

Study and Implement of Broadband Echo Simulation

HUANG Xiong-fei, YUAN Bing-cheng, CHEN Xi

Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, China
xiongfeifang@sohu.com

Abstract: Broadband signal has been adopted in the Sonar and torpedo homing, and it has obvious advantage compared to narrowband signal, but how to simulating the velocity of the backscattering signal and ensuring precision need more study. The characters of slow fluctuating point target are studied, and the relation of velocity and pulse width is analyzed. The simulating method of broadband target echo is discussed, then precision and how to choose the parameters is studied. A PXI module applying to semi-physical simulation is designed and simulating precision is analyzed and measured. The results prove that the precision of velocity satisfies semi-physical simulating requirement of many underwater acoustic equipment.

Keywords: acoustic; broadband; simulation; PXI module

一种宽带目标回波仿真方法研究及其实现

黄雄飞, 苑秉成, 陈喜

海军工程大学 兵器工程系, 武汉, 中国, 430033
xiongfeifang@sohu.com

【摘要】 宽带信号已广泛应用于各种鱼雷自导和声纳设备, 并且相对于窄带信号具有明显的优势, 但是对于如何仿真宽带回波并保证速度信息的准确性则需要进一步研究。首先研究了宽带慢起伏点目标的特性, 分析了目标速度与回波脉冲宽度的关系, 研究了宽带目标回波仿真的方法并分析了精度和参数选取方法, 然后设计了用于半实物仿真的 PXI 模块, 最后对速度仿真精度进行了测量, 结果表明, 仿真精度完全能够满足多种水声设备的陆上半实物仿真的需要。

【关键词】 声学; 宽带; 仿真; PXI 模块

1 引言

宽带信号与窄带信号相比具有明显的优势, 宽频带信号的目标回波携带的目标信息量大, 混响背景相关性弱, 有利于目标检测、参量估计和目标特征提取, 因此采用宽频带信号成为一种必然趋势。新型鱼雷自导系统、声纳系统, 为了实现目标的精确测距、测速以及目标识别均已广泛应用宽带信号, 宽频带目标回波的建模与仿真已经有很多学者做了大量的工作[1][2][3], 但是主要工作围绕着体目标的建模与仿真、混响的建模与仿真, 但是对于宽带回波信号的速度信息的建模、仿真和实现方法较少, 由于目标的速度信息对于水声系统越来越重要, 如多普勒声纳、声相关计程仪等利用回波精确测速, 因此在陆上条件下如何产生高精度的宽带回波信号的速度信息就需要进一步研究。由于体目标等复杂目标的回波可以分解为多个点目标回波的线性叠加, 因此, 如何实现对点目标回波包括速度在内的多种信息的仿真则是问题的关键。

2 宽带信号回波模型

设声纳系统发射信号是 $f(t)$, 其解析信号表示为 $\tilde{f}(t)$, 目标为一慢起伏点目标[4], 则通过目标反射后的回波可以表示为

$$\tilde{s}(t) = \tilde{b}(\xi) \tilde{f}(k(t - \frac{2\xi}{c})) \quad (1)$$

上式中 ξ 表示目标与换能器的距离, 其中 k 称时间尺度压缩因子, $\tilde{b}(\xi)$ 为衰减因子。上式表明, 在回波信号中, 不仅存在时延, 信号在时间尺度上还受到压缩或拉伸, 其中的尺度因子是: $k = \frac{c-v}{c+v}$, c 为水中声速, v 是散射体相对发射换能器运动的速度, 以目标远离换能器为正。如果 $|v/c| \ll 1$, 并且信号为窄带信号, 其载频为 f_0 , 则回波可以表示为

$$\tilde{s}(t) = \tilde{b}(\xi) \tilde{f}(t - \frac{2\xi}{c}) e^{j2\pi f_d (t - \frac{2\xi}{c})} \quad (2)$$

上式中 $f_d = 2 \times f_0 \times v/c$, 因此对于窄带信号而言, 目标速度对应着回波的多普勒频移, 而对于宽带信号,

如调频信号等，式 (2) 则不成立，目标速度仅对应回波的压缩或拉伸，因此只能根据 (1) 式来分析目标的速度信息。

当发射的信号为脉冲信号时即 $t \in [0, T_s]$ ，那么点目标回波的持续时间也会改变，回波持续时间 T_0 为

$$T_0 = T_s \left(\frac{c-v}{c+v} \right) \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出，脉冲信号的回波的压缩或拉伸与目标速度一一对应。

3 宽带回波仿真方法

常用的回波仿真方法是预先已知发射信号体制和相关参数，或者通过测量得到相关信息，然后用数字方法产生模拟回波的数字信号，并通过 D/A 电路输出模拟回波波形。而很多情况下都是未知信号参数，而测量信号则精度不能保证，且带来系统的复杂性，并且精度受到频率源精度的影响，因此这种方法具有一定的局限性，因此本文采用实采实发的方法，即当判断信号到来时，A/D 系统开始采集，和存储，经过一定延时后以不同于采样率的频率回发信号，设对信号的采样频率为 f_s ，则对应长度为 T_s 的发射脉冲的采样点数为

$$N = T_s f_s \quad (4)$$

由于对应速度为 v 的点目标回波的宽度为 T_0 ，因此对应的回放频率应满足如下条件：

$$N = T_0 f_h \quad (5)$$

由式 (3)、(4)、(5) 可得到仿真回波的速度值与采样率、回放率的关系为

$$f_h = \frac{c+v}{c-v} f_s \quad (6)$$

由式 (6) 可以看出，要对回波信号中产生一定的速度信息，则仅须控制采样频率和回放频率即可实现任意速度信息的产生，下面分析采用这种方法能达到的精度，一般情况下， $c \gg v$ ，式 (6) 可化为

$$v = \frac{f_h - f_s}{f_s} \times c \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出，固定采样频率，则回放频率与速度一一对应，同时由式 (7) 得到的回波速度误差的主要因素为采样频率和回放频率的误差，设实际的采样频率为 $f'_s = f_s + \Delta f_s$ ，实际的回放频率为 $f'_h = f_h + \Delta f_h$ ，则可以得到对应的速度误差为

$$\Delta v = \left(\frac{f_h - f'_s}{f_s} - \frac{f_h + \Delta f_h - f'_s - \Delta f_s}{f_s + \Delta f_s} \right) \times c \quad (8)$$

在实际应用中，采样频率和回放频率由同一个信号源经过 DDS (直接数字频率合成器) 得到，因此 $\Delta f_s \approx \Delta f_h$ ，因此式 (8) 可以简化为

$$\Delta v = \left(\frac{1}{f_s} - \frac{1}{f_s + \Delta f_s} \right) \times (f_h - f_s) \times c \quad (9)$$

综合式 (7) 和式 (9) 可以得到下式

$$\Delta v = \left(1 - \frac{f_s}{f_s + \Delta f_s} \right) v \quad (10)$$

因此由式 (10) 可以看出速度误差随着采样率的提高而减小，假设要求速度误差 $\Delta v < 1\text{mm/s}$ ，目标速度 $v < 20\text{m/s}$ ，并且 $\Delta f_s \leq 50\text{Hz}$ ，则由式 (10) 可以得到最小的采样频率为 1MHz 。

距离和回波强度则通过延时和衰减来控制。距离信息对应回波的延时时间，由式 (1) 可以得到延时时间 τ 为

$$\tau = \frac{2\xi}{c} \quad (11)$$

回波强度可以通过声纳方程得到，通过对回波的衰减控制回波的强度。

4 基于 PXI 总线的宽带回波的实现

PXI 总线^{[5][6]}技术已经发展成为适合于试验、测量与数据采集应用的新一代模块化机械、电气和软件规范^[1]。根据上节的原理设计了基于 PXI 总线的宽带点目标回波仿真模块，原理框图如图 1 所示，模块由接口电路、控制逻辑、DDS 组件、调理电路、触发电路、采集电路、存储和回放电路组成，接口电路主要实现总线数据到模块本地数据的转换。控制逻辑采用 CPLD 实现。触发电路通过电平判断声纳设备是否发射信号，当接收的信号超过一定值时产生触发信号，则开始采集。调理电路将输入信号转换到采集电路需要的电平范围。采集电路采集接收到的脉冲信号，并将其存入存储器，为了简化存取操作，并保证足够高的速率，存储器采用 FIFO (先进先出存储器)。经过一定延时后，回放电路将存储器中保存的数字信号按照一定的速率转换成模拟信号，由于回放速率与采样率不同，此时输出的模拟信号虽然形式与发射信号相同，但脉冲长度不同，并且满足 (6) 式，将此信号经过衰减后输出即可实现对点目标回波的仿真。

为了精确控制采样频率和回放频率，保证速度的准确以及对任意速度的仿真，当采样率固定时，就要求回放频率可以任意改变，基于以上考虑，采样频率和回放频率均由 DDS (直接数字频率合成器) 器件产生。

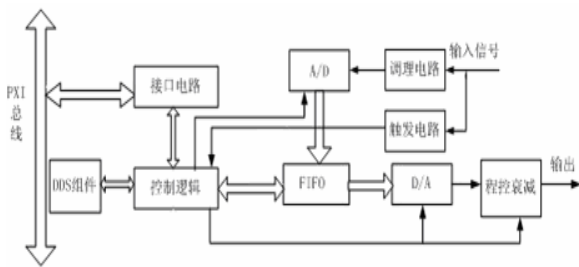


图 1. 基于 PXI 总线的仿真模块硬件框图

启动 PXI 模块时，首先根据要求初始化系统的各控制信号，其中包括：程控衰减控制字、DDS 频率控制字以及 CPLD 内的采样时间和时延计数控制字。

DDS 组件输出设定的频率并输出到 CPLD 内。

输入信号到达模块接口后，在板内分为两路，一路产生触发信号，另一路进行分压或放大。电平触发电路使用比较器比较输入信号与触发电平，当输入信号大于触发电平，产生触发信号送入 CPLD 内，启动采样计数器和延时计数器，另一路信号在经过分压和程控放大器放大后，进入 A/D 转换器件进行 AD 转换。采样时间由采样时间计数器决定，转换后的数字信号存入存储器 FIFO 中。经过一定延时（与距离相对应）后，将存储器中的数据经过 DA 转换成模拟信号，在采样计数器计数的过程中，CPLD 输出 A/D 时钟、将数

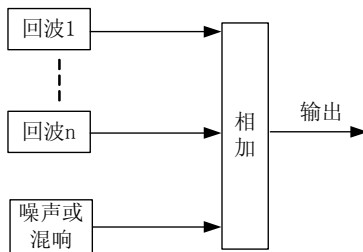


图 2. 复杂目标仿真框图

据存入 FIFO 中需要的写时钟和传输时钟。计数完毕，停止采样和存储数据的时钟输出。等待延时计数器计数完毕，开始输出 D/A 时钟、读 FIFO 的时钟和传输时钟，直到 FIFO 数据读空并等待下一个脉冲的到来，重复以上过程，具体电路在此不作介绍。

以上是单个点目标回波的仿真，当需要对复杂目标如体目标、多亮点目标或多目标进行仿真时，只需要将多个点目标回波以及混响或噪声进行线性叠加，原理框图如图 2 所示。

5 精度分析与试验验证

回波的仿真包括距离、强度和速度的仿真，距离精度由回波延时的精度确定，延时计数器计数时钟周

期为 10us，通过逻辑控制器件 CPLD 实现，因此对应距离精度为 7.5mm，显然已经满足距离仿真的需要。而幅度控制采用程控衰减器件，衰减范围为 80dB，衰减步长 0.375dB，也满足实际的仿真需要。

对于速度仿真的精度，不同的应用有着不同的要求，如一般的探测声纳或鱼雷自导，对速度的仿真精度要求不是太高，而另外一些设备对速度精度的要求很高，如多普勒声纳等，宽带回波的速度信息对应着回波的压缩或拉伸，而脉冲宽度很难用仪器精确的测量，因此必须用其他方法进行测量。由于窄带单频脉冲信号的压缩或拉伸与频移一一对应，且频率相对于脉冲宽度易于测量，因此检验系统对速度仿真的精确度采用单频脉冲信号来检验。对应单频信号，其中频移与采样频率、回放频率的关系如下：

$$f_d = f_0 \frac{f_h - f_s}{f_s} \tag{12}$$

其中 f_d 为频移量， f_0 为信号的频率， f_h 为回放频率， f_s 为采样频率。实际系统采样率为 10MHz，输入信号频率为 300KHz 频率采用 Agilent33220A 频率计测量，由于信号源输出频率存在误差，采用频率计实际测量频率为 299998.402Hz，表 1 为设定不同频移值时输出频率的理论值、实测值和误差值，单位为 Hz，从表中可以看出，频率误差可以控制在 0.1Hz 范围内，而一般的信号源则很难达到这种精度，0.1Hz 的频移对应的速度为 0.25mm/s，因此采用本文方法设计的仿真系统精度高，并且完全能够满足各种实际需要。

表 1. 精度测量数据

| 设定值 | 理论值 | 实测值 | 误差值 |
|-------|------------|------------|-------|
| 10 | 300008.402 | 300008.391 | 0.011 |
| 100 | 300098.402 | 300098.367 | 0.035 |
| 1000 | 300998.402 | 300998.354 | 0.048 |
| -10 | 299988.402 | 299988.388 | 0.014 |
| -100 | 299898.402 | 299898.372 | 0.03 |
| -1000 | 298998.402 | 298998.361 | 0.041 |

6 结束语

本文所研究的宽带信号仿真方法具有通用性，适合各种窄带和宽带水声设备的陆上半实物仿真，同时有较高的速度、距离仿真精度，适合对速度仿真要求较高的场合，同时可以根据图 2 的原理设计成对多目标或亮点目标的仿真。设计的基于 PXI 的高速信号采集和回放模块为一即插即用模块，经试验验证，已达

到预定的指标，并已成功应用于多普勒声纳的测试，由于模块为通用的采集和回放模块，可广泛应用于声纳设备和其他设备的检测，有较大的实用价值。

References (参考文献)

- [1] DING Yong-Quan, YI Hong. Modeling and Simulation for Target Echo of Broadband Acoustic Signal [J] *Torpedo technology*, 2006, 14 (2), P38-40.
丁永泉, 易红. 宽频带水声信号目标回波建模与仿真研究[J] *鱼雷技术*, 2006,14(2),P38-40.
- [2] WANG Xin-Xiao, HUANG Jian-Guo. Simulation Research on Target Echo in Underwater Acoustic Detection System [J] *Piezo Electrics & acoustooptics*, 2006, 28 (3), P370-372.
王新晓, 黄建国, 张永峰. 水声探测系统目标回波信号仿真技术研究[J] *压电与声光*, 2006,28(3), P370-372.
- [3] CUI Huai-lin², YANG Yun-chuan³, LI Zhi-shun. Research on Spatial Bearing Characteristics Simulation Method of Underwater Target Echo Based on Circular Arc Array [J] *Journal of System Simulation*, 2006 (6) , P1692-1695.
崔怀林, 杨云川, 李志舜. 水下体目标回波空间方位特性仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2006,18(6), P1692-1695.
- [4] JIANG Xin-Zhou, CHEN Xi, JIANG Tao. Design Principles of Torpedo Guidance [M]. *Naval University of Engineering*, 2001, P70-71.
蒋兴舟, 陈喜, 蒋涛. 鱼雷制导设计原理[M]. 武汉: 海军工程大学, 2001, P70-71.
- [5] National instruments. The PXI System Architecture [J] *Measure-Control Technology*, 1999, 18 (3), P58-60.
National instruments 上海分公司. PXI 总线体系结构[J] *测控技术*, 1999, 18 (3) , 58-60.
- [6] QIAN Guo-Ping, MA Huai-Jian. Design of Data Acquisition Module Based on PXI Bus [J] *Journal of Harbin Univ. Sci. & Tech.*, 2003, 8 (6), P61-64.
钱国平, 马怀俭. 基于 PXI 总线的数据采集模块设计[J] *哈尔滨理工大学学报*, 2003,8(6),P61-64.