任务可打断低优先级任务，低优先级任务

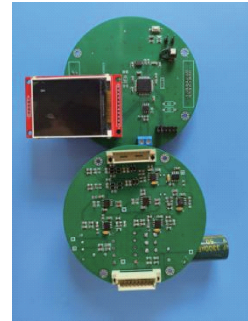


图 8 液位计系统硬件实物图

Fig. 8 Photograph of the hardware setup for the liquid level meter system

必须在高优先级任务阻塞或结束后才能够得到调度。

超声波液位计系统软件结构框图如图 9 所示，其软件架构采用层次架构，由硬件驱动层、FreeRTOS 操作系统层和应用程序层组成。硬件驱动层在软件结构的最底层，对 I/O、PWM、A/D 采集、串口、嵌套中断控制器等硬件资源进行驱动，为上层软件提供接口调用。操作系统向应用程序提供内存管理、任务调度、任务通信与同步、文件系统功能。应用程序层位于最上层，采用模块化设计分为：激励信号产生、混频信号产生、A/D 采集、增益补偿、结果显示、匹配滤波模块。

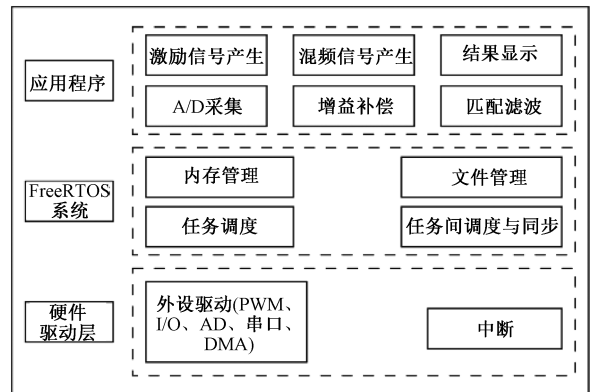


图 9 系统软件结构图

Fig. 9 Software architecture of the system

3.2 实验结果分析

实验场景搭建如图 10 所示,超声换能器紧贴罐底安装,由主控分别产生脉宽 400 μs ,中心频率 180 kHz 的 CW 波和带宽 20 kHz 的 LFM 波。混频信号为频率为 160 kHz,相位差 90° 的 PWM 波。ADC 采样点数为 1 024,采样率为 100 kHz,满足奈奎斯特采样定理。图 11~14 的(a)、(b)分别为不同液位下 CW 波和 LFM 波匹配滤波的结果,从图中可得,CW 波经过匹配滤波后,由于混响半径太大无法找出开始几个回波位置,直到超过混响半径才可以比较清晰的得到回波位置,而 LFM 波匹配滤波后混响半径相比 CW 波减小了许多,并且可以准确得出两个有效回波的位置。图 14(a)、(b)可发现 8 cm 时 CW 波匹配滤波的结果已经完全不能得到两个有效回波的结果,而 LFM 波匹配滤波后在液位为 8 cm 时也可以比较准确得出两个有效回波的位置,由此可以得出 LFM 波经过匹配滤波后对混响的抑制效果非常有效,与仿真相符。



图 10 实验场景图

Fig. 10 Experimental setup

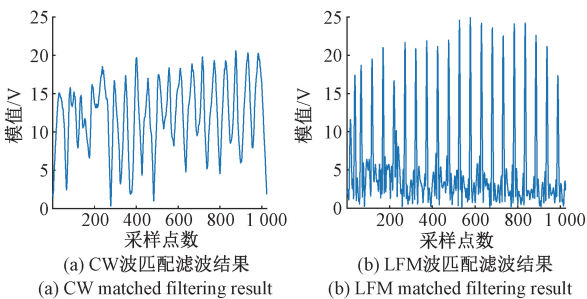


图 11 液位为 39.4 cm 的匹配滤波结果

Fig. 11 Matched filtering output at a liquid level of 39.4 cm

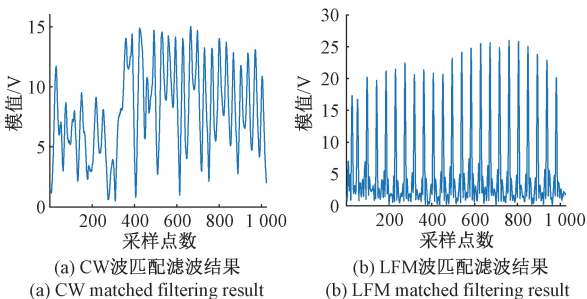


图 12 液位为 31.4 cm 的匹配滤波结果

Fig. 12 Matched filtering output at a liquid level of 31.4 cm

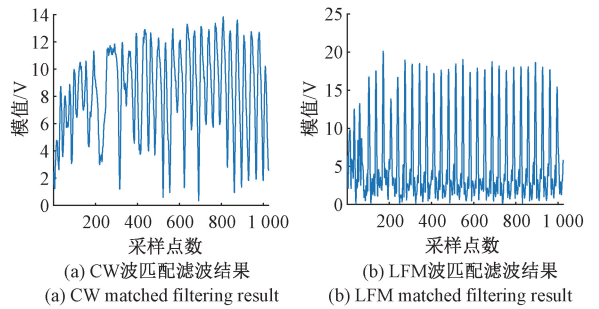


图 13 液位为 25.5 cm 的匹配滤波结果

Fig. 13 Matched filtering output at a liquid level of 25.5 cm

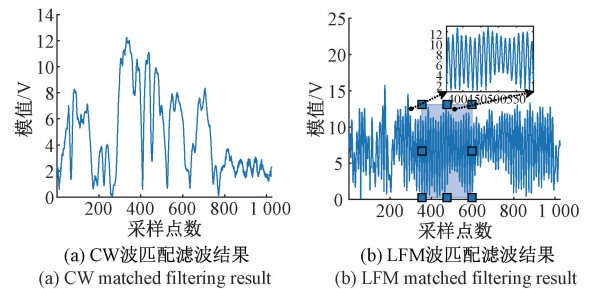


图 14 液位为 8 cm 的匹配滤波结果

Fig. 14 Matched filtering output at a liquid level of 8 cm

下面对超声波液位计系统的精度和盲区进行测量,首先对同一液位进行 5 次测量验证其一致性,表 1 为 5 次测量的值,从结果可以得出本系统的稳定性很好。

表 1 连续 5 次测同一液位的值

Table 1 Results of five consecutive measurements at a fixed liquid level

实际液位/ mm	测量值/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
453	455	2	0.4
453	455	2	0.4
453	455	2	0.4
453	455	2	0.4
453	455	2	0.4

接下来测试该液位计的性能,在实验室条件下,测量已知容器中液体液位的高度,连续测量 10 组不同液位高度的数据,每组数据测量 5 次取平均值,结果如表 2 所示。

由表 2 的 10 组实验数据可知,实际液位值与测量液位值相差不超过 4 mm,系统测量精度高,稳定性好,同时盲区可以减小到 8 cm,增加了检测范围。

表 2 已知液位与测量液位的对比结果

Table 2 Comparison between known and measured liquid levels

实际液位/ mm	测量值/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
612	608	-4	0.6
555	556	1	0.1
507	504	-3	0.5
455	453	-2	0.4
405	401	-4	0.9
353	350	-3	0.8
255	252	-3	1.1
185	186	1	0.5
155	156	1	0.6
80	81	1	1.2

4 结 论

本文以超声波液位测量为背景,针对传统液位计盲区较大的问题,从抗混响方面提出了解决方案。通过分析液位计的混响模型以及对不同发射信号的混响进行仿真,对 CW 波和 LFM 波的模糊函数和 Q 函数进行仿真对比,得出 LFM 波的目标分辨力和抗混响能力更强。然后阐述了本系统接收机中正交解调的设计和软件系统。经实验证明:本系统通过使用 LFM 波做为发射信号,并通过 TVG 电压补偿、正交解调和匹配滤波等处理,系统具有良好的一致性和稳定性,绝对误差不超过 4 mm。同时盲区从传统液位计的 30 cm 减小到 8 cm,在工程上有很大意义。

参考文献

- [1] 袁梅,汪鹏程,张学军. 超声波测距的双相位检测方[J]. 电子测量技术,2021,44(17):112-117.
YUAN M, WANG P CH, ZHANG X J. A dual-phase detection method for ultrasonic distance measurement [J]. Electronic Measurement Technology,2021,44(17): 112-117.
- [2] 陈洪圳,王莉,徐昊,等. 基于信号分离的扩展频谱时域反射法盲区消除研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(9): 280-289.
CHEN H ZH, WANG L, XU H, et al. Research on blind spot elimination of spread spectrum time domain reflectometry based on signal separation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45 (9): 280-289.
- [3] 程珩,李瑾,靳宝全. 基于无源自振抑制的小盲区超声测距方法[J]. 振动. 测试与诊断,2015,35(2): 369-374,404.
CHENG H, LI J, JIN B Q. A small blind zone ultrasonic ranging method based on passive self-

oscillation suppression [J]. Vibration, Measurement & Diagnosis,2015,35(2):369-374,404.

- [4] 孙疆疆. 基于统计分析的混响抑制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.
SUN J J. Research on reverberation suppression method based on statistical analysis [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2022.
- [5] 王选择,张天,马丹,等. 一种抑制超声换能器拖尾信号的方法[J]. 仪表技术与传感器,2020(5):48-52,57.
WANG X Z, ZHANG T, MA D, et al. A method for suppressing the trailing signal of ultrasonic transducer[J]. Instrument Technique and Sensor,2020(5):48-52,57.
- [6] YAO Y CH, JU X D, LU J Q, et al. Acoustic emission and echo signal compensation techniques applied to an ultrasonic logging-while-drilling caliper [J]. Sensors, 2017,17(6):1351.
- [7] LIU X X, CHEN X Y, LE X H, et al. Reducing ring-down time of pMUTs with phase shift of driving waveform[J]. Sensors and Actuators, A, Physical, 2018,281:100-107.
- [8] 许溢航,王平,杨元,等. 脉冲压缩在超声导波钢轨断裂检测的应用研究[J]. 电子测量技术,2025,48(3): 112-117.
XU Y H, WANG P, YANG Y, et al. Application of pulse compression in rail break detection using ultrasonic guided waves[J]. Electronic Measurement Technology,2025,48(3):112-117.
- [9] 郭森,李芳,赵纪元. 高速气体超声波流量计飞行时间估计算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2025,39(8): 269-277.
GUO M, LI F, ZHAO J Y. Investigation of time of fly estimation algorithm for gas ultrasonic flowmeter under high speed [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39 (8): 269-277.
- [10] 唐浩,王方勇. 浅海主动声纳混响干涉结构特性及增强方法[J]. 声学及电子工程. 2020(2):1-5.
TANG H, WANG F Y. Characteristics and enhancement methods of reverberation interference structure for shallow water active sonar[J]. Acoustics and Electronic Engineering,2020(2):1-5.
- [11] 程昱,王方勇. 基于时频空三维滤波的深海界面混响抑制方法[J]. 声学及电子工程,2022,4:1-4.
CHENG K, WANG F Y. A method for suppressing deep-sea interface reverberation based on time-frequency-space three-dimensional filtering [J]. Acoustics and Electronic Engineering,2022,4:1-4.
- [12] 杨思. 基于多普勒特性的动目标检测方法研究[D]. 哈

- 尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- YANG S. Research on moving target detection method based on Doppler characteristics[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2018.
- [13] 何鑫彪,刘明刚,许彦伟,等.非均匀混响统计建模与功率估计[J].声学学报,2021,46(6):913-925.
- HE X B, LIU M G, XU Y W, et al. Statistical modeling and power estimation of non-uniform reverberation[J]. Acta Acustica,2021,46(6):913-925.
- [14] 高入云.主动声纳抗混响波形设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2023.
- GAO R Y. Research on anti-reverberation waveform design for active sonar [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2023.
- [15] 关承宇.连续主动声纳抗干扰信号设计中的关键问题研究[D].长沙:国防科技大学,2020.
- GUAN CH Y. Research on key issues in anti-interference signal design for continuous active sonar[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2020.
- [16] 周胜增,杜选民.利用正弦调频信号的宽带速度敏感特性抑制混响[J].声学学报,2022,47(1):16-26.
- ZHOU SH Z, DU X M. Reverberation suppression utilizing the broadband velocity-sensitive property of sinusoidal frequency modulated signals [J]. Acta Acustica,2022,47(1):16-26.
- [17] 韩瑞涛,郭拓,李斌,等.前视声纳中多波束形成算法的FPGA实现[J].现代电子技术,2023,46(16):15-21.
- HAN R T, GUO T, LI B, et al. FPGA implementation of multi-beam forming algorithm in forward-looking sonar [J]. Modern Electronics Technique,2023,46(16):15-21.
- [18] 庞轶环,胡志忠.一种分数阶巴特沃斯滤波器的有源电路设计[J].电子学报,2018,46(5):1160-1165.
- PANG Y H, HU ZH ZH. Active circuit design of a fractional-order Butterworth filter [J]. Acta Electronica Sinica,2018,46(5):1160-1165.
- [19] 赵宣.D类多桥臂宽带声纳发射机设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.
- ZHAO X. Design and implementation of a Class-D multi-bridge broadband sonar transmitter [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2024.
- [20] 刘肖,王宜怀,汪恒,等.基于STM32L431RC微控制器实时操作系统驻留方法[J].计算机应用与软件,2023,40(10):274-278,296.
- LIU X, WANG Y H, WANG H, et al. A method for real-time operating system residency based on STM32L431RC micro controller[J]. Computer Applications and Software,2023,40(10):274-278,296.

作者简介

刘朋涛,硕士,主要研究方向为数字信号处理。

E-mail:1172360989@qq.com

郑恩让,博士,教授,主要研究方向为自动化过程控制和智能信息处理。

E-mail:zhenger@sust.edu.cn

郭拓(通信作者),博士,讲师,主要研究方向为阵列信号处理。

E-mail:guotuonwpu@126.com

刘建国,博士,副教授,主要研究方向为水下信号与信息处理。

E-mail:liujianguo@nwpu.edu.cn