

# 基于 NI-CompactRIO 平台的水声信号 参数估计技术实现

张万峰<sup>1,2</sup>, 景永刚<sup>2</sup>, 刘宇<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学软件学院, 上海 200240; 2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

**摘要:** 通过对水声信号进行参数估计可以获得信号的频率、制式和周期等参数信息, 传统的水声信号参数估计的实现方法过程繁琐, 工作量大, 开发周期长且可靠性较低。采用美国国家仪器公司最新推出具有高实时性的嵌入式控制和采集平台 NI-CompactRIO 以及 Labview 图形化开发环境, 在该平台上实现了谱线比值法测频、信号转发和匹配滤波三种参数估计算法, 提高可靠性的同时也缩短了开发周期。

**关键词:** NI-CompactRIO; 谱线比值法; 信号转发; 匹配滤波

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-03-0344-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.03.023

## NI-CompactRIO based underwater acoustic signal parameter estimation and implementation

ZHANG Wan-feng<sup>1,2</sup>, JING Yong-gang<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>

(1. School of Software, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

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

**Abstract:** Three algorithms are commonly used for underwater acoustic signal parameter estimation: 1. the method of measuring signal frequency with the ratio of maximum spectrum line to sub-major spectrum line; 2. the signal retransmission is to send the received signal with added feature information; 3. the matched filter is to carry out convolution of matching function and received signal to determine the receiving signal. The latest real-time embedded development platform NI-CompactRIO and the Labview development environment are selected to implement the above three algorithms. Experimental results prove the correctness of the algorithms, and verify the feasibility of NI-CompactRIO platform.

**Key words:** NI-CompactRIO; spectrum line ratio method; signal transmission; matched filter

## 1 引言

水声信号参数估计算法是通过通过对被测信号进行 AD 采样后, 针对 DSP、FPGA 芯片编写程序来实现的。不但要熟悉各个开发环境, 还要考虑如何与嵌入式计算机系统整合。采用 NI-CompactRIO 平台就可以不必考虑嵌入式计算机系统整合与信号处理芯片的开发编译环境, 在减少开发周期的同时, 增加了系统的可维护性。

NI-CompactRIO 平台是美国国家仪器公司(NI)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。NI-

CompactRIO 包含一个实时控制器与可重新配置的 RIO FPGA 芯片, 适用于可靠的独立嵌入式或分布式应用系统, 还包含热插拔工业 I/O 模块, 内置可直接和传感器/调节器连接的信号调理<sup>[1,2]</sup>。

本文主要介绍谱线比值法测频、信号转发以及匹配滤波三个算法在 NI-CompactRIO 平台上的实现。

## 2 NI-CompactRIO 平台结构设计

NI-CompactRIO 平台是一个基于 FPGA 技术的嵌入式系统, 主要由嵌入式实时控制器、可重新配置的 FPGA 机箱和 I/O 模块构成, 见图 1。其中可重新配置的 FPGA 机箱是 NI-CompactRIO 平台的核心, 用户通过定制硬件来实现控制逻辑、输入/输出、定时、触发和同步设计。机箱内的 RIO FPGA 芯片以星型拓扑方式和 I/O 模块相连, 从而可以直接访问每个模块来进行精确地控制。嵌入式实时控

收稿日期: 2009-10-07; 修回日期: 2010-01-17

作者简介: 张万峰(1980-), 男, 黑龙江人, 硕士, 工程师, 研究方向为水声工程, 嵌入式计算机。

通讯作者: 张万峰, dickfy@yahoo.cn

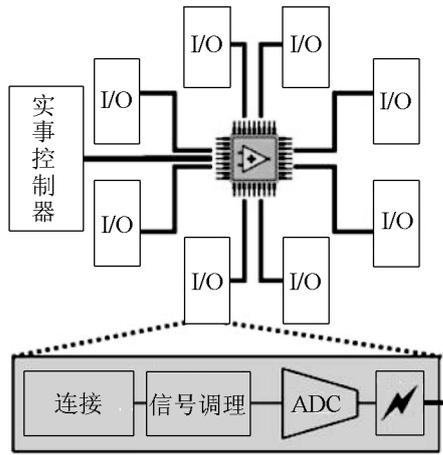


图1 NI-CompactRIO 平台基本构成  
Fig.1 Basic components of NI-CompactRIO platform

制器内含高性能的处理器,运行 Labview Real-Time (Labview RT)模块软件可以进行实时控制、分析、数据记录与通信。

系统采用 Labview 开发环境、Labview RT 软件模块和 Labview FPGA 软件模块进行综合设计。其中 Labview FPGA 模块在硬件中执行用户设计的逻辑算法,从而可以快速地处理和生成同步模拟信号或数字信号。Labview FPGA 模块将采集到的数据传输至 Labview RT 模块对实时数据进行浮点运算,或者进行一些基于模型的控制和仿真。Labview 开发环境在上位机运行,并通过网络对 NI-CompactRIO 平台进行开发。

本文所应用的硬件配置如下:嵌入式实时控制器 cRIO-9014、可重新配置机箱 cRIO-9103、模拟输入模块 NI-9215 和模拟输出模块 NI-9263。图 2 为应用 NI-CompactRIO 平台的结构图。

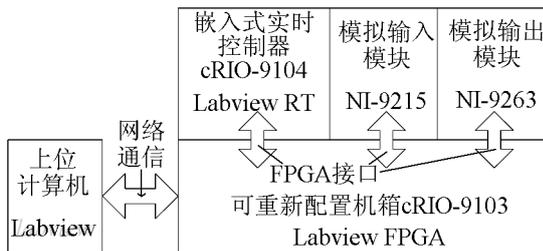


图2 NI-CompactRIO 平台结构图  
Fig.2 Structure of NI-CompactRIO platform

### 3 算法原理及实现

#### 3.1 谱线比值法测频

##### 3.1.1 谱线比值法测频算法原理

实际应用中信号采样的长度是有限的,采样信号可以看作是所测的连续时间信号的截断,这样就

不可避免地会引起谱泄露,造成测频的误差。通过对采样信号加窗可以减少截断信号的转折沿,从而减小谱泄露。谱线比值法是通过将采样信号加窗后选取频谱上的最高谱线(主谱线)和次高谱线(最大旁谱线),根据他们幅度的比值和信号频率对应关系测出信号的频率<sup>[3]</sup>。

设信号为  $x(n)$ , 窗函数为  $w(n)$ , 加窗后的信号为  $y(n)$ , 则  $y(n)=x(n)w(n)$ , 如果  $X(k)$ 、 $W(k)$ 、 $Y(k)$  分别是  $x(n)$ 、 $w(n)$ 、 $y(n)$  的离散傅里叶变换, 根据离散傅里叶变换的卷积性质有:

$$Y(k)=\frac{1}{N}X(k)\otimes W(k) \quad (1)$$

假设信号为单频信号的离散形式:

$$x(n)=e^{j\frac{2\pi n f_0}{F_s}}=e^{j\frac{2\pi n f_0}{N\Delta f}}, \quad -\infty < n < \infty \quad (2)$$

其中  $f_0$  为信号频率,  $F_s$  为采样率,  $N$  为采样点数,  $\Delta f=F_s/N$ 。

汉明窗(Hamming)的表达式为:

$$w(n)=a+(1-a)\cos(\frac{2\pi}{N}n), \quad -\frac{N}{2}\leq n\leq\frac{N}{2} \quad (3)$$

其中  $a$  是汉明窗的系数, 通常取  $a=0.54$ 。其谱函数为:

$$W(k)=aD(k)+\frac{1}{2}(1-a)\times[D(k-1)+D(k+1)] \quad (4)$$

其中  $D(k)=e^{j\frac{\pi k}{N}}\frac{\sin(\pi k)}{\sin(\pi k/N)}$ 。

信号  $x(n)$  的离散傅里叶变换为:

$$X(k)=N\delta(k-\frac{f_0}{\Delta f}) \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(1), 可得:

$$Y_{hamming}(k)=\frac{1}{N}N\delta(k-\frac{f_0}{\Delta f})\otimes W(k)=W(k-\frac{f_0}{\Delta f})=aD(k-\frac{f_0}{\Delta f})+\frac{1}{2}(1-a)\times[D(k-1-\frac{f_0}{\Delta f})+D(k+1-\frac{f_0}{\Delta f})] \quad (6)$$

信号加汉明窗后的频谱由一系列谱线组成(信号频率  $f_0$  是  $\Delta f$  整数倍时只有三根谱线), 其中最主要的三根谱线比其他谱线幅度大, 称幅度最大的谱线为主谱线, 假设它是频谱上的第  $i$  根谱线, 即  $k=i$ , 另两根谱线位于主谱线的两侧, 称之为旁谱线, 它们是频谱上第  $i-1$  和第  $i+1$  根谱线。设信号频率  $f_0=(i+\Delta i)\Delta f$  ( $|\Delta i|\leq 0.5$ ), 代入式(6)中得:

$$Y_{hamming}(k)=aD(k-i-\Delta i)+\frac{1}{2}(1-a)\times[D(k-1-i-\Delta i)+D(k+1-i-\Delta i)] \quad (7)$$

三根主要谱线的幅度分别为:

$$Y_{hamming}(i)=aD(-\Delta i)+\frac{1}{2}(1-a)\times[D(-1-\Delta i)+D(1-\Delta i)] \quad (8)$$

$$Y_{hamming}(i-1) = aD(-1-\Delta i) + \frac{1}{2}(1-a) \times [D(-2-\Delta i) + D(-\Delta i)] \quad (9)$$

$$Y_{hamming}(i+1) = aD(1-\Delta i) + \frac{1}{2}(1-a) \times [D(-\Delta i) + D(2-\Delta i)] \quad (10)$$

从式(8)、(9)、(10)可以看出三根谱线幅度均与  $\Delta i$  有关, 而  $\Delta i$  又与信号频率  $f_0$  有关, 因此选取信号加窗后频谱上的最高谱线(主谱线)和次高谱线(最大旁谱线)进行幅度比值, 进而推算出信号频率。

### 3.1.2 谱线比值法测频算法实现

谱线比值法测频算法在 NI CompactRIO 平台上实现, 先通过网线将上位机与 NI CompactRIO 平台连接, 在上位机运行 LabVIEW 开发环境搜索 NI CompactRIO 平台, 然后在所搜索到的平台上新建一个工程, 工程界面如图 3 所示。该工程界面中可以看到 NI CompactRIO 平台以及为其设定的 IP 地址, 点击其下拉菜单可以看到 NI CompactRIO 平台机箱的图标及型号, 继续点击机箱 cRIO-9103 下拉菜单便可以看到安装在该机箱四个槽口上的硬件模块(点击各个硬件模块的下拉菜单还可以看到各个硬件模块的各个通道)和机箱 cRIO-9103 内置的时钟。在机箱 cRIO-9103 下拉菜单内创建一个 FPGA 程序, 用于对模拟输入模块 NI-9215 进行控制以完成信号采集。在 NI CompactRIO 平台下拉菜单下创建一个 HOST 程序, 用于对采集到的数据按照第 3.1.1 节中算法进行数据处理, 其结果见图 4。同时需要在机箱 cRIO-9103 下拉菜单内创建一个数据 FIFO(First Input First Output)用于 FPGA 程序与 HOST 程序间的数据传输。

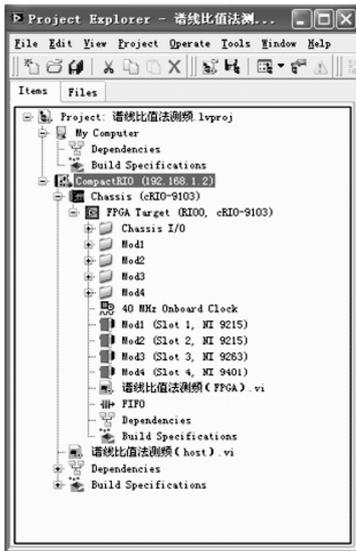


图 3 谱线比值法测频程序工程界面

Fig.3 Measuring frequency of signal by a spectrum line ratio method program project interface

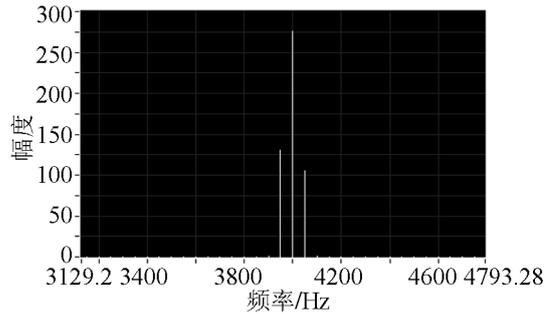


图 4 谱线比值法测频结果

Fig.4 The result of measuring frequency by spectrum line ratio method

## 3.2 信号转发

### 3.2.1 信号转发原理

若运动目标信号的频率是  $f_0$ , 其相对观测声源的运动速度为  $v_r$ , 根据多普勒效应, 接收声源接收到的信号频率<sup>[4]</sup>  $f_r$  为:

$$f_r = f_0 \times (1 + v_r / c) \quad (11)$$

式(11)中  $c$  为水中的声速。如观测声源要模拟航速为  $v_s$  的运动目标, 则观测声源转发的信号频率  $f_i$  为:

$$f_i = f_0 \times (1 + v_r / c + 2v_s / c) \quad (12)$$

由于观测声源转发信号存在多普勒效应, 所以回发过程中要加入多普勒频移, 并且转发信号波的数量  $Cycle$  与接收到的数量应该一致, 数据 A/D 卡和 D/A 卡的每次采样点数  $N$  也应该一致, 所以转发时存在一个采样率转换的问题。

对于数据采集卡来说, 采集每一帧数据的时间长度  $t$  为:

$$t = \frac{N}{F_s} = \frac{Cycle}{f} \quad (13)$$

其中  $N$  为每一帧数据的采样点数,  $F_s$  为采样率,  $Cycle$  为每一帧数据内波的数量,  $f$  为信号频率。式(13)中每一帧数据的采样点数  $N$  和每一帧数据内波的数量  $Cycle$  是不变的, 鱼雷声靶转发信号由于加入了多普勒频移, 使得转发信号频率  $f$  发生了变化, 所以采样率  $F_s$  也随之发生了变化。转发信号的采样率  $F'_s$  与接收信号采样率  $F_s$  关系如下:

$$F'_s = F_s \times f_i / f_r \quad (14)$$

其中  $f_r$  为接收信号频率,  $f_i$  为转发信号频率。

### 3.2.2 信号转发实现

由于机箱 cRIO-9103 内置三百万门的 FPGA 芯片可十分方便地进行分频运算, 因此该平台易于实现对信号的变采样率采样。对 NI CompactRIO 平台的设置以及新建 LabVIEW 工程、FPGA 程序、HOST 程序和 FIFO 等设置均与谱线比值法测频算法在 NI CompactRIO 平台上实现的方法一致, 这里就不再

赘述。需要说明的是 HOST 程序按照上述算法将生成鱼雷自导转发信号,并将该信号的数据写入设定好的 FIFO 内,再由 FPGA 程序按照设置好的采样率由模拟输出模块 NI-9263 输出,其结果见图 5。

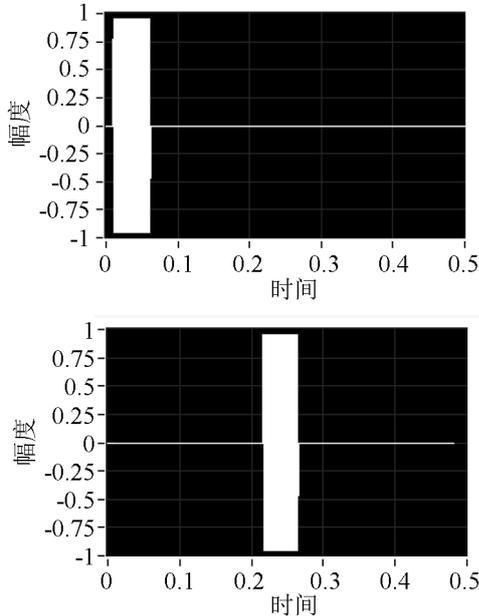


图5 信号转发结果  
Fig.5 The result of signal transmission

### 3.3 匹配滤波

#### 3.3.1 匹配滤波算法原理

匹配滤波的目的是最大限度地降低噪声对接收信号判决的影响,在最大信噪比准则下的最佳线性检测系统称为匹配滤波器。在白噪声干扰的情况下,输出端给出的最大信噪比的匹配滤波器的传输函数应是输入信号频谱的复共轭<sup>[4,5]</sup>。由于水声信号体制为脉冲信号,所以匹配滤波过程是通过信号与匹配滤波器的脉冲响应函数卷积实现的。由于水声信号体制比较复杂以及多途和混响的影响,故采用对接收信号包络进行匹配滤波,从而判决接收信号。

假设信号包络  $x(n)$  为:

$$x(n) = \begin{cases} a, & t \leq n \leq t + \tau, a > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

其中  $a$  为包络幅度,  $t$  为包络开始时刻,  $\tau$  为包络信号宽度。与该包络匹配函数  $h(n)$  为:

$$h(n) = \begin{cases} -1, & 0 \leq n < \tau/2 \text{ 且 } 3\tau/2 \leq n < 2\tau \\ 1, & \tau/2 \leq n < 3\tau/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

将  $x(n)$  与  $h(n)$  进行卷积得到  $y(n)$ :

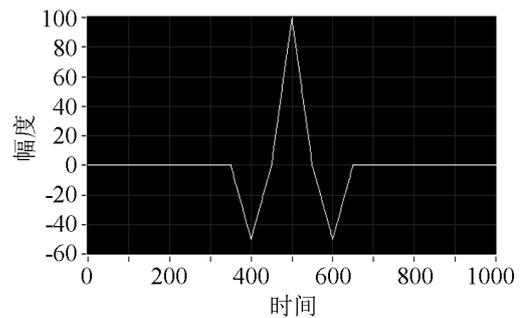
$$y(n) = x(n) \otimes h(n) \quad (17)$$

如果一帧信号包络数据点数为  $n_1$ , 匹配函数数据点数为  $n_2$ , 则卷积结果  $y(n)$  的数据点数为  $n_1 + n_2$ 。

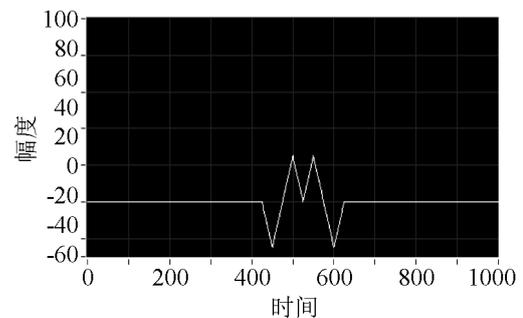
将卷积结果  $y(n)$  时间轴左移  $3\tau/2$ , 根据离散信号卷积的性质可知,卷积结果幅度最大值所对应的位置即为包络开始的时刻  $t$ 。如果匹配函数的周期大于或者小于包络信号的脉宽的两倍(即  $2\tau$ ), 则匹配结果为无峰值或者双峰值。

#### 3.3.2 匹配滤波算法实现

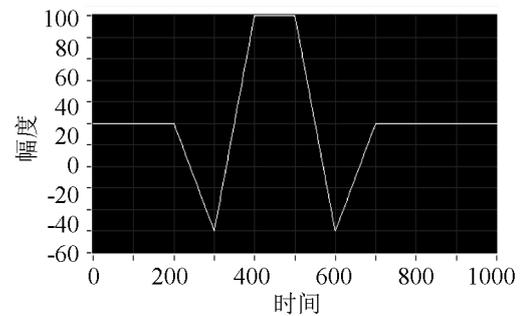
由于控制器 cRIO-9014 内置 400MHz 的处理器可进行大量运算,因此该平台可对输入信号进行实时匹配滤波。对 NI-CompactRIO 平台的设置以及新建 LabVIEW 工程、FPGA 程序、HOST 程序和 FIFO 等设置均与谱线比值法测频算法在 NI-CompactRIO 平台上的实现方法一致,这里就不再赘述。其中通过 HOST 程序实现匹配滤波算法,其结果见图 6。图 6(a)为  $2\tau$  时,匹配输出为唯一峰值。图 6(b)、6(c)中匹配周期分别为  $\tau/2$  和  $4\tau$ , 匹配结果为无峰值和双峰值,不匹配。



(a) 匹配周期为  $2\tau$



(b) 匹配周期为  $\tau/2$



(c) 匹配周期为  $4\tau$

图6 匹配滤波结果

Fig.6 The result of matched filter

## 4 实验结果

完成谱线比值法测频、信号转发和匹配滤波三个水声信号参数估计算法在 NI CompactRIO 平台上的实现后, 在实验室利用信号发生器、示波器以及其他仪器, 分别对 NI CompactRIO 平台上的三个算法进行了验证。首先, 将信号发生器的输出与程序中设定的模拟输入模块 NI-9215 通道相连, 信号发生器分别产生频率为 1000Hz、1500Hz、2000Hz、2500Hz、3000Hz、3500Hz 的正弦信号, NI-CompactRIO 平台测得频率误差均小于 3Hz; 其次, 将信号发生器的输出与程序中设定的模拟输入模块 NI-9215 通道相连, 示波器一路与程序中设定的模拟输出模块 NI-9263 通道相连, 另一路与信号发生器相连, 信号发生器产生单频脉冲信号, 示波器两路分别测量 NI CompactRIO 平台的输入输出信号。经示波器测量模拟输出模块 NI-9263 输出的转发信号, 其脉宽内波数、时延和转发信号的载频与程序设置值一致; 最后, 将信号发生器的输出与程序中设定的模拟输入模块 NI-9215 通道相连, 信号发生器产生固定宽度的包络信号, 在程序中更改匹配滤波器脉冲响应函数脉宽, NI CompactRIO 平台计算的匹配滤波结果与理论分析一致。

## 5 结 论

本文通过 NI-CompactRIO 平台实现了谱线比值

法测频、信号转发和匹配滤波三个算法, 并对其实验结果进行了验证。利用该平台改变了以往水声信号处理采用嵌入式计算机上安装嵌入式操作系统移植应用程序的开发模式, 采用了实时性极高的嵌入式控制和采集平台 NI CompactRIO, 缩短了研制周期, 同时也提高了系统的性能、可靠性以及可扩展性等。

### 参 考 文 献

- [1] 聚星仪器. NI CompactRIO 平台配置指导及用户方案[Z]. 上海, 2009.  
VI Service Network. NI CompactRIO platform configuration instructions and user manual, Shanghai, 2009.
- [2] 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.
- [3] 潘立坤, 向大威. 谱线比值法测量接收信号的频率[J]. 声学技术, 2003, 22(3): 187-190.  
PAN Likun, XIANG Dawei. Measuring frequency of received signal by a spectrum line ratio method[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(3): 187-190.
- [4] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社. 2000.  
TIAN Tan, LIU Guozhi, SUN Dajun. Sonar technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 149-169, 2000.
- [5] Nadav Levanon and Eli Mozeson. Radar Signals[M]. John Wiley & Sons, Inc., 2004.