

# 基于虚拟仪器的水下目标回波信号发生器设计

谭 勇

(长江师范学院 电子信息工程学院, 重庆 408003)

**摘要:** 为克服采用传统嵌入式系统实现水下目标回波信号发生器存在的硬件设计调试难度大、灵活性差等不足, 基于 NI 虚拟仪器技术, 在 LabVIEW 开发环境中应用 G 语言设计了生成水下目标回波信号生成模块, 然后, 该模块输出信号通过配置了 PXI-8087 嵌入式控制器和 PXI-6070E 多功能数据采集卡的 PXI 1050 虚拟仪器平台进行硬件输出, 供水声设备测试时使用; 经实际使用表明, 该系统达到了设计要求并具有快速灵活的特点, 能够为今后类似系统的开发提供有益参考。

**关键词:** 水下目标回波; 信号发生器; 虚拟仪器

## Design of Underwater Target Echo—Signal Generator Using Virtual Instrument Platform

Tan Yong

(School of Electronic Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408003, China)

**Abstract:** In order to troubleshoot the defects with the implementation of underwater target echo—signal generator by using traditional embedded systems, the techniques of NI virtual instrument are explored for this purpose. Firstly, a software module that simulates underwater target echo—signals is developed in the IDE LabVIEW by utilizing G programming language. Then, the generated signals are practically output via the so called PXI—1050 hared platform, which consists of the PXI—8087 embedded controller and PXI—6070E multi—function DAQ card. The designed generator is advantageous in working speed and flexibility.

**Keywords:** underwater target echo—signal; signal generator; virtual instrument

### 0 引言

为了检测水下声信号处理系统功能和技术指标, 需要根据目标个数、信号形式、信噪比、时延、多普勒频移等参数产生包含目标反射波、海洋混响、环境噪声等成分的水下目标回波<sup>[1]</sup>。产生水下目标回波的信号发生器有 MCU、CPLD/FP-GA、DSP 等多种实现方案, 但这些方案存在硬件设计调试难度大、开发周期长、可靠性难以保证、灵活性差的缺点, 难以覆盖进行全面测试的需求。

虚拟仪器是当前应用在测试测量领域的热门技术。它通过在计算机上添加少量标准化硬件并运行相应测试测量软件就可实现传统仪器的功能<sup>[2-5]</sup>。虚拟仪器技术包括应用程序开发工具、标准化 I/O 硬件以及软硬件集成平台三大组成部分。高效的应用程序开发工具使得开发者可以快速创建具有友好的人机相互界面的测试测量应用程序。模块化 I/O 硬件能够适应日益复杂的测试测量应用, 支持开发者创建符合独特应用要求的自定义测量系统。软硬件集成平台使得开发者能够以统一的方式, 以更低的成本满足不同的测试测量需求。虚拟仪器具有性能高、扩展性强、开发时间少以及软硬件无缝集成的优势。

在众多虚拟仪器平台中, 美国 NI 公司的虚拟仪器平台以其完善的软硬件开发工具独树一帜。NI 创新性地运用了图像化编程和数据流的概念, 将硬件驱动、程序逻辑结构、数值与信号处理算法、通信协议等设计为图标式的功能节点, 通过对相应节点的简单调用即可快速实现应用功能。其高度易用性和强大功能已使其成为开发虚拟仪器应用的标准平台<sup>[6-7]</sup>。因此, 本文基于 NI 虚拟仪器平台的强大性能, 面向水声系统测试需求, 使用 LabVIEW 软件开发和相关硬件进行一种水下目标回波信号发生器的设计, 从而为该类测试仪器的设计实现提供一种新的参考。

### 1 系统结构及原理

系统基于 NI 的 PXI-1050 虚拟仪器平台实现。该平台硬件上为模块化结构, 具体包括高性能嵌入式控制器模块、多种信号采集模块以及信号调理模块。所有模块物理上集中在同一机箱, 并通过机箱背板上的 PXI 总线互联。这样, 嵌入式控制器模块可以灵活配置和控制其他模块, 从而能够适应广泛的应用需求。

基于 PXI-1050 虚拟仪器平台, 信号发生器系统整体结构如图 1 所示。

图 1 中, 系统使用 PXI-8187 高性能嵌入式控制器实现系统控制和提供人机交互界面。该控制器运行的是 Windows 操作系统以及系统主控程序 (包括回波信号生成程序模块和硬件驱动模块)。在 PXI-8187 控制下, 系统通过 PXI 总线控制

收稿日期: 2017-10-28; 修回日期: 2017-11-16。

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1601204); 重庆市涪陵区科技计划项目 (FLKJ 2014ABA2044)。

作者简介: 谭 勇 (1981-), 男, 四川仁寿人, 副教授, 主要从事虚拟仪器技术及应用方向的研究。

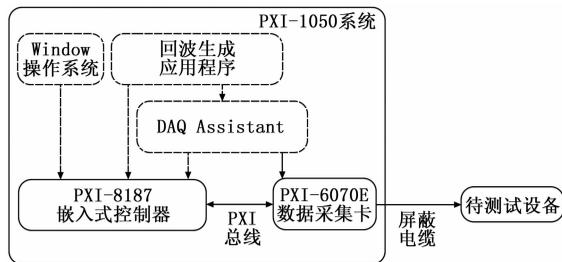


图 1 系统总体结构

PXI-6070E 多功能数据采集卡实现信号的高精度输出。对于 PXI-6070E 多功能数据采集卡，它同时具有模拟和数字触发功能、2 个 24 位 20 MHz 计数器/定时器、8 条数字 I/O 线和 2 路 12 位模拟输出。回波信号通过 PXI-6070E 的模拟输出口经屏蔽电缆输出给被测试设备。

系统中使用的 PXI 总线是基于 PCI 总线实现模块化仪器和 CPU 间数据传输的一种重要技术。它通过添加专用系统时钟，并结合触发总线、星形触发总线、局部总线等结构达到高精度定时、同步和数据通信要求。其中参考时钟用作同一测控系统中的多卡同步信号；触发总线用于同步不同 PXI 模块上的同一种操作，或者控制同一系统中其它模块上一系列动作的时间顺序；星形触发总线可使得从星形触发控制模块发出的触发信号能够同时同步而且迅速的到达其它的模块，保证了系统中每个模块间的精确触发关系；局部总线可用于在模块之间传递信号，也可以进行高速边带通讯而不影响 PCI 总线的带宽。整体上，PXI 的核心内部总线带宽可达到 132 MB/s。使用 PXI 总线，可以针对不同测量信号类型灵活选用不同硬件模块，极大便利多信号数据采集系统的构建<sup>[8]</sup>。

在软件方面，NI 以 DAQ VI 的形式提供了丰富易用的硬件驱动程序，而且仅需要通过 DAQ VI 创建数据采集任务后就可以灵活配置数据采集硬件的工作模式并进行过程控制，特别是在 DAQmx 新一代驱动程序推出后，数据的输入和输出过程被进一步简化，通过 DAQmx 提供的 DAQ Assistant 图形接口即可以快速设置测试任务、通道与标度并高效完成实际信号输入与输出工作。所以 DAQ Assistant 组件可以极大便利系统软件的编写。在提供包括 DAQ 驱动程序在内的各种硬件驱动、API 接口以及配置工具基础上，NI 提供了包括 ComponentWorks、LabVIEW、LabWindows/CVI 在内的多样化的应用软件编程方式和相应开发环境<sup>[6-7]</sup>，其中，ComponentWorks 提供了以标准 OLE 控件和 DLLs 提供的高性能编程接口；LabVIEW 提供了友好的图形化用户界面和强大的图形语言编程环境；LabWindows/CVI 则实现了文本化编程的类 LabVIEW 编程环境。

图 2 显示了使用 LabVIEW 编写的系统主控程序 VI。该 VI 程序为一循环结构。该循环结构内部包括 2 个子 vi。其中 Echo. vi 实现各种水下信号数据的生成，是整个信号发生器系统的核心程序。与该 VI 连接的 DAQ Assistant 将则将信号数据送往 PXI-6070E 数据采集卡的模拟输出口实现测试信号输出。在信号输出过程中，它通过检测数据采集卡工作是否超时确定数模转换过程是否正常运行。若发现超时则进行错误处理，避免系统异常挂起。

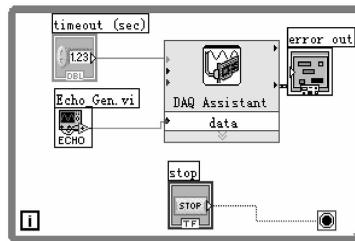


图 2 系统主控程序 vi

## 2 信号产生原理

水下目标回波信号发生器必须能够生成水下信号处理所需要的各种脉冲信号，如单频脉冲、线性调频信号、双曲调频信号、编码波形以及其他设定波形，此外还应产生诸如环境与目标辐射噪声、不同水域的混响的能力，从而其输出信号能够较好模拟水下基阵的输出<sup>[1,9]</sup>。

### 2.1 单频脉冲信号

单频脉冲信号的复数形式是：

$$u_c(t) = A(t)e^{j2\pi f_0 t} \quad (1)$$

当  $A(t) = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)$  时信号为矩形包络，当  $A(t) = \text{gauss}\left(\frac{t}{\tau}\right)$  时信号为高斯包络，其中  $f_0$  为载波频率， $\tau$  为脉冲宽度，其中：

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & |t| \leq 1/2 \\ 0 & |t| > 1/2 \end{cases}, \quad \text{gauss}(t) = e^{-\pi^2 t^2}$$

### 2.2 线性调频信号

线性调频矩形脉冲信号和高斯脉冲信号的复数形式分别是：

$$u_c(t) = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi(f_0 t + \frac{1}{2} M t^2)} \quad (2)$$

$$u_c(t) = \text{gauss}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi(f_0 t + \frac{1}{2} M t^2)} \quad (3)$$

其中： $M$  是线性调频指数且  $M = B/\tau$ ， $B$  为调频带宽，其瞬时频率随时间成线性变化，即：

$$f_i = f_0 + Mt$$

### 2.3 双曲调频信号

双曲调频信号按如下双曲函数规律调频，即：

$$f_i = \frac{K}{t_0 - t} \quad |t| \leq \tau/2$$

矩形包络与高斯包络双曲调频信号复数形式分别为：

$$u_c(t) = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j[2\pi K \ln(1 - \frac{t}{t_0})]} \quad (4)$$

$$u_c(t) = \text{gauss}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j[2\pi K \ln(1 - \frac{t}{t_0})]} \quad (5)$$

其中： $t_0 = \frac{f_0 T}{B}$ ， $K = \frac{\tau f_i \left(-\frac{\tau}{2}\right) f_i \left(\frac{\tau}{2}\right)}{B}$ ， $f_0$  为信号的算术中心频率。

双曲调频信号具有很好的多普勒宽容性，因此检测目标信号所需的硬件复杂度会大大降低，例如当目标的多普勒频移小于窄带多普勒容限时用一个窄带匹配滤波器就可检测到目标信号，但超过了窄带多普勒频移但仍小于宽带多普勒容限时就需

要多个匹配滤波器才能检测到目标信号。

### 2.4 海洋混响信号

混响是一种伴随着发射信号而产生的特殊形式的干扰。根据混响场特性不同，海洋混响可划分为体积混响、海面混响和海底混响三类。其中体积混响是海水中流砂粒子、海洋生物等对声波散射所形成的混响。海面混响是海面的不平整性和波浪形成的气泡层对声波散射所形成的混响。海底混响则是海底及其附近散射体形成的混响。总体上，海洋混响实质上是一种非平稳的随机过程，由于形成原因的复杂性，对海洋混响的仿真十分复杂。

经过大量研究，人们发现海洋混响的强度与发射信号的能量成正比关系，谱结构和发射信号具有一定相似性，而且混响的瞬时值呈高斯分布，包络则呈瑞利分布。根据海洋混响的统计特性，海洋混响在一定程度上可简化为一个平稳高斯随机时变过程，这样就可以用图 3 模型对海洋混响进行模拟。

图 3 中模型采用高斯白噪声作为激励。白噪声具有频带宽，能量分布均匀的特征。由于实际环境中的噪声基本上都可归为白噪声，再结合混响的统计特性，所以这里采用高斯白噪声是合理的。在该模型中，高斯白噪声在通过带通滤波器后即成为有色噪声，最后与混响衰减曲线相乘即可得到最终混响信号。

考虑到混响与发射信号的相关性，以及它自身的频率和时变特性，必须要对其生成的噪声按各路混响相关性的要求进行处理，然后再按照发射信号对混响的具体要求进行滤波、放大等处理，以实现发射信号与混响信号的相关性。

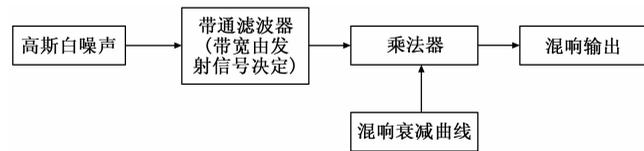


图 3 简化的海洋混响模型

## 3 LabVIEW 实现及结果分析

在 NI 提供的多种应用程序开发工具中，LabVIEW 为开发者特别是不熟悉文本编程语言的开发者提供了图形化的编程语言（称为 G 语言）和大量功能节点。图像化编程语言不同于 C、Pascal 或 Matlab 等文本编程语言，它是通过使用功能节点（Node）和数据连线结合图像化的程序流程控制结构实现程序功能。由于为用户屏蔽了大量编程细节，所以能够显著降低应用程序的编写难度，而提供的各种功能节点则帮助开发者显著提高应用程序开发效率。

LabVIEW 内置了丰富的数学和信号处理节点。利用这些节点，可以快速实现信号生成、频率分析、概率、统计、数学运算、曲线拟合、插值、数字信号处理等各种数据分析应用，此外 LabVIEW 还提供了软件声音与振动、机器视觉、RF/通信测量、瞬态/短时持续信号分析等附加工具，加速。这里，基于上节所述信号原理，利用 LabVIEW 内置的数学和

信号处理节点/附件工具实现各中水下回波信号的生成。

### 3.1 脉冲信号的生成

令采样频率 = 200 kHz，单频脉冲信号频率 = 25 kHz，线性调频和双曲调频信号的起始频率 = 18 kHz，截止频率 = 32 kHz，信号脉冲宽度  $s$ 。结合前述脉冲信号原理，通过调用相应数值计算  $v_i$  实现的高斯包络脉冲信号（长度为 1 024 点）

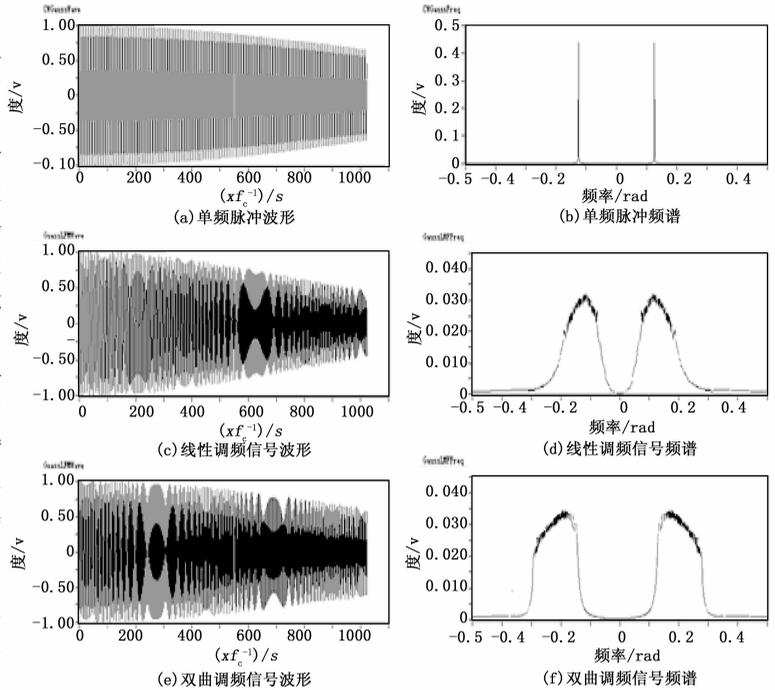


图 4 基本测试信号输出波形及其频谱

及相应频谱如图 4 所示。

### 3.2 海洋混响信号的生成

LabVIEW 提供了 Uniform White Noise.vi、Gaussian White Noise.vi、Gamma Noise.vi、Bernnoulli Noise.vi 等节点实现各类噪声信号的生成。结合图 4 所示原理，这里采用 Gaussian White Noise.vi。它能够产生均值为 0 方差为特定值的高斯白噪声信号。

在滤波器方面上，LabVIEW 的滤波器函数包括 Express VI 的滤波器 VI、波形调理 VI 的滤波器 VI 和函数选板中的滤波器 VI 三个部分。无论是 IIR 滤波器还是 FIR 滤波器都可实现，可传递的信号数据类型也包括波形信号和数组信号两种，可供用户灵活调用。在提供的滤波器类型方面，除常规的巴特沃斯、切比雪夫、椭圆、贝塞尔等类型的等波纹的低通、带通、带阻、高通滤波器 Vi 外，LabVIEW 还提供高级 FIR、高级 IIR 滤波器程序包，通过设置图标的采样频率、滤波器阶数等参数可以实现所需滤波特性的数字滤波器<sup>[6-7]</sup>。这里选择使用 Equi-Ripple BandPass.vi。该 VI 通过 Parks-McClellan 算法和高通带截止频率、低通带截止频率、抽头数、低阻带截止频率、高阻带截止频率、采样频率，生成具有等波纹特性的带通 FIR 滤波器，从而达到在整个频域获得良好均一性的目的。该带通 FIR 滤波器的低通带频率和高通带频率分别设置为 0.09 和 0.16（按归一化）。在其过渡带设计上，图 5 给出了阶数分别为 8，16，38，64 时的滤波器特性。对比可见，滤波器阶数越大，过渡带宽就

越窄, 滤波性能越好, 但相应等会造成计算量显著增加的问题。所以, 为平衡滤波性能和计算开销, 确定抽头数为 38, 此时可以同时获得较好的过渡带宽和较小的纹波水平。

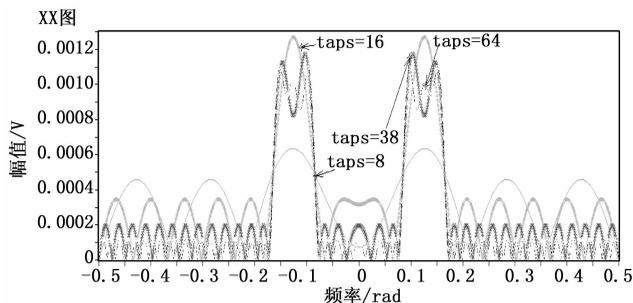


图 5 滤波器阶数与滤波器特性

对于海洋混响的生成, 混响衰减曲线的选择是另一个关键点, 本文根据不同的混响类型选择经典的衰减曲线。体积混响、海面混响、海底混响的衰减曲线分别为:

$$y(t) = \frac{10^{-0.7t}}{t}; y(t) = \frac{10^{-1.4t}}{t^{1.5}}; y(t) = \frac{10^{-0.8t}}{t^2}$$

图 6 是应用 G 语言编程得到的体积混响程序框图, 图 7 是相应的体积混响效果图 (波形数据长度为 1 024 点)。可见对体积混响的模拟是较好的。

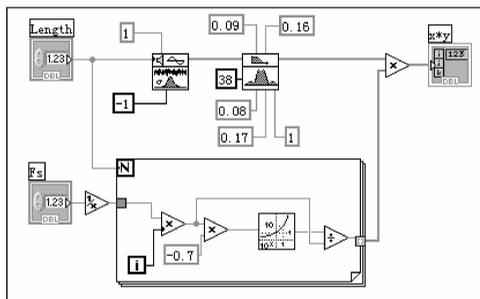


图 6 体积混响曲线的 G 语言实现

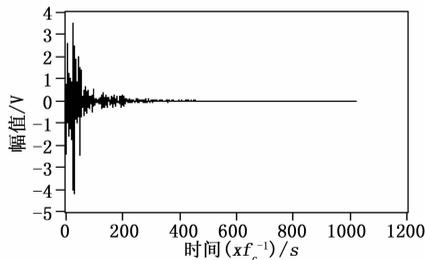


图 7 体积混响衰减特性曲线

### 3.3 目标回波的模拟

水下目标存在距离、方位和速度特征, 距离参数可以通过回波时延反映; 对接收阵而言, 目标回波在各阵元间的时延差则反映了目标方位信息; 当目标移动时候产生的回波多普勒频移反映了目标的移动信息, 综上, 目标回波是经过时延、多普勒频移的发射信号、再叠加混响、环境噪声后的信号, 图 8 是高斯包络双曲调频信号为发射信号时得到的回波波形。

通过合理调用 LabVIEW 提供的数学与信号处理组件, 按照相关数学模型采用图像化编程, 能够获得相应数学特征的信

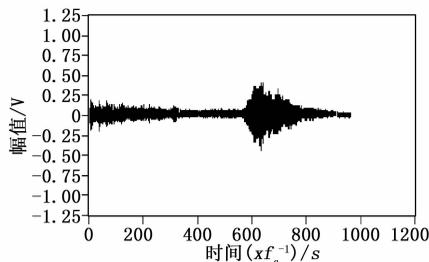


图 8 高斯包络双曲调频信号的回波波形

号。随后, 生成的各信号均通过 DAQ Assistant VI 进行硬件输出。该 VI 的使用步骤如下: 1) 将 DAQ 助手置于程序框图中。即在程序框图上右击并选择 Express>>Output>>DAQ Assistant, 然后鼠标左击即可将 DAQ 助手置于程序框图上; 2) 配置 DAQ 助手的输入或输出类型。即选择 Generate Signals>>Analog Output>>Voltage, 选择 PXI-6070E 设备并选择数据通道; 3) 配置生成任务。将 Generation Mode 选择为 Continuous Samples, 对 Samples to Write 输入 128, 确认 Use Waveform Timing 以及自动建立 While 循环等配置选项; 4) 将所生成的信号接入 DAQ Assistant VI 左侧的信号输入端。最终, 生成的信号通过 PXI-6070E 多功能数据采集卡的预设数据通道进行实际输出。

### 4 结束语

本文设计了一种基于虚拟仪器方案的水下目标回波信号发生器。在 NI PXI-1050 虚拟仪器平台上, 利用其强大的信息处理与数据吞吐能力获得了快速、稳定、可靠的系统性能。利用 NI 虚拟仪器技术统一灵活的硬件结构和 LabVIEW 快速便捷的图形化编程方法进行系统实现对于与构建以 MCU、CPLD/FPGA、DSP 等处理器为核心的嵌入式系统的实现方案具有更好的灵活性、扩展性和时间成本优势。因此, 本系统设计方案具有较强的工程和实用意义, 为今后类似系统的开发提供了一定参考。

### 参考文献:

[1] Etter P C. 水声建模与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
 [2] 李丹丹. 基于 LabVIEW 的加气站监控系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.  
 [3] 杨文裕. 基于 LabVIEW 的手机硬件测试工具的设计与实现 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.  
 [4] 李 斌, 赵 珩. 基于 LabVIEW 的应答式水声定位系统目标模拟器 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32 (10): 90-91, 112.  
 [5] 张志敏, 路敦民, 张厚江, 等. 基于 LabVIEW 及 PLC 电机运动控制系统的设计 [J]. 测控技术, 2016, 35 (1): 56-60.  
 [6] 特拉维斯 J, 克林 J. LabVIEW 大学实用教程 (第三版) [M]. 乔瑞萍等译. 北京: 电子工业出版社, 2016.  
 [7] 周 鹏, 等. 精通 LabVIEW 信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
 [8] 谭 勇, 朱 斌. 应用 NI 虚拟仪器平台快速实现信号采集与分析 [J]. 绵阳师范学院学报, 2008, 27 (2): 94-96.  
 [9] 赵航芳, 祝 献, 宫先仪. 混响背景下的信号检测 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25 (1): 34-37.