

# 数字均衡技术在水声宽带系统中的应用

周伟江<sup>1</sup>, 景永刚<sup>2</sup>, 陈梦英<sup>2</sup>

(1. 解放军某部, 辽宁葫芦岛 125000; 2. 中国科学院声学所东海站, 上海 200032)

**摘要:** 为了提高声纳探测目标的能力, 往往采用复杂的发射信号体制, 并且所覆盖的频带越来越宽。但是湿端的宽带换能器在所需工作频段内的收发电压响应并不是平滑均等的, 这对信号处理产生较大的影响, 需要对其进行补偿。研究了数字均衡器的特点, 并将其引入到宽带接收系统中用于补偿匹配换能器。最后在 NI-CompactRIO 平台中实现了该功能, 通过仿真试验验证了该方法是有效可行的。这对该技术在水声宽带系统中的应用提供了参考。

**关键词:** 数字均衡; NI-CompactRIO; 水声宽带系统

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-02-0219-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.020

## Application of digital equalizer technology in underwater broadband system

ZHOU Wei-jiang<sup>1</sup>, JING Yong-gang<sup>2</sup>, CHEN Meng-ying<sup>2</sup>

(1. Certain Troops, PLA, Huludao 125000, Liaoning, China;

2. Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The complex transmitting signal system is often adopted in order to enhance the sonar's capability of target searching, and the covered frequency band of this system is getting wider and wider. However, the transmitting and receiving voltage response curve of a broad band underwater transducer is usually not flat in the frequency range. This brings influences on signal processing, which requires compensation for frequency response. This paper studies the characteristics of digital equalizer and applies this to compensate the matching transducer in broad band receiving system. The function is realized at the platform of NI-CompactRIO and proved to be available and feasible by simulation, which offers a reference for the application of digital equalizer in acoustic broad band system.

**Key words:** digital equalizer technology; NI-CompactRIO; underwater broadband system

## 0 引言

宽带信号处理是水声研究与发展的重要方向, 在宽带设备的收发系统各个模块都需要考虑宽带信号的性能要求。由于宽带换能器的收发电压响应在其工作带宽内并不是平滑的, 有一定的起伏值, 这样就使得信号处理端接收到的信号幅度受到影响, 导致信号畸变, 无法正确反映接收信号的真实情况。如果不予将其补偿, 将对整个设备的性能产生很大的影响。

均衡器可用来对频响曲线进行调整, 也就是说, 均衡器能对不同频率成分的声音信号进行不同的提升和衰减, 补偿由于换能器和水声声场等原因造成的信号中欠缺的频率成份, 能抑制声音中过多

的频率成份, 满足后续的信号检测与估计对频率响应的要求。基于这些特点, 本文采用了该方法对换能器的均衡问题进行研究。

均衡器在移动通信领域已有广泛的应用, 在单载波系统中主要用于补偿信道衰落, 减少或者消除码间干扰, 提高系统传输性能。均衡器分为时域均衡器与频域均衡器。时域均衡器直接从时间响应出发, 使系统的冲激响应满足无码间干扰的条件; 但是在高速率的无线通信系统中, 时域均衡的计算复杂度十分巨大, 难以实现。频域均衡器则直接补偿信道的频率选择性, 使系统的频率传输函数满足无失真传输的条件<sup>[1]</sup>。在水声宽带接收系统中, 情况是类似的。本文提出根据实测换能器的灵敏度响应曲线, 得到在工作频带内各个频点的响应值, 然后设计出任意所需类型的数字均衡器对接收信号进行抑制或补偿, 从而使得在各个频点上接收灵敏度相同。

收稿日期: 2011-04-02; 修回日期: 2011-07-10

作者简介: 周伟江(1985—), 男, 天津人, 助理工程师, 研究方向为水下靶标应用。

通讯作者: 景永刚, E-mail: ygjing@sina.com

## 1 数字均衡器设计

### 1.1 宽带换能器的特点

某些声纳的工作带宽较宽,为了使换能器能满足发送接收要求,一般在研制换能器时采用匹配层技术使其产生两个谐振频率,从而实现高频换能器的宽带特性。在工作频带内,这种换能器在各个频点的电压响应值并不相同,图1为某宽带换能器在工作带宽内的接收灵敏度实测曲线图。图中横坐标代表频率,单位: kHz,纵坐标为接收灵敏度,单位: dB。最大的电压起伏级为 6.19 dB。因此需要进行补偿平衡。

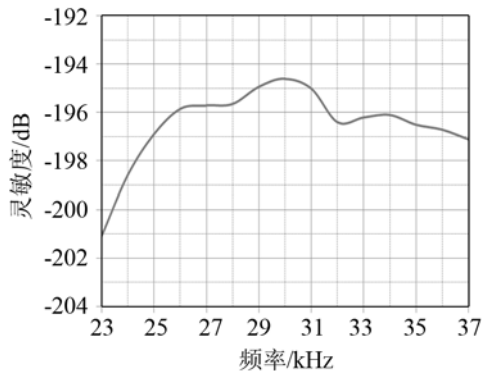


图1 接收水听器灵敏度曲线  
Fig.1 Voltage response of a receiving transducer

如果对工作频带内收发响应不加以补偿,对后续的信号处理会产生较大的影响。在以前的水下兵器检测设备中,由于对自导信号的先验知识比较多,采用一定的技术就能确定自导信号的频带,从而通过查表就能很好地对收发换能器的起伏进行很好的补偿。随着水下兵器技术的发展,自导体制越来越复杂,已有的方法已不适用。本文提出采用数字均衡器(即滤波器)的方法对收发换能器在工作频带内进行补偿。

### 1.2 基于 IIR 滤波器的数字均衡器实现

IIR 滤波器具有可以用完整的设计公式来设计各种选频滤波器的特点,也就是说,一旦选定了逼近方法(即巴特沃兹、切比雪夫或椭圆逼近),则可直接把技术指标代入一组设计方程来计算满足技术条件的滤波器的阶次,并得出数字滤波器的系数(或极点和零点)。并且直接得出 IIR 滤波器的非迭代计算程序。这些方法只限于设计选频滤波器,并只允许用于规定了幅度响应的场合。如果不考虑相位问题,一般来说,用 IIR 滤波器就能最有效地满足给定的幅度响应技术指标<sup>[2]</sup>。与此相反, FIR 滤

波器可以有精确的线性相位,但它不存在完整的设计方程。虽然可直接用窗函数法,但为了满足预定的技术指标有可能需要一些迭代。本文中换能器的发送电压响应可通过实验测得。为了均衡该频带的幅频响应,通过计算需要设计的滤波器的幅度响应技术指标是已知的,并且对相位信息没有要求。因而本文非常适合使用 IIR 滤波器。

IIR 数字滤波器设计通常分为两类:先设计一个模拟滤波器,然后变换成满足预定指标的数字滤波器,由于模拟滤波器的设计有现成的公式,参数已经表格化,设计起来方便准确;另一种方法是计算机辅助设计法,先确定最优准则(如均方差最小准则或最大误差最小准则等),然后求出在此准则下滤波器的系数,由于需要大量的迭代运算,故离不开计算机<sup>[3]</sup>。本文需要设计出指定幅频响应的滤波器,因而采用了第二种方法设计。

IIR 数字滤波器的特征是,具有无限持续时间冲激响应,需要用递归模型来实现,其传递函数为

$$H(\omega) = \frac{B(\omega)}{A(\omega)} = \frac{\sum_{n=0}^N b(n)e^{-j\omega n}}{1 + \sum_{n=1}^M a(n)e^{-j\omega n}} \quad (1)$$

其中,  $a(n)$  和  $b(n)$  为滤波器系数。IIR 滤波器的设计问题就是求出滤波器的各个系数  $a(n)$  和  $b(n)$ , 使得它采用最优化准则逼近所要求的特性。本文采用最小  $p$  误差设计法准则<sup>[4]</sup>。即满足

$$\|E\|_p = \left( \sum_{i=0}^{L-1} (W(i)|H(\omega_i) - D(\omega_i)|)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

其中:  $W(i)$  是各个要求频点的加权值;  $H$  为 IIR 滤波器的传递函数;  $D$  为所需的滤波器的传递函数;  $p$  的取值为 2(即最小均方误差)到无穷大, 128 为默认值。

图2给出了在工作频带内所需的滤波器传递函数  $D$  的响应图。根据公式(2)即可设计出所需的数

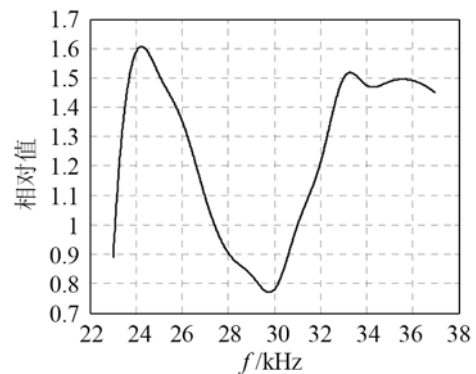


图2 所需的滤波器传递函数  
Fig.2 Filter response function

字均衡器。最小  $p$  误差设计法能够得到任意所需幅频响应曲线的滤波器。

## 2 NI-CompactRIO 平台上的算法实现

### 2.1 NI-CompactRIO 平台软件设计

NI-CompactRIO 是 NI 公司推出的一种小巧而坚固的工业化控制和采集系统, 采用可重新配置 I/O(Reconfigurable I/O, RIO)的 FPGA 技术, 实现超高性能和可自定义功能。本系统采用的 CRIO 平台配置为: 嵌入式实时控制器 cRIO-9024、可重新配置机箱 cRIO-9113、模拟输入模块 NI-9215 和模拟输出模块 NI-9263。软件系统包括 FPGA 程序、Real-Time 应用程序和上位机 PC 机程序 3 层构成。FPGA 程序实现数字均衡器运算与目标信号处理算法, 并将运算后的结果传输至实时控制器; Real-Time 应用程序在实时控制器中运行, 实现最终测试结果的存储。下面主要介绍数字均衡器在 FPGA 模块的实现方法<sup>[5]</sup>。

### 2.2 数字均衡器算法实现

前面提到基于 NI-CompactRIO 的软件包括三部分, 对于实时性要求高的处理, 一般放在 FPGA 软件部分实现。数字均衡器的运算量大, 而且要求实时处理, 所以采用流水线的方法在 FPGA 模块中实现。

NI 公司的 LabView 软件开发系统中包括了 FPGA 模块和高级信号处理软件包。利用高级信号处理软件包很容易实现数字均衡器的算法。图 3 给出了实现数字均衡器滤波器的 LabView 程序, 这些模块在 FPGA 模块和高级信号处理软件包中。设计滤波器时, 根据需要的频响特性输入一个包括频率点和对应的幅值的二维数组, 并做一些必要的设置, 即可实现该算法。

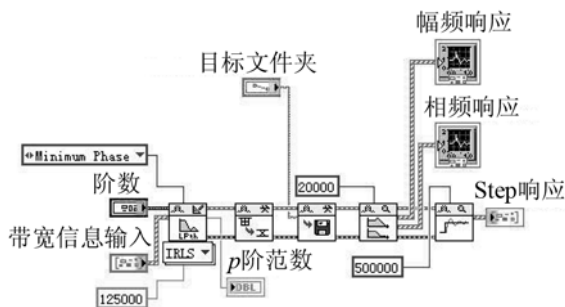


图 3 数字均衡器的实现

Fig.3 Implementation of digital equalizer

数字均衡器的一个设计难点是对输入信号进行定标以防止输出结果溢出。NI-CompactRIO 这套

控制和采集系统可以自动地对输出结果进行判断调整, 用该平台实现数字均衡器简单方便。

## 3 仿真试验

### 3.1 单频信号

在此假定一个频响特性, 设计一个数字均衡器, 然后输入一个单频信号, 对均衡器进行验证。表 1 给出了假定的频响特性数值表。

表 1 频响数据表  
Table 1 Datasheet of frequency response

频率/kHz	幅度/V
24.0	0.874
25.0	0.899
26.0	0.980
27.0	1.068
28.0	1.165
29.0	1.286
30.0	1.439
31.0	1.513
32.0	1.550
33.0	1.550
34.0	1.550
35.0	1.550
36.0	1.550

仿真时, 输入信号是有效值为 1 的单频正弦信号, 表 2 给出了均衡器的输出幅度值, 并给出了输出与设计值的误差。可以看出该滤波器的在指定频点上的误差最大不超过 0.07 dB, 有效地补偿了指定频点的频响不均衡性。

表 2 仿真结果  
Table 2 The result of simulation

频率/kHz	幅度/V	误差/dB
24	0.8742	-0.0022
25	0.9007	-0.0162
26	0.9740	0.0536
27	1.0652	0.0230
28	1.1663	-0.0097
29	1.2799	0.0413
30	1.4296	0.0569
31	1.5072	0.0334
32	1.5404	0.0540
33	1.5475	0.0140
34	1.5465	0.0199
35	1.5384	0.0651
36	1.5429	0.0397

### 3.2 高斯白噪声信号

利用前面设计的数字均衡器, 将设计信号改为标准差为 1 的高斯白噪声, 并对均衡器的输出做谱分析, 图 4 给出了谱分析的结果。通过图 4 可以看

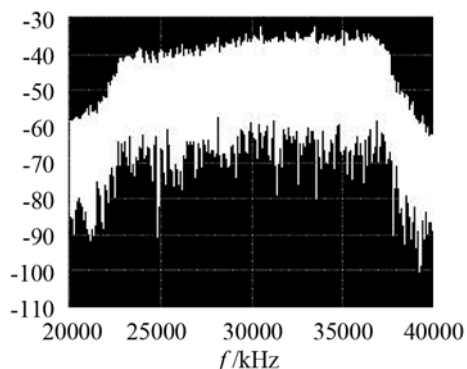


图4 输入为高斯白噪声时输出的谱分析结果

Fig.4 The output of the spectral analysis as the input signal is Gaussian white noise

出,当被测目标工作在被动模式时,该数字均衡器可根据需求,设计出所需的各种被动噪声信号。

## 4 结 论

将数字均衡技术应用到水声宽带接收系统中,有效地解决了在工作带宽内由于收发换能器频响的不同而引起的收发联合响应不一致的问题,为自导信号的后续处理带来了很大的方便。

该方法具有在 Labview 中设计灵活、调整方便、实现精度高等优点,在发射系统中使用该数字均衡器,能有效地补偿发射换能器的频响曲线,而

设备以被动方式工作时,该数字均衡器能产生各种需求的被动噪声信号。这对该技术在水声宽带设备中的应用有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 白文岭,肖悦,李少谦.一种低发射功率的单载波频域均衡结构[J].中国科学技术大学学报,2009,39(10):1102-1106.  
BAI Wenling, XIAO Yue, LI Shaoqian. A power saving single-carrier frequency domain equalization system[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(10): 1102-1106.
- [2] 谢卫华,张泽.一种数字均衡器的设计及DSP实现[J].内蒙古大学学报,2002,33(6):682-686.  
XIE Weihua, ZHANG Ze. A design and DSP realization of digital equalizer[J]. Acta Scientiarum Naturalium University Nei Mongol, 2002, 33(6): 682-686.
- [3] A V 奥本海姆, R W 谢弗, J R 巴克.离散时间信号处理[M].西安:西安交通大学出版社,2001:352-411.  
Alan V Oppenheim, Ronald W Schaffer, J R Buck. Discrete-time signal processing[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 352-411.
- [4] Brandenstein H, Unbehauen R. Weighted least-squares approximation of FIR by digital filters[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2001, 49(3): 558-568.
- [5] 何芝霞,黄昶,何云东.基于CompactRIO的数据采集系统[J].仪器仪表用户,2009,16(1):37-39.  
HE Zhixia, HUANG Chang, HE Yundong. Data acquisition system based on CompactRIO[J]. Electronic Instrumentation Customer, 2009, 16(1): 37-39.