

基于通用数据采集卡的水声应答器设计*

徐克航[†] 王磊 冯师军 孙长瑜 李启虎

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 水声应答器(Acoustic Transponder/Responder)是一类常用的水声设备,主要功能是完成水下设备的定位和导航,广泛应用在水声系统测试、目标模拟以及水声科学试验中。本文以NI公司的PCI-6052采集卡和工控机构成信号处理模块,设计出了一种可灵活配置的水声应答系统(ESRAE, Extensible Sound Responder for Acoustic Experiments),通过环境噪声电平的跟踪估计和脉冲判决技术实现了复杂海洋条件下脉冲检测、回发功能,并在海洋水声信道测量试验中得到了成功的应用。

关键词 水声应答器, 目标模拟, 数据采集卡, 脉冲检测

A design of acoustic transponder/responder based on the general data acquisition device

XU Ke-Hang WANG Lei FENG Shi-Jun SUN Chang-Yu LI Qi-Hu

(Institute of Acoustic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Acoustic transponder/responder is a commonly used underwater acoustic device, mainly for underwater positioning and navigation. It has been widely adopted in underwater acoustic testing, target simulation and other underwater acoustic experiments. This paper constructs a signal processing unit based on the general data acquisition device PCI-6052 of National Instruments Corp., and develops a flexible design method for acoustic transponder/responder system with improve ambient noise estimation and pulse detection technology. The responder realizes signal detection and pulse reply functions under noise background, and has been applied successfully in undersea acoustic survey experiments.

Key words Acoustic transponder/responder, Target simulation, Data acquisition device, Pulse detection

2007-05-31 收稿; 2008-01-02 定稿

* 国家自然科学基金资助项目(60532040)

作者简介:徐克航(1981-),男,安徽广德人,中科院声学所博士生,研究方向:数据传输与信号处理。

王磊(1973-),男,博士,副研究员。冯师军(1977-),男,博士,助理研究员。

孙长瑜(1954-),男,研究员,博士生导师。

李启虎(1939-),男,研究员,中国科学院院士,博士生导师。

[†] 通信联系人 E-mail: xu_kehang@163.com

1 引言

水声应答器 (Acoustic Transponder/ Responder) 是一类常用的水声设备,其基本功能为在接收到有效水声脉冲信号时按设定方式回发应答脉冲,通常用于水下动态/静态目标的定位或导航,在海洋环境监测、资源勘探开发、水下定位和测量等领域得到了广泛的应用。目前市场上有多种应答器产品。商业化应答器产品成熟可靠,然而它们作为专用水声系统,其特点为内置发射换能器,但发射频带固定且不具备低频段发射能力;工作方式可编程,不能满足水声试验和水声测试的要求,如声学反转镜试验中需要脉冲倒置发射方式,主动目标模拟中需要对目标强度和速度变化进行模拟等等。实际的水声试验要求一套功能和应用频带可根据需要灵活配置的应答系统。本文为了完成水声试验需求,采用通用数据采集卡和工控机为信号处理核心构成了一套试验水声应答系统 ESRAE (Extensible Sound Responder for Acoustic Experiments),不仅可以根据任务要求完成水声测距和目标回波模拟功

能,还可以方便地进行功能扩展。

本系统选用 NI 公司的 PCI-6052E 型通用数据采集卡实现电信号的采集接收与回发,该数据采集卡具有 8 通道差分模拟信号输入,每通道 16Bit 分辨率,总体采样率可以达到 333KSamples/s,模拟通道还包括两路 16Bit 的 D/A 输出,能够与 A/D 输入并行工作。与此同时,系统还提供 8 路数字通道,可以方便对外设进行控制,例如提供给发射机的门控信号。通过 NI-DAQ 设备驱动程序库容易实现设备底层操作和控制,从而构建了一套可灵活配置的水声应答系统,满足了水声试验多样性应用的要求,同时提高了系统的集成度和稳定性。

2 本文设计 ESRAE 应答器的基本结构

ESRAE 水声应答器的基本功能是在海洋噪声背景条件接收并判决脉冲信号,在识别到正确的脉冲信号后自动发出相应的应答信号作为响应,其系统结构框图如图 1 所示。

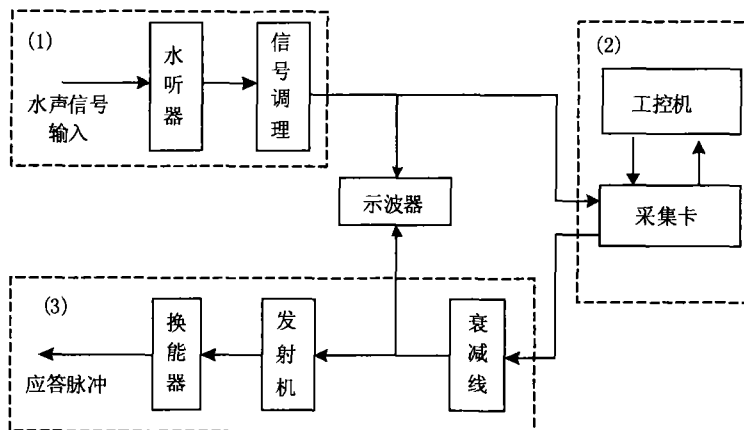


图 1 ESRAE 应答器系统框图

如图 1 所示,ESRAE 水声应答系统由三部分构成:(1) 前端接收及预处理模块,由水听器和高通滤波器组成;(2) 信号处理模块,由工控机和 PCI6052 数采卡组成;(3) 脉冲回

发模块,由衰减线、发射机和回发换能器构成。接入的示波器可以同时监视接收信号和回发脉冲,可以直观地判断应答器工作状态。

前端接收及预处理模块接收水下声信号,

放大并经高通滤波后送入数据采集卡。高通滤波的截止频率为 100Hz,可以有效滤除海洋和测量系统的低频干扰,增加信号频段的动态范围。信号处理模块完成应答系统的核心功能,首先由量程调整模块对前级输入信号进行增益调整,A/D 转换后进行脉冲检测,检测到有效脉冲后将脉冲波形经适当调整后(这里包括脉冲峰值归一化、输出幅度调整和回发延时调整三个步骤)转换为模拟信号输出。脉冲回发模块主要将信号处理模块输出的回发脉冲信号经衰减线调整到发射机要求的输入范围($\pm 1V_{rms}$)经功率放大后发射,完成脉冲回发功能。

3 信号处理模块的设计及实现

应答器系统中的核心是图 1 中的(2)即信号处理模块,需要完成脉冲的检测和实时回发功能。在设计中需要认真考虑两个方面问题:(1)算法的可靠性,ESRAE 应答系统要求在实际海洋环境下能够可靠应用,而应答距离的变化和多径效应使得接收脉冲幅度起伏、波

形畸变;另一方面,附近经过/作业的渔船使得噪声背景产生较大的起伏,这对应答系统的脉冲检测过程带来一定的难度。(2)细致的软件设计,基于 Windows 的工控机系统对于实时处理任务而言是不利的,在一个数据拍的时间间隔内可以进行的运算也是严格限制的,这需要优化的算法设计和谨慎的软件安排。例如在数据连续采集过程中如果同时进行数据磁盘存储,其进程往往会超出一个数据拍的时间从而导致数据溢出错误。

3.1 信号处理模块的系统构成

参见图 2,信号处理模块主要包括前放及量程选择、数字滤波、阈值估计、脉冲判决、脉冲波形记录、输出功率/时延选择和脉冲调整共七个模块,完成海洋噪声背景下主动脉冲信号的检测、估计、识别以及回发过程,同时存储有效脉冲波形以便于事后分析。其中,输入信号在 $\pm 50mV$ 至 $\pm 10V$ 的量程范围内可以根据脉冲峰值自动调节,数字滤波采用 8 阶巴特沃思带通滤波(频带需要预先设定),下面仅对关键的阈值估计和脉冲判决过程进行详细论述。

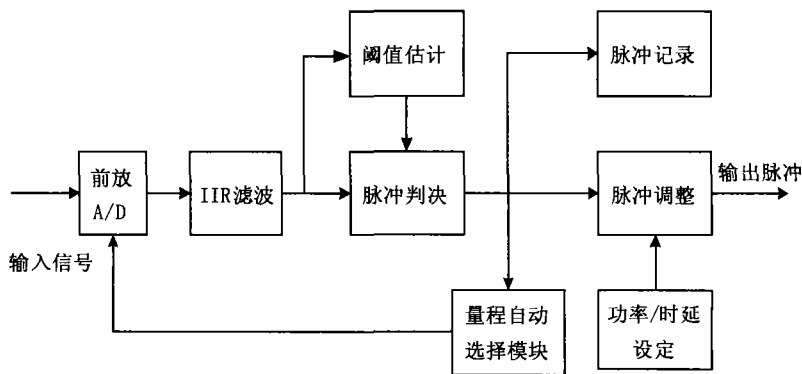


图 2 信号处理模块算法框图

3.1.1 脉冲阈值估计

海洋环境下对脉冲的检测是一个基本的假设检验问题:

$$\begin{aligned} H_1: & y(t) = s(t) + p(t) + e(t); \\ H_0: & y(t) = p(t) + e(t); \end{aligned} \quad (1)$$

在脉冲信号到达时,接收信号包括有效脉冲 $s(t)$ 、环境噪声 $e(t)$ 及脉冲干扰 $p(t)$, 否则,接收信号只有噪声及干扰。对于回波模拟的任务要求,主动脉冲的波形是未知的,因此脉冲检测采用基于能量的方法,即给定阈值

E_a , 在脉冲到达时间, 接收信号包络 $\bar{y}(t) > E_a, t \in [T_s, T_e]$, 其中 T_s, T_e 分别为脉冲起始和终止时间估计。

这里的阈值 E_a 是一与环境噪声相关的量。显然, 海洋环境的多变性使得环境噪声电平起伏较大 (特别是附近有行船经过时), 为了有效实现脉冲检测, 脉冲判决所需的阈值也应该能够根据实际情况的变化而进行调整。阈值估计的主要功能就是根据噪声电平的变化设置相应的判决门限, 保证在变化噪声环境下仍然能有效地检测到脉冲序列。

考虑到应答器接收信号中主动脉冲信号只占小部分时间, 而大部分时间是海洋噪声, 这样可以通过对历史能量信息排序, 并截取中间部分加以平均, 以此估计噪声电平 E_n 。

为了获得尽可能大的检测概率同时尽量减小虚警概率, 判决门限的选取需要综合考虑, 实际系统中根据应用需求和经验值选择阈值 W 为高于背景噪声电平 2 ~ 8dB:

$$E_a = E_n + W, W \in [2\text{dB}, 8\text{dB}]; \quad (2)$$

使用上述算法实现的阈值估计模块运算量较小, 可以很好地满足系统实时性的要求, 同时得到的判决门限也可以根据噪声能量的变化做出相应调整, 适应了复杂海洋环境的要求。

3.1.2 脉冲判决方法

根据 3.1.1 节方法实现的脉冲检测器在实际应用中存在一些问题: 首先, 系统不能有效抑制干扰脉冲 $p(t)$, 这些脉冲主要来源于试验平台的瞬时干扰以及水下系统的碰撞声; 第二, 到达脉冲由于多途作用幅度起伏较大, 脉宽有明显扩展, 而回波模拟需要对扩展后的脉冲进行回发。为了解决这两个问题, 在脉冲检测中以信号分段平均值作为检测量并增加了有效脉冲判决环节。因此在应答器实现中, 实际上是以数据拍平均能量 (平方检波) 作为检测统计量, 数据拍的长度设为 20ms, 脉冲存

在的判决公式变为:

$$y(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(m+n) \geq E_a; \quad (3)$$

其中 m 为数据拍序号, N 为数据拍样点数。对于瞬时干扰, 根据实际测量, 其脉宽通常小于 100ms, 因此通过脉宽检测可以忽略绝大多数干扰脉冲。对于第二个问题, 则需要更改脉冲结束判断规则, 脉冲结束的判决公式为:

$$y(m) \leq E_a; \quad (4)$$

$$\text{且 } y(m+1) \leq \gamma E_a; \quad (5)$$

其中 γ 为一范围 [0.2, 1] 的常数, 调整该常数可以控制对脉冲多途扩展的保留程度。在浅海条件下, 回波扩展一般在 200ms 以内, 对连续两个数据拍能量分别满足式 (4) 与式 (5) 时可以判为脉冲结束, 在实际应用中, 这一判决可以有效保留信号的主多途扩展分量, 同时避免了因信号起伏而误判脉冲结束的情况。

3.2 信号处理子系统算法实现

信号处理子系统在 Windows 环境下采用 Visual C++ 6.0 开发, 通过 NI 公司提供的 NI-DAQ 设备驱动程序库实现数据采集硬件的底层控制, 其软件流程如图 3 所示。首先在初始化数据采集卡时设定系统采样频率, 并采用双缓冲技术进行 A/D 转换, 以便在对一帧数据采集的同时实现上一帧数据的实时处理。采集到的各帧数据通过检测子模块进行脉冲判决, 并将检测到的有效脉冲信号暂存在缓冲区中, 待当前有效脉冲序列结束后再进行数据保存, 然后通过 PCI-6052E 数据采集卡的输出通道进行 D/A 转换和脉冲回发。同时, 为了防止瞬时出现能量较强的脉冲序列超出系统检测范围, 系统软件中还加入了量程监控模块, 该模块依据当前脉冲能量大小, 在必要时调整系统参数设置, 以此保证当前最大能量幅度限制在满量程的 1/3 左右。

由于 Windows 操作系统的非实时性, 无法

真正实现系统的实时采样判决,这里我们根据 PCI-6052E 通用数据采集卡自身的特点,将每帧脉冲数据的时间宽度设置为 20ms 左右,结合 A/D 转换中所采用的双缓冲区机制,最大限度地实现了信号的实时处理与连续采集。

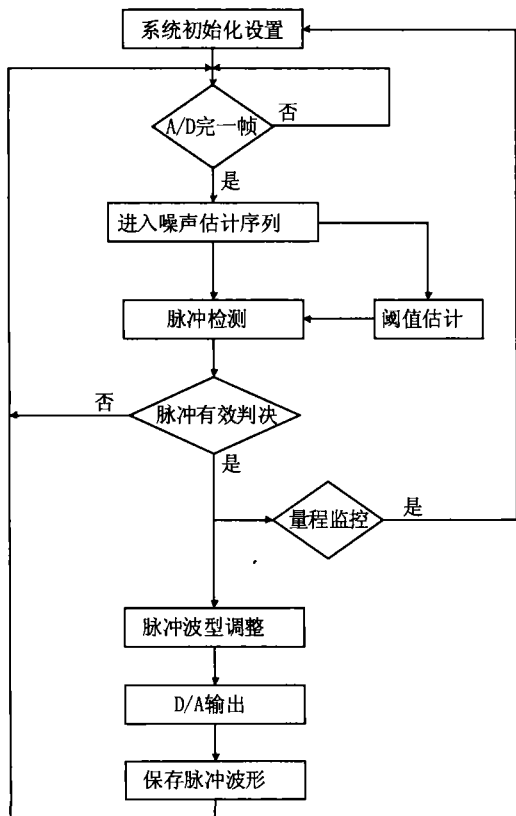


图 3 信号处理子系统软件流程图

4 试验结果

ESRAE 水声应答系统于 2004 年 5 月开始研制,10 月参加海上试验,在人工干预的条件下初步完成水声应答试验;2005 年 6 月,ESRAE 系统在第二次海试中作为目标模拟器,实现了无人干预条件下的回波模拟功能;2006 年 12 月海试的时间反转试验中,ESRAE 系统完成了脉冲的时间反转回发功能。ESRAE 水声应答器系统经试验测试验证,其基本性能指标如表 1 所示:

表 1 ESRAE 水声应答器系统基本性能

序号	基本指标	参数
1	接收声信号范围	54dB ~ 210dB@ 1uPa
2	前级放大	1 ~ 2000 倍,分 7 档
3	工作频带	500 ~ 1.5kHz
4	回发脉冲源级	150 ~ 185dB(可调)
5	回发延时	35ms ~ 20s(可调)

图 4 给出了 2005 年 6 月某次海试试验中所接收的应答器应答数据处理图,该次试验中,应答器方位为 55°(以阵首方向为起始点),距离约为 9.2km,回发源级约 176dB,应答延时为 35ms 左右。图中展示了连续的九段接收数据,从中可以清楚地分辨出每帧应答信号。

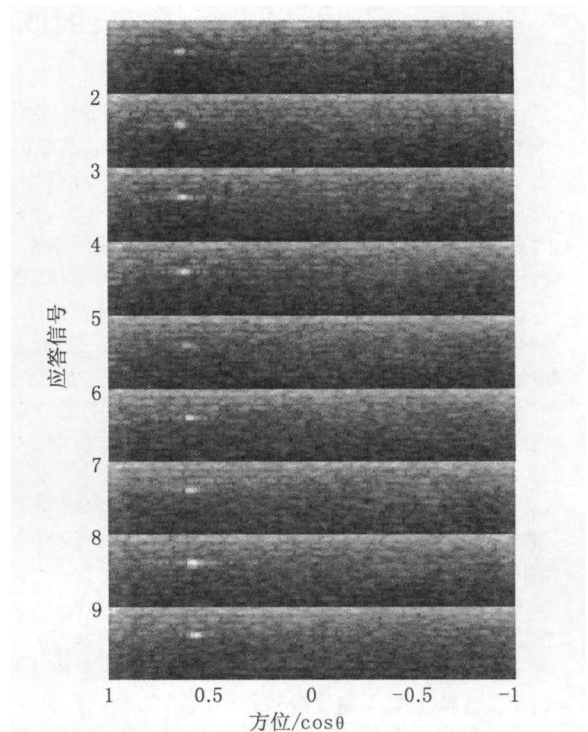


图 4 2005 年海试结果图

5 结论

在用于海洋实际测量的水声应答器工程系统中,通过选用通用型数据采集卡并配合使用其自带的硬件驱动程序库,缩短了系统的开发周期,提高了系统的集成度和稳定性,但在系统的

实现中由于工控机所使用的非实时操作系统的影响,信号处理的实时性停留在数十毫秒量级,通过选用实时性较强的其他操作系统,如 Vx-Works 等可以进一步增强系统中信号处理的实时性。该系统目前已在实际海试中获得应用,下一步工作将在引入远程通讯控制模块后,构成无人值守并具备多种工作模式的浮标应答系统。

参 考 文 献

- [1] A D Whalen. Detection of Signal in Noise. Academic Press, New York and London, 1971.
[2] Smith W, W M Marquet, and M M Hunt. Navigation Tran-

- sponder Survey: Design and Analysis. IEEE Ocean' 75, 1975; 563 - 567.
[3] Porter M B. Acoustic Models and Sonar Systems. IEEE J. of Oceanic Engr., 1993, 18: 425 - 437.
[4] Hussain M G M. Principles of High-Resolution Radar Based on Nonsinusoidal Waver—Part I: Signal Representation and Pulse Compression. IEEE Trans. On Electromagn. Compat., 1989, 31(4): 359 - 368.
[5] 李启虎. 数字式声纳设计原理. 合肥:安徽教育出版社, 2003.
[6] 程佩青. 数字信号处理教程. 北京:清华大学出版社, 2003.
[7] National Instruments Corporation. Traditional NI-DAQ User Manual. National Instruments Corporation, 2003.
[8] 沈凤麟, 叶中付, 钱玉美. 信号统计分析与管理. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2003.

2008' 促进中西部发展声学学术交流

由陕西、湖北及四川省声学学会联合发起,四川声学学会承办的“2008' 促进中西部发展声学学术交流”,于2008年8月25日—30日在西藏拉萨市举行。来自北京、湖北、陕西、浙江、江苏、重庆、四川等地国内高等院校、科研院所及相关单位的声学科技专家、教授等共54名代表出席了会议。四川省声学学会副理事长胡杨吉教授,陕西省声学学会秘书长李刚虎教授,湖北省声学学会秘书长程建政博士出席了会议,陕西省声学学会挂靠单位,西北工业大学航海学院党委书记王育才先生,四川声学学会挂靠单位中国测试技术研究院声学所所长曾压光先生也光临会议,并分别讲话,对会议的召开表示诚挚的祝贺。

开幕式由四川省声学学会秘书长张知易研究员主持。在开幕式上,胡杨吉教授代表三个学会的领导致词,对本次学术交流会的召开表示热烈祝贺,并预祝大会取得成功。

本次会议的召开,得到了中科院声学所、四川大学华西医院、东南大学、西北工业大学、第三军医大、武汉长江科学院等高等院校科研院所等单位广大声学科技工作者、专家、教授的热烈响应和积极支持,共收到学术论文87篇。大会报告9篇,其余论文由代表在会下相互交流。

论文涉及的专业领域大致划分为以下五个专题:

- | | |
|---------------|-----|
| 1. 水声与物理声学 | 11篇 |
| 2. 超声电子学与功率超声 | 20篇 |
| 3. 检测与环境声学 | 13篇 |
| 4. 医学超声 | 32篇 |
| 5. 语音、通信、信号处理 | 11篇 |

论文由全国中文科技论文核心期刊“声学技术”

杂志,08年第4期出版发行。

由卓忠雄、张知易、赵力、李刚虎、程建政教授组成的专家组,倾向于中青年科技工作者评选出了优秀论文7篇。

闭幕式由张知易秘书长主持。在闭幕式上,向全体与会者宣读了会议纪要草稿,与会者通过认真讨论修改后一致通过了会议纪要。接着向7位优秀论文作者,颁发了证书,并给予了奖励。

本次旨在促进中西部地区声学学术交流的会议,充分体现出到会专家教授严谨、求实的治学态度,积极、认真进行学术的气氛。交流的学术论文来自全国各地,在一定程度上反映了我国声学科技在以上五个专业的研究水平。到会的专家,都是活跃在声学科技领域的骨干力量。可以看出,他们提交的学术论文所阐述的理论和揭示的成果,具有较大程度的学术价值及应用的前景。整体看来,这是我国声学界水平、质量和效率都较高的一次学术交流会,对促进中西部地区,及全国声学科技的发展,有着重要的意义和不可轻视的影响。

这次四川省声学学会、陕西省声学学会、湖北省声学学会联合举办声学学术交流议,有力地促进和加强了我国中西部地区和发达地区,以及全国声学科技工作者之间的交流与沟通,会议达到了预期目的,取得了圆满成功。

会议对《声学技术》杂志社,以正式刊号出版会议论文集,表示诚挚的感谢。

最后,发起和承办本次会议的单位,对参加本次会议的全体代表的积极配合与支持,以及希望举办好下次会议提出宝贵的建议,表示诚挚的敬意和感谢!

(陕西、湖北及四川省声学学会)