

基于 MSP430 的水声时间反转应答系统设计

张志博^{1,2}, 孙长瑜¹, 李启虎¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 体积庞大、结构复杂的水声仪器设备往往在使用和维护等方面给使用者带来不便, 因此对于水声设备的小型化要求已经必不可少。水声时间反转应答系统是水声时间反转镜研究的主体设备。论文结合水声信道匹配研究的实验要求, 以 MSP430F169 微控制器作为核心部件, 设计了一种适用于水声时间反转镜研究的小型化、低功耗应答系统。文中给出了详细的硬件及软件设计方案, 以及该系统的应用原理。该设计体积小、结构简练, 在保证性能的前提下, 极大地提高了系统的易用性和灵活性。

关键词: MSP430; 时间反转镜; 应答系统; 水声信道

中图分类号: P733.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-2029 (2007) 03-0031-05

水声信道匹配基础研究是建立在水声学、海洋物理声学以及现代信号处理技术基础上的新兴研究领域。水声信道的时空变化复杂性和不确定性是提高新型声纳系统性能的最大障碍, 通过对水声环境的实时获取和估计, 及时调整信号和接收处理方式以达到与信道相匹配的工作性能。其中, 水声时间反转镜研究是该课题的一项必不可少的内容。

时间反转应答系统是水声时间反转镜研究中的主体实验设备, 它负责水下信号的接收、时间反转及回发。与船载应答系统相比, 浮标式应答系统具有体积小、自身干扰少、布放方便、操作灵活等诸多优势。由于采用电池供电, 我们在保证性能的同时, 尽可能降低系统功耗以节约电能。本文正是结合课题所需, 设计并实现了一种小型化低功耗水声时间反转应答系统。

1 基于 MSP430 的低功耗水声时间反转应答系统设计

1.1 水声时间反转镜简介

海洋的不均匀和多途效应使得接收信号的时域、频域特性发生变化, 最终导致检测能力的下降。为了克服在声学

不均匀介质中的波形畸变, 在声学中引用了源于光学中不均匀介质的相位共轭成像法, 并将连续波的相位共轭法发展为时间反转法。

当不考虑空间不均匀和界面不均匀性的随机性时, 水声信道的空变特性可以用相干多途信道的系统函数表示。由于水下声信道的多途效应, 因此怎样将各途径到达的信号分量综合利用, 是值得研究的。借鉴匹配滤波器空间匹配滤波的思想, 如果用 $S(\omega)$ 表示信号的频谱, $H(\omega)$ 表示信道的传输函数, 则信号经过信道输出的频谱可写作:

$$R(\omega) = H(\omega) \cdot S(\omega) \quad (1)$$

令 $X(\omega)$ 是 $R(\omega)$ 的复共轭, 即:

$$X(\omega) = R^*(\omega) = H^*(\omega) \cdot S^*(\omega) \quad (2)$$

将 (2) 式两边同乘 $H(\omega)$, 可得到:

$$Z(\omega) = H(\omega) \cdot H^*(\omega) \cdot S^*(\omega) \quad (3)$$

(3) 式中 " $H(\omega) \cdot H^*(\omega)$ " 一项是实、偶、正函数, 它在时间零点的傅里叶反变换是同相叠加的, 会得到主相关峰值, 这使得信号与其乘积的结果 $Z(\omega)$ 比 $R(\omega)$ 要大的多。这就是水声信道中时间反转镜聚焦的根本原理。在 (1) 式至 (2) 式中, $X(\omega)$ 可认为是接收信号时反后的频谱, $Z(\omega)$ 可认为是时间反转镜输出的频谱。

1991 年, Dowling 对时间反转镜应用于水声作了定义和基本的理论分析。通过海上实验来研究水声时间反转镜的特性, 实验系统由发射和应答两部分组成。信号由发射系统发出, 经海洋信道到达应答系统, 应答系统对接收信号进行时间反转并回发。多通道的时间反转应答系统可以研究海洋中时间反转镜的聚焦效应。水声时间反转镜实验如图 1 所示。

收稿日期: 2007-03-22

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (60532040)

作者简介: 张志博 (1980—), 男, 中国科学院声学研究所博士研究生, 主要从事多元信号处理, 嵌入式系统设计等方面的研究工作。

孙长瑜 (1954—), 男, 中国科学院声学研究所研究员, 博士生导师。

李启虎 (1939—), 男, 中国科学院声学研究所研究员, 中国科学院院士, 博士生导师。

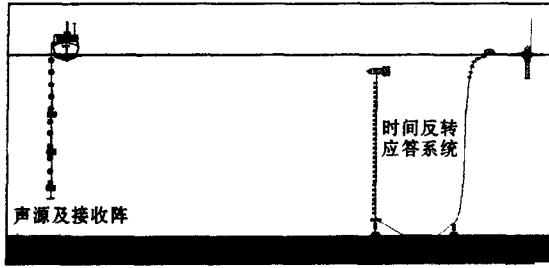


图 1 水声时间反转镜实验示意

1.2 超低功耗 MSP430 微控制器

美国德州仪器 (TI) 公司的 MSP430 系列微控制器是一种 16 位超低功耗的混合信号处理器 (Mixed Signal

Processor)。MSP430F169 是目前 MSP430 系列中高档型号之一。它采用 16 位 RISC 结构, 具有丰富的内外设和大容量的存储空间。其内部结构如图 2 所示。

MSP430 系列处理器的突出特点是超低功耗, 正常工作时的电流仅为微安级, 其中 MSP430F169 在电压 2.2 V, 工作频率 1 MHz 下的动态模式下电流为 330 μ A。标准模式下电流为 1.1 μ A。RAM 保持的节电模式下, 工作电流为 0.2 μ A。MSP430 具有五种不同的低功耗模式。可以在一个动态模式与五个软件可选择低功耗模式下运作, 一个中断事件就可以将 MSP430 由五种低功耗状态下唤醒, 响应中断, 在中断服务程序结束后返回低功耗模式。由休眠唤醒到标准模式时间不多于 6 μ s。正是这种先进的功耗管理和出色的超低功耗特点, 使其很适合作为低功耗应答系统内部的主处理器使用。

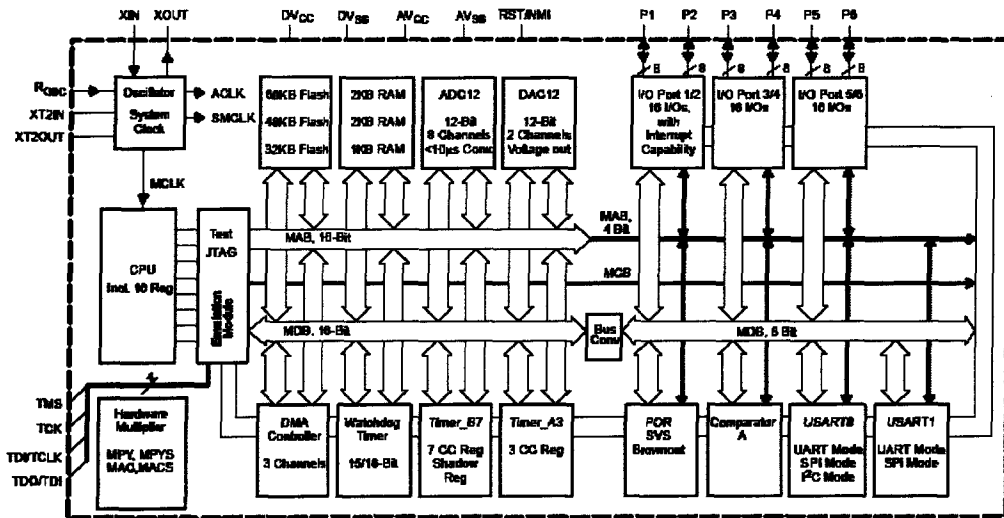


图 2 MSP430x16x 结构框图

此外, MSP430F169 具有强大的运算能力: 16 位 RISC 结构, 丰富的寻址方式; 具有 16 个中断源, 并且任意嵌套; 在 8 MHz 时钟驱动下指令周期可达 125 ns; 内部包含硬件乘法器和大量寄存器及多达 60 K Byte 的 FLASH 程序空间和 2 K Byte 的 RAM 空间, 为存储数据和运算提供了保证。这些特点使 MSP430F169 具有很强的数字信号处理能力。

MSP430F169 还具有丰富的片上外设: 包括看门狗定时器, 16 位定时器 (TA/TB), 8 通道 12 位快速 A/D (模数) 转换器, 双 12 位 D/A (数模) 转换器, 通用同步/异步串行通讯接口, I2C 接口, DMA 控制器, 48 个通用 I/O 端口。如此丰富的片上资源使很多功能都可以在一个芯片上完成, 大大降低了系统成本并提高了设计的可靠性。

2 系统电路设计

时间反转应答系统框架如图 3 所示。

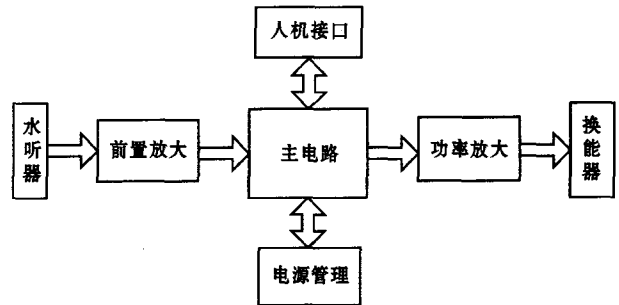


图 3 时间反转镜应答系统硬件结构图

整个系统由干端和湿端组成, 其中干端完成信号检测处理及系统控制功能, 包括应答主电路、前置放大电路、功放电路、人机接口电路, 电源管理电路等模块; 湿端由水听器和发射换能器组成, 负责水声信号的接收和应答信号的发出。

水听器接收到水声信号后经前置放大电路送至应答主电路模块，MSP430F169 是系统的核心部分，MSP430F169 利用内置的 A/D 转换器进行采样，经过信号检测，将检测到的信号直接转发或进行缓存，D/A 转换由其内置的 D/A 转换器完成。主电路中采用二阶压控滤波电路平滑输出波形，电路如图 4 所示。同时，MSP430F169 还负责整个系统的控制及管理，如对人机接口和电源管理模块进行控制。

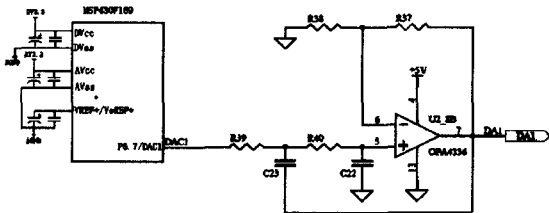


图 4 主电路波形输出平滑电路

人机接口模块对应答系统进行初始化设置并显示应答系统的工作状态，包括可以通过 LCD 显示器、小型键盘或异步串口 (UART) 完成人机交互操作。

电源管理模块的主要功能是对电池组电源进行管理，包括电量监控、电压管理以及对系统内其它个模块的供电管理，从而实现对系统功耗的合理控制。

3 系统软件设计

3.1 A/D 采样模块

A/D 转换由 MSP430F169 内置的 A/D 转换器完成。系统通过软件进行初始化设置，包括参考电压、采样率、保持时间等参数的设定。应当说明的是，由于 MSP430F169 的 A/D 转换器的采样率可达 200 kHz，而对于我们的实际应用来说 10 kHz 即可以满足要求，过高的采样率会加大数据量。这里采用内置定时器触发方式控制实际采样率。定时器 TimerA 以 10 kHz 的频率触发 A/D 采样，A/D 转换器产生中断，中断服务程序完成采样数据的保存。时序示意图如图 5 所示。

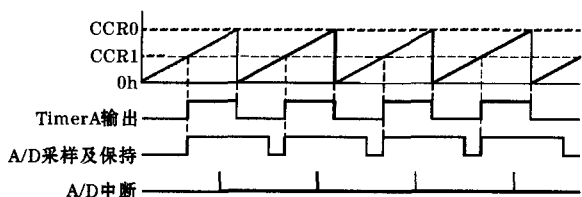


图 5 A/D 采样模块工作时序

合理的 A/D 转换器及定时器初始化是保证 A/D 采样正常运转的关键，下面列出的是本系统对 A/D 采样模块的初始化程序。

```
void ADC—Init (void)
{
    P6SEL |= 0x01; // 选择通道 A0
    ADC12CTL0 = ADC12ON+SHT0_8+MSC+REF2
    _5V+REFON; // 初始化 ADC12
    Deley_10ms (); // 延时 10ms
    ADC12CTL1 = CONSEQ_2+SHS_1; // 触发方式
    // 单通道连续采样
    ADC12MCTL0 = INCH_0 + SREF_1;
    ADC12IE = 0x0001; // 使能 ADC12IFG.0
    P2SEL |= BIT3; // 设置 Timer A1
    P2DIR |= 0x08;
    CCTL1 = CCIE; // CCR1 中断使能
    CCR0 = 800;
    CCR1 = 400;
    TACCTL1 = OUTMOD_3; // CCR1 设置
    TACTL = TASSEL0 + TACLK + MC_31; // 时钟
    ACLK, TAR 清零
}
```

3.2 信号检测与处理模块

信号检测与处理模块的功能是检测有效信号并进行处理。当没有信号发射时，应答系统接收到的都是海洋噪声，此时不做应答；当有信号发射时，应答系统要作出准确检测及存储，并按要求进行信号回发。

本应答系统应用于海洋环境中，海洋环境的多变性使得环境噪声会随时间不断变化，无法将其看作一个统计特性不变的随机量，因此为了保证检测的有效性，软件实现阈值估计模块，以根据实际情况的变化灵活做出响应。阈值估计的主要功能就是根据噪声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。

根据阈值估计提供的判决门限，脉冲判决模块实现能量检测器，用于对当前脉冲进行能量判决。该能量检测器数学表示式如下：

$$\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n} \geq M \quad (4)$$

式 (4) 中 M 即为阈值估计模块提供的判决门限，能量检测器将输入的 n 个样本值平方之后再求平均，并与阈值 M 相比较。累积平均能量高于判决门限 M 的脉冲被判决为有用信号，而能量低于判决门限的脉冲则被认为是噪声。

当检测到信号并正确保存后，程序将记录保存信号区域的指针。当发送信号时，程序将使指针递减，以达到时间翻转的目的。

信号检测与处理模块程序流程如图 6 所示。

3.3 D/A 转换模块

D/A 转换由 MSP430F169 内置的 D/A 转换器完成。D/A 转换器与 A/D 转换器共用一个参考电压，这样保证了

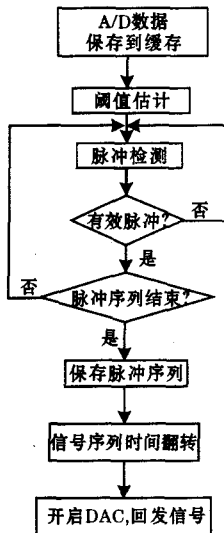


图6 信号检测与处理模块程序流程

信号收发的一致性。虽然 D/A 转换不需要定时器触发而运转, 但为保持信号收发的一致性, 本系统采用 10 kHz 的频率更新 D/A 转换器的数据缓冲寄存器, 以保证原始信号的信息完整。由于定时器 TimerA 已经用于 D/A 转换的触发, 这里使用定时器 TimerB 产生定时中断, 以更新数据。

以下是 D/A 转换模块设置程序及定时器中断服务程序。

```
void DAC—Init (void)
{
```

```

ADC12CTL0 = REF2_5V + REFON; // 内置参考电压 2.5 V 开启
DAC12_1CTL = DAC12IR + DAC12AMP_5 + DAC12ENC + DAC12CALON;
// DAC 初始化
Deley_10ms (); // 延时 10ms
P6SEL |= 0x80; // 选通 DAC1
TBCTL = TBSSEL0 + TBCLR + MC_1; // 时钟 ACLK, TAR 清零, 递增模式
TBCCTL0 = CCIE; // CCR0 中断使能
TBCCR0 = 800;
}
#pragma vector = TIMERB0_VECTOR // 定时器中断服务程序
__interrupt void Timer_B (void)
{
DAC12_1DAT = DAC_data1 [i];
i++;
if (i==512) i=0;
}

```

4 系统测试

为检测系统性能, 通过对多组不同信噪比的信号进行应答来对系统进行测试, 应答情况如图 7 所示。

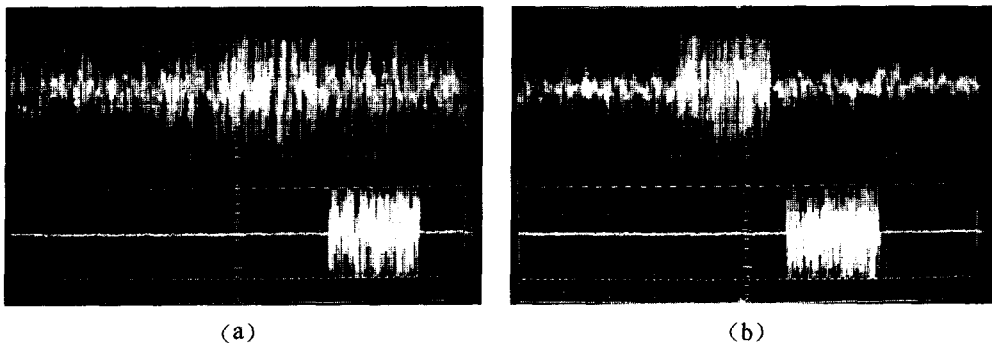


图7 应答系统测试结果

由于测试次数较多, 在此无法全部列举。图 7 所示的是其中对信噪比分别较低、较高的两组信号的应答情况。图 7 (a) 中上方通道信号为应答系统接收到的信号, 信噪比为 3 dB; 下方通道信号为应答信号。从结果可知, 系统准确地捕捉到信号, 并回发。图 7 (b) 所示的是系统对信噪比为 10 dB 的信号进行的应答情况。

经测试, 本系统工作正常, 很好地满足了水声信号匹配基础研究的实验要求。

5 结束语

水声时间反转应答系统对体积、功耗及可靠性等方面有着极高的要求。超低功耗 MSP430 微控制器作为该系统的核心元件是十分理想的选择。本文中的应答系统充分发挥了 MSP430 低功耗、小体积、高性能的特点, 使主要功能集中在单一芯片上完成, 这是对水声仪器小型化的有益尝试。本系统在水声信道匹配基础研究课题中发挥了重要作

用,在实验室及海上的测试中均取得理想效果。进一步将本系统与浮标、潜标技术相结合,将更大地扩展其工作能力,

因此本系统具有极为广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 李启虎著. 数字式声纳设计原理 [M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2002.
- [2] H C Song, W A Kuperman, W S Hodgkiss, T Akal, S Kim, and G Edelmann. Recent results from ocean acoustic time reversal experiments. ECUA2002, Gdanski, Poland, 2002.
- [3] 惠俊英. 水下声信道 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [4] 生雪莉, 惠俊英, 梁国龙. 时间反转镜用于被动检测技术的研究 [J]. 应用声学, 2005, 24 (6): 351~358.
- [5] 沈建华等著. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] Texas Instruments. MSP430x1xx Family User' s Guide. 2006.
- [7] Texas Instruments. MSP430x15x, MSP430x16x, MSP430x161x MIED SIGNAL MICROCONTROLLER. 2005.

Design of the Responder System for Acoustic Time-Reversal Mirror Based on MSP430

ZHANG Zhi-bo^{1,2}, SUN Chang-yu¹, LI Qi-hu¹

- (1. *Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Equipments used for underwater acoustics research usually have large size and complicated structure, which is inconvenient for application and maintenance. So the miniaturization of the equipments becomes necessary. Underwater acoustics time reversal responder system is the major equipment for the research on underwater acoustics time reversal mirror. According to the experiment requirement, a responder system with small size and low power consumption is designed. The kernel component of the system is MSP430F169 microcontroller. The hardware and software designs are presented, and the application and function of the system are also introduced. This design improved the convenience and flexibility of the system with small size and concise structure, while ensuring the performance.

Key words: MSP430; time-reversal mirror; responder system