

主动声探测信号的捕获与回波重构电路设计

张海涛, 罗 建, 聂宜召, 刘亚萍, 赵亚磊
(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘 要 针对主动声探测脉冲偶发、短时、超声、单频、大动态的特点, 传统的微弱信号采集电路已不能满足对其探测捕获的需求。提出了一种多级放大多路同步采集的电路系统, 对预处理的信号进行多级放大。由 DSP 同时对多级输出信号进行采集与识别, 将采集的某路合适信号进行分析并重构回波。该方法有效地提高了系统的实时性, 满足实际情况下对主动探测脉冲的捕获与分析重构。

关键词 主动声探测脉冲; 信号采集; 电路系统设计; 回波重构
中图分类号 TN975 **文献标识码** A

Design of Capture and Echo Reconstruction Circuit for Active Acoustic Detection Signal

ZHANG Haitao, LUO Jian, NIE Yizhao, LIU Yaping, ZHAO Yalei
(Navigation College of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract For the sporadic, short-term, ultrasonic, single-frequency and large dynamic features of active acoustic detection pulse, the traditional weak signal acquisition circuit can not meet the needs of its detection and capture. This paper proposes a multi-stage amplifying and multi-channel synchronous acquisition circuit system, which implements multi-stage amplification on the pre-processed signal. The multi-level output signal is collected and recognized by the DSP at the same time, and a collected channel of appropriate signal is analyzed and reconstructed. This method effectively improves the real-time performance of the system and satisfies the capture and analysis reconstruction of the active detection pulse in practical situation.

Key words active acoustic detection pulse; signal acquisition; circuit system design; echo reconstruction

0 引言

无论是从水下新型制导武器的研制或是从水声对抗的角度来说, 主动声探测信号回波模拟技术都具有重要意义^[1]。但快速捕获短暂的大动态范围主动探测脉冲并进行回波重构, 要求系统具有较高的实时性。以往研究的自动增益控制 (AGC) 电路的方向主要集中于大带宽、大动态范围, 对灵敏度的研究较少, 一般 AGC 电路的建立时间为 0.4 s, 对于高实时性的应用延迟较大。为了提高系统的实

时性, 本文采用多级固定增益放大、多路同步采集的方法可以接近实时地采集微弱信号, 较自动增益控制放大电路提高了系统的实时性。同时, 由于搭建电路的运放采用一般的运算放大器, 与 AGC 电路对比, 本文的方案降低了经济成本。

1 系统工作环境

主动声探测系统依靠目标的反射信号来探测目标, 其工作原理如图 1 所示。本文所设计的系统探测对象就是这种短暂的主动探测脉冲。

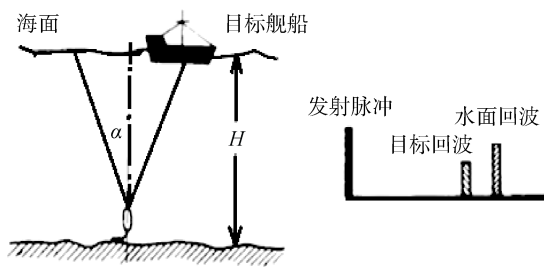


图 1 主动声探测系统工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of active sound detection system

主动探测系统在工作时,按一定的周期 T ,发射一固定脉冲宽度 τ 的超声信号(频率为 f)。当没有目标时,系统只接收到水面的反射回波;当有目标通过时,就会接收到目标的反射回波信号。这一回波信号一般是在水面回波到达之前到达,即引起测距值变短^[2]。在实际应用中, τ 一般为 3~5 ms, f 为 20~80 kHz, T 为 400~600 ms。对此短脉冲信号进行对抗,需要实时存储接收到的波形信号,并且立即做出判断与处理,这对系统的实时性提出很高的要求。

信号通过压电陶瓷换能器获取,通过声电换算,接收到的电压信号大约 100 μ V 左右。采集 100 μ V 的微弱信号需要考虑如何提高系统的信噪比。

对海洋环境噪声的谱级研究从第二次世界大战开始就已进行,并取得了大量实测数据和理论成果,其中 Wenz 所总结的谱级曲线具有代表性^[3]。其谱级大体上可以分成相互覆盖的 3 段: 1) 低频段(1~100 Hz),每倍频程-10~-8 dB 衰减; 2) 中频段(100~500 Hz),这一段谱较为平缓,主要来源于远处的行船。这一段谱级的强弱与航运的频繁程度有关; 3) 高频段(500~25 000 Hz),每倍频程按 5~6 dB 衰减,主要来源于风动海面。在短脉冲信号采集系统的工作频段内,海洋环境噪声在高频部分(大于 20 kHz)对系统影响较小,于是要求短脉冲信号采集系统的滤波器在低频部分具有良好的性能^[4]。

2 系统原理

如图 2 所示,一个完整的主动探测脉冲回波模拟系统主要由信号预处理、信号放大、信号采集与

存储、重构回波发射等部分组成。微弱信号首先通过信号预处理电路提高信号的信噪比,由放大电路将信号放大至 AD 可采集的范围,由信号采集与存储电路对信号进行采集并存储,通过 DSP 对采集波形进行波形分析与重构,并将重构回波发射出去。

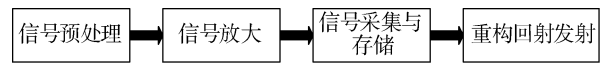


图 2 系统总体框图

Fig. 2 Overall block diagram of system

信号预处理的目的是提高信号的信噪比。对采集的原始信号进行放大时,虽然同时将噪声放大,但在滤波器输入端,信号已经是一个较大的值,信号通过滤波器后会滤除放大后的带外噪声,可以有效地减小系统的等效输入噪声。此外,由于换能器的输出阻抗很大,为了可以接收更多的信号,需要前级放大器具有较大的输入阻抗,于是前级放大器采用同相放大电路结构。为了改善前级放大器的整体性能,在同相放大器的后级接 1 个反向放大器,不仅可以弥补同相放大器抗干扰能力差的性质,而且可以灵活地改变前级放大倍数^[5]。

主动声探测脉冲信号频带为 20~80 kHz,由于信号本身是未知的,所以频带适当的展宽并不会影响系统性能。由于海洋环境噪声集中于低频段,所以滤波器的下边带阻带衰减需要大一些。此外,由于信号在传播过程中发生频带展宽,单频信号会变成窄带信号,为了采集的信号不失真,需要降低带内纹波,因此系统采取巴特沃斯滤波器进行信号滤波^[6]。信号预处理电路的总体框图如图 3 所示。

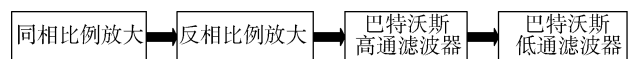


图 3 信号预处理方案

Fig. 3 Signal preprocessing scheme

针对实时性的需求,本文提出多级固定增益放大多级输出的信号采集方式,如图 4 所示,信号进入多级放大电路,每一级都输出一定放大倍数的信号,通过 4 级放大达到 10 000 倍的总放大倍数,可以将 0.1 mV 的信号放大至 1 V。对于不同幅度

的输入信号，通过多级放大的冗余采集，其中必有 1 路未被限幅并且达到满足 AD 可采集的范围，将该路采集的信号进行分析即可。将同相放大器与反相放大器交替级联，既可提高系统抗干扰能力，又可改善信号的偏置现象。

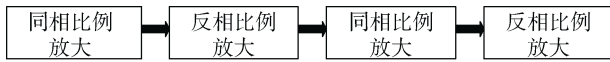


图 4 放大电路方案
Fig. 4 Amplifying circuit scheme

如图 5 所示，信号采集与触发的主要目的是将经过信号调理后的信号进行 AD 采集并以数字形式存储。对于只能采集单边信号的单极性 ADC，在本系统中需要电位提升等辅助电路将其搬移到正半周，在本文中采用加法器。为了使 DSP 明确何时处理数据以及处理哪路数据，系统需要通过包络检波对各路信号进行检波，当某一路 ADC 检测到具有一定宽度与幅度的脉冲信号后，即可判断主动声探测脉冲信号是否来临以及哪一路的信号适合处理。

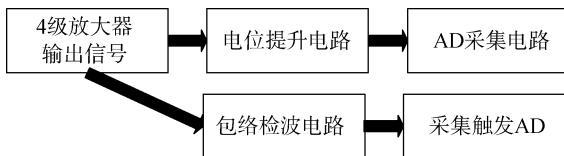


图 5 信号采集与触发方案
Fig. 5 Signal acquisition and trigger scheme

DSP 信号采集电路工作原理如图 6 所示，通过 4 路 AD 同时采集，采集结束后将信号发送至 DSP。选用具有菊花链的 AD 采集芯片可以将各个 AD 进行级联，用单一的数据链路传输数据。整个信号采集电路利用 I2S 的时钟信号作为采样 AD 的启动转换脉冲，同时触发 4 路 AD 进行转换，转换结束时，将级联的 4 路 AD 的转换数据通过 SPI 串口读取并存储，DSP 提取出合适通道的采集数据进行分析。

依据系统原理，采集主动探测脉冲的时间与所选器件的响应时间成正相关，采集电路基本可以达到信号的无延迟采集。因此，系统的实时性主要取决于 DSP 的数据处理能力。而在算法层面，回波重构采用波形存储重发技术，耗时较少，基于以上

设计方案，系统可以达到较高的实时性。而且，由于系统采用冗余设计，增加了廉价器件的使用，总体具有较高的经济优势。

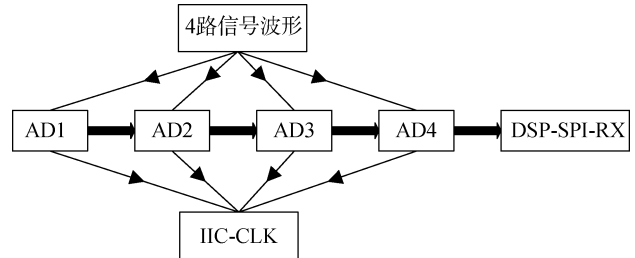


图 6 信号采集方案
Fig. 6 Signal acquisition scheme

3 硬件设计

硬件系统由 STM32F103 单片机作为控制芯片，由 TMS320C5535 作为信号处理器，由低噪放 NE5532 作为放大器，由 AD8058 作为有源滤波器的运放，由 AD5512 作为波形输出的 DA 转换器，由 ADS8860 作为信号采集的 AD 转换器。

信号预处理电路包括低噪前放与滤波器，低噪前放采用 NE5532，它的增益带宽积为 10 MHz，输入噪声为 $4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，适合作为系统的前级运放^[7]。有源滤波器运放选型为 AD8058，其输入噪声为 $4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，压摆率为 $1\,000 \text{ V}/\mu\text{s}$ ，并且具有低失真的特性。低噪前放采用同相放大器，提高系统的输入阻抗。滤波器采用 2 级滤波器级联的方式，第 1 级为高通滤波器，第 2 级为低通滤波器，因为噪声主要集中在低频段，这样可以有效降低输入噪声。

信号放大电路采用 4 级级联的方式，4 级放大器同相反相交替级联，采用电容进行级间耦合，避免级间直流偏置，降低系统设计难度。信号采集辅助电路包括检波电路与信号提升电路，检波电路采用二极管包络检波，信号提升电路采用同相加法器。

STM32F103 通过 AD 采集包络检波后的信号，判断脉冲信号是否到来，通过串行端口发送触发信号到 DSP，触发相应通道进行波形分析与重构。DSP 解算并重构回波后，通过 DA 转换器将重构后

的信号波形发射出去,由AD5512构成的DA转换器具有双极型输出的功能,通过加接运放,可以驱动 $60\text{ k}\Omega$ 的负载^[8]。

4 测试验证

对安装调试完成的电路进行了各模块的功能测试。表1给出了分级测试的结果,总放大倍数为:10 229.118,可以将 0.1 mV 的信号放大至 1 V ,满足系统设计的要求。

表1 放大器输出信号
Table 1 Output signal of amplifier

级数	前级	第1级	第2级	第3级	第4级
输入信号/V	1.16	1.12	0.651	0.621	0.623
输出信号/V	6.3	2.08	6.44	6.16	6.44
放大倍数	5.431	1.857	9.892	9.919	10.337

采用点频法测试了滤波器的幅频响应特性曲线,如图7所示。由幅频响应曲线可知,滤波器的响应在带内逐渐增加且分段恒定,故取两者的中间值作为滤波器的带内响应幅值,取 2.17 V 。所以滤波器的 -3 dB 点为 19 kHz 与 92 kHz ,高通的阻带衰减为 18.4 dB ,低通的阻带衰减为 20.4 dB ,带内纹波为 2.3 dB ,满足滤除带外噪声的要求。

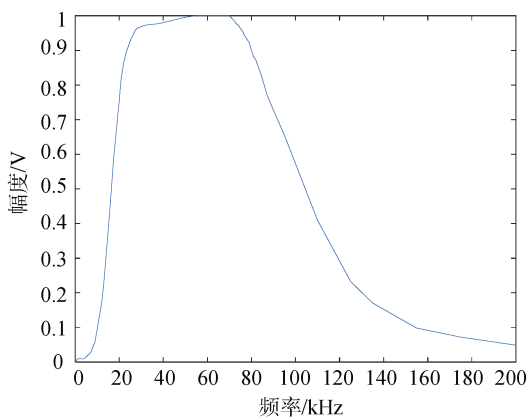


图7 滤波器幅频响应特性曲线

Fig. 7 Amplitude-frequency response characteristic curve of filter

单片机利用ADC采集包络检波后的幅值,来判断是否符合采集的条件。为了测试单片机,采用可变电位器将 2.5 V 的直流电压进行分压逐级调整。对于 2.5 V 的电压,设置3个阈值:小于 0.5 V 、大于 0.5 V 而小于 2.0 V 、大于 2.0 V 而小于 2.5 V 。通过测试,数据发送时间约为 0.1 ms ,基本满足实时性的要求。

5 结束语

论文讨论了主动脉冲信号的捕获与回波重构电路模块的设计,分析了系统硬件结构设计方法以及芯片选型与应用,完成了信号捕获与回波重构系统的硬件设计。采用STM32控制系统的信号采集与数据交互。完成了电路设计、硬件调试以及功能测试,测试结果表明此方案可以应用于主动脉冲信号的捕获与回波重构,具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 金彦丰,谢植广. 国外水面舰水声对抗技术及其发展趋势[J]. 船电技术, 2017, 37(4): 71-73.
- [2] 李同钰,王晓林. 水雷主动声引信抗邻雷干扰研究[J]. 现代引信, 1994(4): 37-41.
- [3] 汪德昭,尚尔昌. 水声学[M]. 北京:科学出版社, 1981.
- [4] 郭业才,赵俊渭. 海洋环境噪声预报建模与算法研究[J]. 舰船科学技术, 2004, 26(4): 26-30.
- [5] 汪仁里. 运算放大器设计实例[J]. 电子制作, 2009(2): 63-64.
- [6] LIM J S. Design of low-pass filters using defected ground structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory&, 2005, 53(8): 2539-2545.
- [7] Texas Instruments Incorporated. NE5532x, SA5532x Dual Low-Noise Operational Amplifiers[Z]. Texas: Texas Instruments Incorporated, 2015.
- [8] Analog Device, Inc. AD5512A/AD5542A[Z]. Norwood: Analog Device, Inc., 2017.

(责任编辑:曹晓霖)