

基于 CVI+FPGA 的声纳目标回波模拟器研制

赵红军, 杨日杰

(海军航空工程学院信息融合研究所, 烟台 264001)

摘要:在对声纳目标回波模拟器的数学模型、目标回波模型和混响模型研究的基础上, 研制了一种基于 CVI+FPGA 的声纳目标回波模拟器, 该模拟器能够产生主/被动声纳测试、定检所需的主/被动声纳回波信号。目标回波信号包括主动声纳、目标发射噪声、海杂波等信号, 并以声信号的形式输出。通过性能测试及与实际声纳系统联试, 证明该模拟器达到了设计功能和性能指标要求, 介绍了声纳目标回波模拟器的数学模型、系统硬件和软件的实现方法。

关键词: 声纳; 模拟器; 目标回波; 数学模型; CVI; FPGA

Design of Sonar Target Echo Simulator Based on CVI+FPGA

ZHAO Hongjun, YANG Rijie

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001)

【Abstract】A simulator of sonar target echo has been designed on the base of its mathematical model, target echo model and reverberation model. It can generate active or passive sonar echo signal including passive or active sonar signal, target radiated noise, sea clutter and reverberation signal for passive or active sonar test and inspection. Output form of the sonar target echo simulator is acoustic signal. It has been proved that the simulator meets the standard of the design function and performance by way of performance test and test with practical sonar system. The paper introduces the mathematical model of sonar target echo simulator, and it emphasizes the way to achieve the simulator system's hardware and software.

【Key words】 sonar; simulator; target echo; mathematical model; CVI; FPGA

声纳系统在军事上有着广泛的应用, 如水下目标的探测、定位及跟踪, 水下武器的射击指挥, 水下通信, 水雷探测, 水下导航, 目标识别, 水下武器制导、侦察与干扰等。然而声纳系统在投入使用之前的研制、验收阶段, 都必须在实验室、消声水池或者湖泊、海洋上完成一系列的功能调试和参数测定工作。在声纳系统使用期内, 也需要定期对系统进行维护和保养, 都需要水下目标作为声信号反射体, 如用潜艇则势必造成巨大的人力物力浪费。本文根据实际需要, 研制了一种符合实际需要的声纳目标回波模拟器。下面就其数学模型、系统硬件和软件设计进行简要介绍。

1 数学模型

1.1 海洋环境噪声模型^[6,8]

海洋环境噪声也称自然噪声, 是除去海洋中那些单个可识别的噪声源后剩下的噪声背景, 它是水声信道中的一种背景干扰场。无论是对被动声纳还是主动声纳, 海洋环境噪声都是其不可避免的干扰。海洋环境噪声是一种随机、非平稳过程^[2], 研究和描述普遍形式的非平稳过程是非常复杂的任务, 而且并非总是可以解决的。研究像海洋噪声这类非平稳过程时, 通常是在噪声的一定实现期间内, 在一定的近似下, 把所研究的过程看作是平稳的。然后根据准平稳分段对过程进行研究, 找出与非平稳性质的物理联系, 便可足够详细地描述所研究的对象。同时, 把噪声过程看作是各态历经的, 这样, 在求解噪声过程的各个阶统计量时, 可用时间平均代替系统^[9]平均。由于声纳目标回波模拟器模拟的不是海洋环境, 而是为了测试声纳系统的性能, 因此, 为了简便, 假设噪声是统计独立、均匀分布的, 其产生过程如下:

设 $x(1)$ 、 $x(2)$ 、...、 $x(k)$ 是相互独立的, 在 $(-1/2, 1/2)$

内均匀分布的随机数, 第 $k+1$ 个随机数由 $x(1)$ 和 $x(k)$ 按模 1/2 相加得到, 即

$$x(k+1) = x(1) + x(k) \pmod{1/2} \\ = \begin{cases} x(1) + x(k) & -1/2 \leq x(1) + x(k) \leq 1/2 \\ x(1) + x(k) - 1 & x(1) + x(k) \geq 1/2 \\ x(1) + x(k) + 1 & x(1) + x(k) \leq -1/2 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知, $x(k+1)$ 仍是 $(-1/2, 1/2)$ 内的随机数, 在下次计算时, 将 $x(k+1)$ 移到 $x(k)$ 的位置, 将 $x(k)$ 移到 $x(k+1)$ 的位置, 依次循环, 可产生噪声序列 $\{x_n\}$ 。根据均匀分布噪声的性质, 随机数序列的奇数序列 $\{x_m^{(1)} = x(2m-1) + 1/2\}$ 和偶数序列 $\{x_m^{(2)} = x(2m) + 1/2\}$ 为两个相互独立、均匀分布于 $(0, 1)$ 之间的序列, 将 $x_m^{(1)}$ 和 $x_m^{(2)}$ 进行变换, 可得

$$\begin{cases} y_m^{(1)} = \sqrt{-\ln x_m^{(1)}} \cos 2\pi x_m^{(2)} \\ y_m^{(2)} = \sqrt{-\ln x_m^{(2)}} \cos 2\pi x_m^{(1)} \end{cases} \quad (2)$$

则 $\{y_m^{(1)}\}$ 、 $\{y_m^{(2)}\}$ 为相互独立, 服从 $N(0,1)$ 高斯分布的噪声序列。

1.2 目标回波电信号模型

对单频 CW 发射信号^[1]而言, 发射信号为 $S(t) = A \cos(2\pi f_0 t)$, 其中 A 为发射信号幅度, f_0 为发射信号频率; 发射信号加目标强度经设定距离的传播损失后, 目标信号的幅度为 A' , 则回波信号为

$$S'(t) = A' \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (3)$$

其中, φ 为相移, 由目标与声纳的相对距离决定; A' 由目标

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572161)

作者简介: 赵红军(1979-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 基于启发式算法的优化算法技术; 杨日杰, 教授、博士生导师

收稿日期: 2006-07-31 **E-mail:** zhj991342008@126.com

强度、环境噪声、传播损失等决定。

1.3 混响模型^[4]

混响就是存在于海洋中的大量不规则散射体对入射声信号产生的散射波信号在接收点迭加而形成的。本模型的建立取自文献[5],设在某一浅海海域,海面相对平静、海底倾斜、海水介质均匀且有负声速梯度;考虑发射换能器(声源)与接收水听器收发合置的情况。假设海底倾斜角为 β ,负声速梯度 α ,海面反射系数 m ,海底散射模型 $\sigma \sin \alpha_1 \sin^2 \alpha_2$ (其中, σ 为海底垂直散射系数、 α_1 为声线海底入射掠射角、 α_2 为声线海底散射掠射角、 n 为海底散射方向性指数),由文献[5],只考虑4类对混响起主要贡献的声线,模型与声线如图1所示。

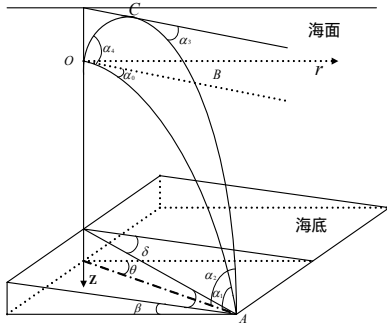


图1 收发合置混响模型与声线

(1)声源-海底-水听器

据参考文献知,接收点的混响强度 I_1 为

$$I_1 = \int \frac{I_0 \cos \alpha_0}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha_0} \right) \sin \alpha_1} \cdot \psi_s \cdot \frac{\cos \alpha_1}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha_1} \right) \sin \alpha_0} dS_1 \quad (5)$$

其中,

$$\psi_s = \sigma \cdot \sin(\alpha_1 - \gamma) \cdot \sin^n[\pi - (\alpha_1 - \gamma)]$$

$$dS_1 = \frac{c \cdot \tau / 2}{\cos(\alpha_1 - \gamma)} \cdot \frac{\gamma}{\cos \gamma} d\delta \quad (6)$$

$$d\delta = \frac{\cos \beta}{\cos^2 \theta + \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \theta} d\theta$$

(2)声-海底-海面-水听器

同理可得本类声线的混响强度 I_2 为

$$I_2 = \int \frac{I_0 \cos \alpha_0}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha_0} \right) \sin \alpha_1} \cdot \psi_s \cdot \frac{m \cos \alpha_1}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha_2} \right) \sin \alpha_4} dS_2 \quad (7)$$

其中,

$$\psi_s = \sigma \cdot \sin(\alpha_1 - \gamma) \cdot \sin^n[\pi - (\alpha_1 - \gamma)]$$

$$dS_2 = \frac{c \cdot \tau}{\cos(\alpha_1 - \gamma) + \cos(\alpha_2 - \gamma)} \cdot \frac{\gamma}{\cos \gamma} d\delta \quad (8)$$

$$d\delta = \frac{\cos \beta}{\cos^2 \theta + \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \theta} d\theta$$

m 为海面反射系数。

(3)声源-海面-海底-水听器

同理可得本类声线的混响强度 I_3 为

$$I_3 = \int \frac{m I_0 \cos \alpha_4}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha_4} \right) \sin \alpha_2} \cdot \psi_s \cdot \frac{\cos \alpha_1}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha_1} \right) \sin \alpha_0} dS_3 \quad (9)$$

其中,

$$\psi_s = \sigma \cdot \sin(\alpha_2 - \gamma) \cdot \sin^n[\pi - (\alpha_1 - \gamma)]$$

$$dS_3 = \frac{c \cdot \tau \cdot \gamma}{\cos(\alpha_1 - \gamma) + \cos(\alpha_2 - \gamma)} \cdot \frac{\gamma}{\cos \gamma} d\delta \quad (10)$$

$$d\delta = \frac{\cos \beta}{\cos^2 \theta + \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \theta} d\theta$$

m 为海面反射系数。

(4)声源-海面-海底-海面-水听器

同理可得本类声线的混响强度 I_4 为

$$I_4 = \int \frac{m I_0 \cos \alpha_4}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha_4} \right) \sin \alpha_2} \cdot \psi_s \cdot \frac{\cos \alpha_2}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha_2} \right) \sin \alpha_4} dS_4 \quad (11)$$

其中,

$$\psi_s = \sigma \cdot \sin(\alpha_2 - \gamma) \cdot \sin^n[\pi - (\alpha_2 - \gamma)]$$

$$dS_4 = \frac{c \cdot \tau / 2}{\cos(\alpha_2 - \gamma)} \cdot \frac{\gamma}{\cos \gamma} d\delta \quad (12)$$

$$d\delta = \frac{\cos \beta}{\cos^2 \theta + \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \theta} d\theta$$

m 为海面反射系数。

综合式(1)~式(4),得:某一时刻 t 水听器接收到的混响平均声强度为

$$I(t) = \sum I_i(t) \approx I_1(t) + I_2(t) + I_3(t) + I_4(t) \quad (13)$$

混响模型经仿真可知:海水声速梯度 α 越大,其海洋混响强度越小,声速梯度越大,声线投射到海底的掠射角就越小,海底散射系数也就随之减小,故混响强度也就越小。

2 模拟器系统硬件电路设计

所设计的声纳目标回波模拟器系统结构简图如图2所示,在设计中其主要器件PC104选用SBC84600系列、单片机选用AT89C52、FPGA选用EPM7160SLC84,系统的基本工作原理如下:

当声纳目标回波模拟器设置为主动工作方式时,首先设置目标回波信号的发射频率、脉宽、目标距离、声源级等参数。如果声纳目标回波模拟器输出目标回波声信号^[2],则将声纳设备的输出置于假负载状态,将声纳输出的发射脉冲触发信号与声纳目标回波模拟器相连,这样声纳每发射一个主动探测信号,则输出一个触发脉冲信号;声纳目标回波模拟器每接收到一个触发脉冲信号,利用单片机和FPGA产生一个设定脉宽、目标距离、声源级、频率调制的目标信号;此信号与海杂波和混响发生器产生的海杂波信号、混响信号^[4,5]在信号合成器上进行合成,产生主动目标数字信号;该信号经D/A转换,通过开关电容有源滤波器滤波,将其中的调制信号转换为标准正弦波;然后经功率放大器放大、换能器匹配网络实现输出电路,最后将信号输出到发射换能器转换为声信号;该信号被声纳接收换能器^[7]接收后,可实现对接收、处理、显示系统的定性测试,以及测距系统的定量测试。

PC104+FPGA+CVI+单片机

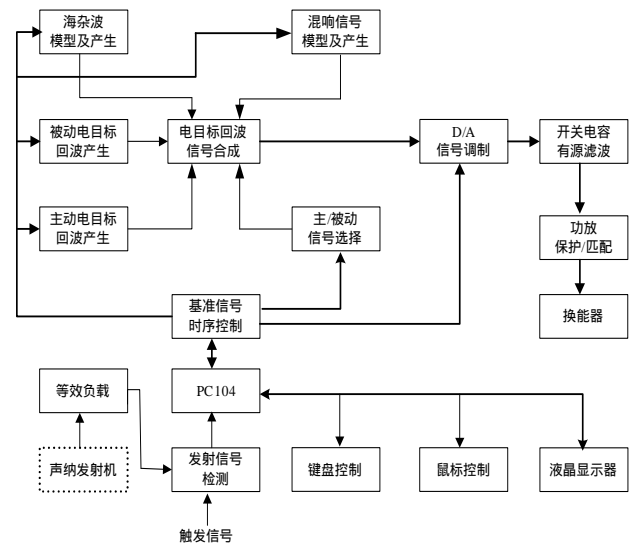


图2 声纳目标回波模拟器系统结构

当将声纳目标回波模拟器设置为被动工作方式时,设置

频率、脉宽、周期、声源级等被动目标的参数。按照设定的参数产生电信号,与海杂波和混响发生器产生的海杂波信号、混响信号在信号合成器上进行合成后产生被动目标回波信号;该信号经D/A转换,通过开关电容有源滤波器滤波,将其中的调制信号转换为标准正弦波;然后经功率放大器放大、换能器匹配网络实现输出电路,最后将信号输出到发射换能器转换为声信号;与主动声纳目标回波信号相比,被动声纳目标回波信号主要为水下目标的辐射噪声信号;被动目标回波声信号通过发射换能器输出,被声纳接收换能器^[7]接收,用于被动工作方式时声纳系统的测试。另外在水声环境中,利用声纳目标回波模拟器发射一定声源级的声纳信号,可以实现对声纳接收系统灵敏度、接收换能器方向性等的测试。

3 模拟器系统软件设计

为了完成声纳目标回波模拟器的功能,所设计的软件由 CVI 编写的 PC104 界面子程序、单片机子程序和 FPGA 子程序、串行口中断子程序、外部中断子程序、延时计算子程序、杂波/目标回波/数据生成子程序等。下面对几个主要流程进行简要介绍。

3.1 CVI 编写的 PC104 界面子程序

该子程序的基本功能是:完成声纳目标回波模拟器所需各种不同界面的转换,目标回波信号所需参数的设定,与单片机通信的编码数据(主要包括频率、脉宽、周期、目标距离、声源级)输出和对应主/被动信号的波形显示。其简要流程如图 3 所示。

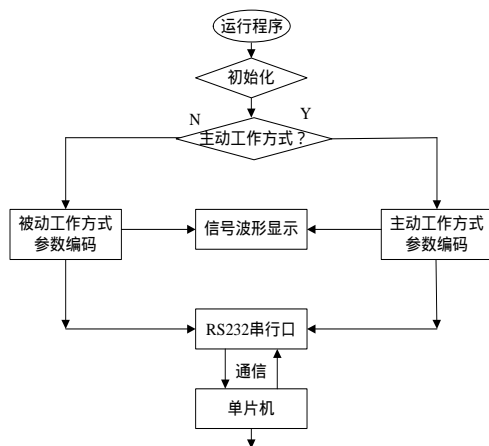


图 3 CVI 界面子程序简要流程

3.2 单片机子程序

该子程序的基本功能是:启动 CVI 编写的 PC104 界面程序,并向单片机发送编码信息后,单片机响应串行中断,将接收来自 PC104 的串行编码信息(编码信息包括被动工作方式、波特率、信号频率、脉宽、周期和声源级)放入设定好的存储器中,同时设置开始位和停止位。当接收完编码信息后,单片机再通过 RS232 串行口返回给 PC104 编码信息,使其在被动工作方式界面上显示回波波形。当单片机响应外部中断时(此时声纳目标回波模拟器处于主动工作方式下,早已将设定参数的目标回波信息数据通过 RS232 串行口自动将 EEPROM 中的数据传送到单片机),单片机将已存储在设定好的存储器中的编码信息(编码信息包括主动工作方式、波特率、信号频率、脉宽、目标距离和声源级)通过 P0 口传给 FPGA,产生对应的目标回波,同时单片机再通过 RS232 串行口返回给 PC104 编码信息,使其在主动工作方式界面上显

示回波波形。与串行中断不同的是只有单片机响应一次外部中断才输出一次主动回波信息并显示一次对应的回波波形;而当单片机响应串行中断后,单片机则按给定的编码信息输出回波信息。其简要流程如图 4 所示。

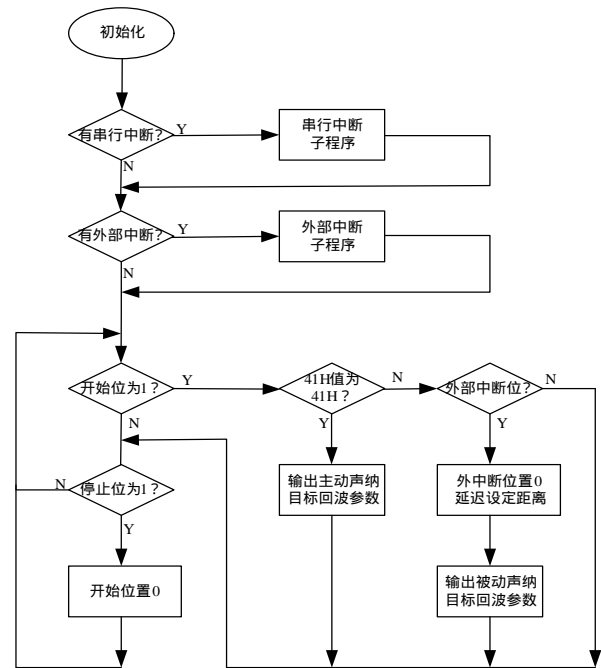


图 4 单片机子程序

3.3 目标回波数据产生子程序

该子程序的基本功能是:根据功能开关选择输出的主/被动声纳目标回波信号的种类,按照所建数学模型,生成所需各种模拟目标回波数据^[3],并完成目标回波、杂波信号的合成,其简要程序流程如图 5 所示。在图中,初始化后,将模拟器设置为工作状态,此时海杂波和混响信号模拟器处于工作状态,产生海杂波数据和混响数据,目标回波信号种类的产生和输出由键盘输入的状态控制信号决定,分别可选择输出主动目标回波电信号、被动目标回波电信号两种中的一种,输出的声纳目标信号和海杂波信号和混响信号混合后,作为主/被动工作状态下的声纳目标回波信号输出。

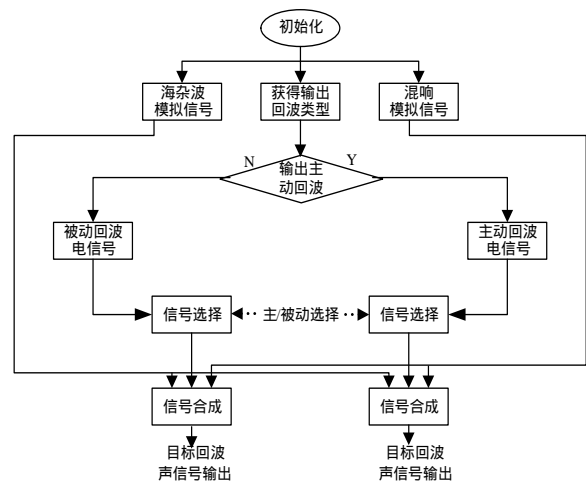


图 5 目标回波数据产生简要流程

3.4 FPGA 子程序

该子程序的基本功能是:设置的 4 个寄存器完成对信号

(下转第 232 页)