

12-13-2019

Design and Implement of Semi Physical Simulation System for Underwater Acoustic Imaging

Ruonan Fan

The 705 Research Institute, Xi'an 710077, China;

Jijun Jiang

The 705 Research Institute, Xi'an 710077, China;

Naiwei Sun

The 705 Research Institute, Xi'an 710077, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design and Implement of Semi Physical Simulation System for Underwater Acoustic Imaging

Abstract

Abstract: A semi physical simulation system based on underwater scale target and acoustic imaging is designed. Functional requirements are presented, the echo models of underwater scale target acoustic image are established through the planar element method, *the structure*, hardware and software are designed, *the real-time signal generation techniques* of applying the model to the simulation system are researched. The results of underwater experiment show that the simulation system can simulate the acoustic imaging echo signal of Benchmark submarine model, the imaging results are recognizable to some extent, it can be promoted to any underwater scale target and meet the requirements of acoustic imaging system development.

Keywords

scale target, acoustic imaging, real-time semi-physical simulation, simulation system

Recommended Citation

Fan Ruonan, Jiang Jijun, Sun Naiwei. Design and Implement of Semi Physical Simulation System for Underwater Acoustic Imaging[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(12): 2768-2774.

水声成像半实物仿真系统设计与实现

范若楠, 蒋继军, 孙乃葳

(中国船舶重工集团公司第 705 研究所, 陕西 西安 710077)

摘要: 构建了一个基于水声成像并针对水下尺度目标的半实物仿真系统。提出了仿真系统的功能需求, 通过板块元算法建立了水下尺度目标空间声图回波模型, 设计了仿真系统的组成结构、硬件和软件等, 研究了将模型应用于仿真系统的实时信号生成技术。水池试验结果证明仿真系统能够模拟 Benchmark 标准潜艇模型的水声成像回波信号, 成像结果具有一定的可识别性, 并能推广到任意水下目标的水声成像回波仿真, 可满足水声成像系统研究的仿真需求。

关键词: 尺度目标; 声成像; 实时半实物仿真; 仿真系统

中图分类号: TJ630.1; TB71.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 12-2768-07
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0410

Design and Implement of Semi Physical Simulation System for Underwater
Acoustic Imaging

Fan Ruonan, Jiang Jijun, Sun Naiwei

(The 705 Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: A semi physical simulation system based on underwater scale target and acoustic imaging is designed. Functional requirements are presented, the echo models of underwater scale target acoustic image are established through the planar element method, the structure, hardware and software are designed, the real-time signal generation techniques of applying the model to the simulation system are researched. The results of underwater experiment show that the simulation system can simulate the acoustic imaging echo signal of Benchmark submarine model, the imaging results are recognizable to some extent, it can be promoted to any underwater scale target and meet the requirements of acoustic imaging system development.

Keywords: scale target; acoustic imaging; real-time semi-physical simulation; simulation system

引言

水下目标声成像已经成为当前进行海洋勘察、海底地形测绘、水下目标识别、航道监测等最有效的技术手段^[1]。水下无人潜航器(UUV)(包括 ROV 和 AUV)和水下作战平台等水下探测平台已经成

为近年来世界各国水下研究的新热点。专用的成像声纳可以实时提取水下目标的精确图像, 感知未知环境, 反馈给控制系统指导下一步的任务, 配合水下无人潜航器完成实时避障、目标识别、自主导航、水下平台对接等高精度水下作业。水声成像技术已成为水下无人潜航器的主要关键技术之一。

目前, 新型水下无人潜航器需要大量的试验验证技术的成熟度, 为产品转化提供支持。由于水下实航试验受到水下混响、噪声、干扰等影响较大, 试验结果不确定, 成本较高, 不具备收集大量试验



收稿日期: 2019-05-30 修回日期: 2019-08-07;
作者简介: 范若楠(1984-), 女, 陕西西安, 硕士, 高工, 研究方向为鱼雷仿真; 蒋继军(1971-), 男, 陕西西安, 硕士, 研究员, 研究方向为鱼雷仿真; 孙乃葳(1993-), 男, 河南平顶山, 硕士, 工程师, 研究方向为鱼雷仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2768 •

样本的条件。因此,应用建模与仿真手段,在实验室条件下建立完善的声成像半实物仿真系统具有重要的意义。

1 水下尺度目标空间声图像回波建模

水声成像仿真系统的关键是建立尺度目标精细的回波模型。传统的目标回波模型建立方法是基于目标亮点模型。目标亮点模型可以反映目标尺度方面的特征,却很难描述出具有可识别性的目标特性。而目标回波特性和模型研究方面,国内已利用 Krichhoff 近似建立了水下目标的板块元分析方法,能够对水下复杂目标几何反向散射波进行精确预报。水声成像目标回波模型可以通过板块元算法来建立。

利用 UG 建立任意尺度模型的三维几何模型,通过 ANSYS 把目标表面划分为板块网格,对发射波束照到的亮区内所有元面散射强度求和得到目标散射声场的近似值^[2-4]。图 1 为 Benchmark 标准潜艇模型板块划分后的示意图。

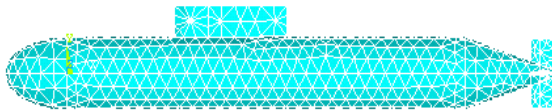


图 1 板块划分后的模型
Fig. 1 The model of division stock

应用物理声学或 Kirchhoff 近似方法,并通过高频假设和简化,假如目标表面划分为 $N \times M$ 个网格,得到目标散射声场的计算公式:

$$I = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left[V(\theta'_{ij}) w \sum_{n=1}^K \frac{e^{2ik_0(x'_n u'_{ij} + y'_n v'_{ij})} (p_{n-1} - p_n)}{(u'_{ij} + p_{n-1} v'_{ij})(u'_{ij} + p_n v'_{ij})} \right]_{S_{ij}} \quad (1)$$

式中: x'_n, y'_n 为变换到二维平面后第 (i, j) 个板块的顶点坐标; $V(\theta'_{ij})$ 为第 (i, j) 个板块的局部表面反射系数; θ'_{ij} 为第 (i, j) 个板块的法线和入射声线夹角。

对于水中目标的回波问题,可以在频域进行计算,设 $x(t)$ 为入射信号, $y(t)$ 为目标回波信号,

$h(\tau)$ 为冲激响应函数, $X(f)$ 为入射信号的频谱, $Y(f)$ 为回波信号的频谱, $H(f)$ 为频域响应函数。

则目标回波可以表示为:

$$y(t) = x(t) \otimes h(\tau) \quad (2)$$

目标频域的回波谱为:

$$Y(f) = X(f) \times H(f) \quad (3)$$

这样,通过频域变化就可以求出目标散射回波。目标回波模拟仿真的流程图如图 2 所示。

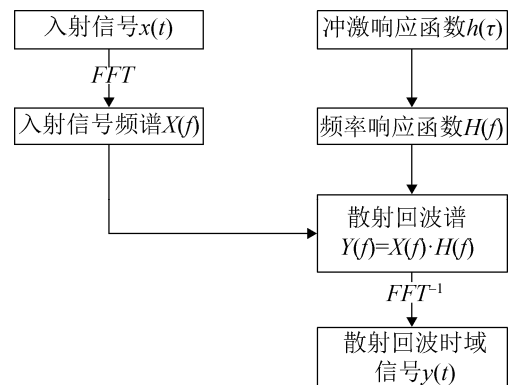


图 2 回波信号仿真流程图

Fig. 2 Simulation flowchart of echo signal

通过板块元法和频域法^[5]可以实现水中尺度目标空间声图像回波信号的建模。该模型可直接应用于水下尺度目标成像数学仿真或基于电子注入式、对接耦合式的半实物仿真。

2 系统的组成结构

水声成像半实物仿真系统主要功能是通过实验室水池水声物理场来实现水中尺度目标成像回波声信号的实时仿真,其主要硬件构成为:过程控制计算机、应答转发装置、仿真实时信号生成设备、信号发生装置、信号驱动设备、仿真基阵。

系统工作原理示意图如图 3 所示。过程控制计算机完成目标运动参数、脉冲形式、尺度目标特征及运动参数等设定,解算目标的运动学模型,接收待测产品和仿真系统之间的同步脉冲,实现产品工作状态、发射波束信息等关键性参数的解码;应答转发装置接收待测产品的发射信号,调制为同步脉冲信号发送给实时信号生成设备;实时信号生成设备根据设定参数,计算并生成水下尺度目标成像仿

真实时数字信号; 信号发生装置将数字信号通过数模转换器(DAC)转换成模拟信号; 信号驱动设备进行信号的功率放大, 驱动仿真基阵; 仿真基阵完成仿真信号的电声转换, 将水下尺度目标成像仿真实时信号通过阵元输出; 通过水声物理场的传播, 待

测产品接收成像仿真信号, 产生目标声学图像等检测信息送给过程控制计算机; 过程控制计算机根据检测结果进行下一步参数设置, 将运动信息等发送给实时信号生成设备, 实现半实物仿真系统的动态闭环。

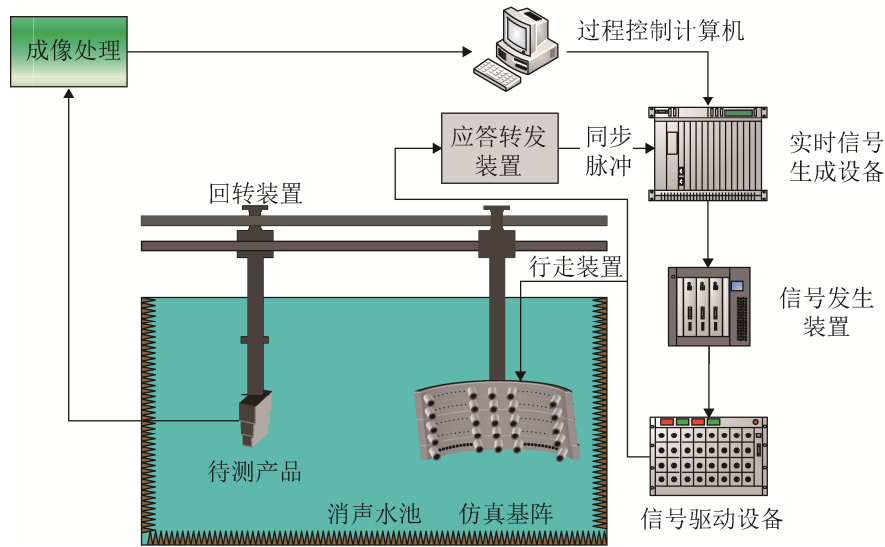


图 3 水声成像半实物仿真系统示意图

Fig. 3 Diagram of semi physical simulation system for underwater acoustic imaging

3 软硬件设计

3.1 过程控制计算机

过程控制计算机由 CPU 板、实时反射内存板、以太网口、高速数据通讯卡等构成, 如图 4 所示。CPU 板对仿真程序进行编译、调试, 完成模型实时解算及接口管理等, 通过串口或以太网口与待测产品实时通讯。软件划分为以下功能模块: 设备初始化、系统自检、参数设定、仿真运行、仿真停止、通讯监听。这些功能模块如图 5 所示。其中仿真运行模块按照一定步长计算并更新目标运动参数。

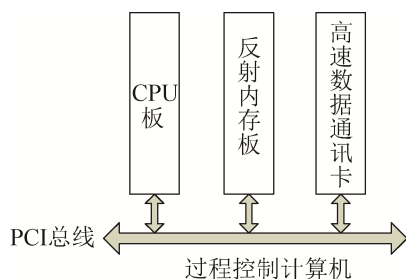


图 4 过程控制计算机组成

Fig. 4 Constitution of process control computer

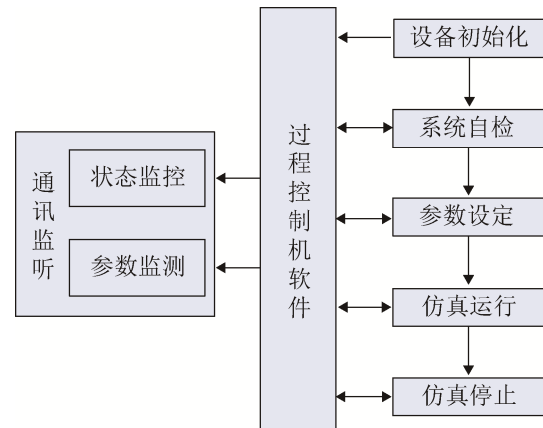


图 5 过程控制计算机软件模块组成

Fig. 5 Constitution of process control computer software module

3.2 应答转发装置

应答转发装置由滤波放大模块、包络检波及脉冲生成模块等组成, 如图 6 所示。

3.3 实时信号生成设备

实时信号生成设备是水声成像半实物仿真系

统的核心运算部分。设备可根据目标运动及位置关系、实验水文环境、发射脉冲特性等参数,实时地模拟信号的发射、传输、反射到接收阵面的完整过程,生成相应的仿真目标回波实时数字信号,并经由数字信号接口输出。

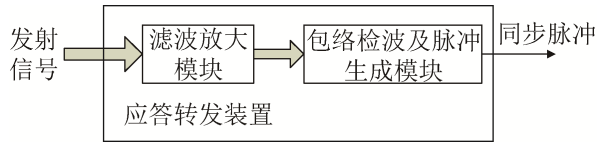


图 6 应答转发装置组成

Fig. 6 Constitution of Balise forwarding equipment

实时信号生成设备结构箱体选用高速总线机箱,硬件模块包括反射内存板、信号处理板、数据交换板、以及机箱、底板、电源等,组成原理框图如图 7 所示。

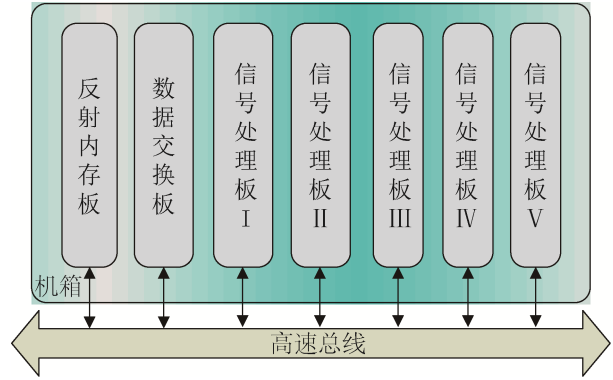


图 7 实时信号生成设备组成结构图

Fig. 7 Constitution diagram of real-time signal generation equipment

软件分为以下功能模块:目标声散射特征量计算模块、目标回波实时信号数字特征量计算模块、目标回波实时数字信号生成模块、空域信号阵元加权模块等,软件流程如图 8 所示。

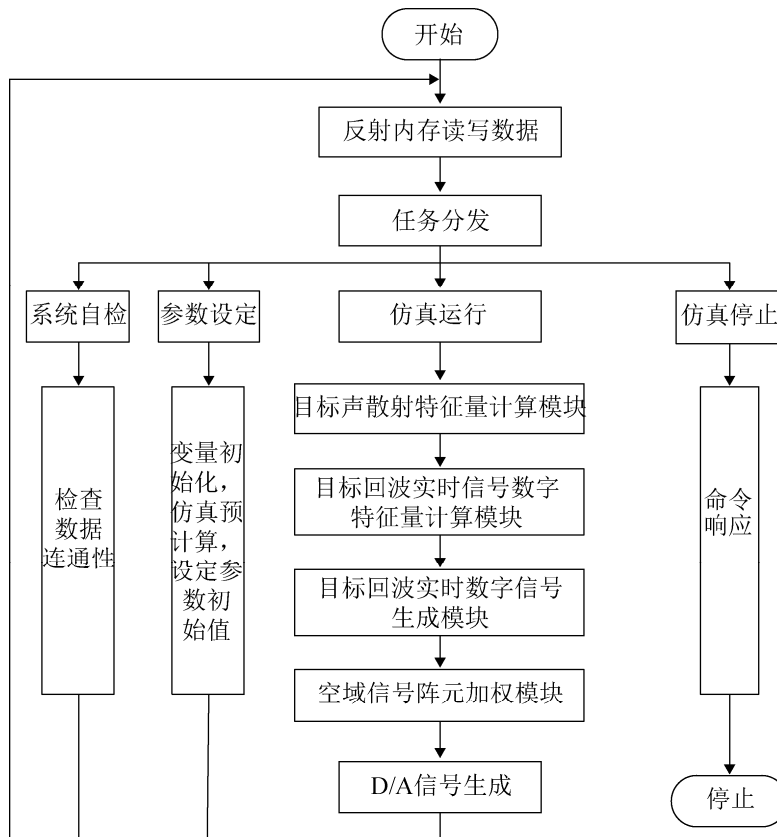


图 8 实时信号生成软件流程示意图

Fig. 8 Flow diagram of real-time signal generation software

3.4 信号发生装置

该模块可作为信号生成板嵌入到实时信号生成设备，亦可采用独立机箱设计，与实时信号生成

设备之间数据通过数字信号通道传输，组成原理框图如图 9 所示。

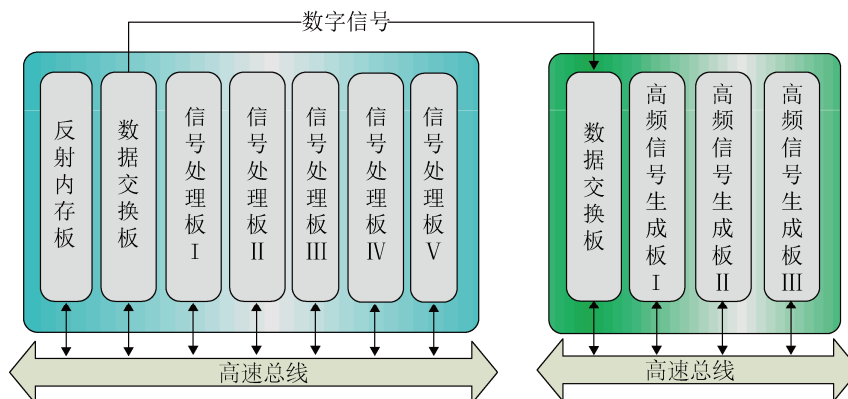


图 9 信号发生装置结构图
Fig. 9 Structure diagram of signal generator

3.5 仿真基阵

仿真基阵是水声成像半实物仿真系统的核心原理样机。基阵通过合理的位置布放设计和阵列结构设计，可以覆盖满足技术指标要求的水平角度范围和垂直角度范围，并能够在声中心处形成叠加声场，反映目标空间不同部位回波的距离、方位、强度、运动特征等精细目标信息。

为了在成像声纳阵面生成一个能反映出信号在时域和空间域上变化关系的平面波声场，通过一个二维阵列换能器基阵来生成该目标回波声场，该基阵能够覆盖成像声纳波束宽度。在实际目标空间回波中，目标表现出的回波图像信息不是一个个亮点，而是几个亮区，本课题采用了 $N \times M$ 的网格化二维阵列来模拟目标空间回波亮区，考虑阵元本身体积、成像声纳波束覆盖范围，通过确定仿真基阵波束覆盖扇面、阵元半径、阵元间隔等^[6]，完成了仿真基阵的设计。仿真基阵由换能器、基阵安装支架、水密电缆等组成，阵形示意图见图 10。

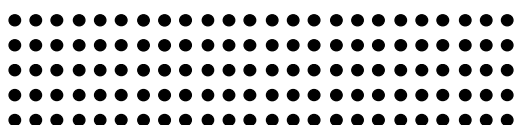


图 10 基阵结构示意图
Fig. 10 Structure diagram of arrays

3.6 实时信号生成技术

第 2 节提出的水中尺度目标空间声图像回波模型可直接应用于水下尺度目标成像数学仿真。但对于水声物理场半实物仿真实时系统，一方面由于其板块元数量过大，无法用实时计算平台直接计算；另一方面，其建立的回波模型为接收基阵阵元域信号，而不是发射基阵阵元域信号，可以用于电子注入式、对接耦合式的半实物仿真，但不能直接应用于仿真基阵的信号模拟。因此必须研究目标特征到仿真基阵的映射方法。

板块元方法是将水中大的尺度目标划分为许多小的反射面元，通过计算各个面元在入射声波照射下的散射声场，实现水中尺度目标散射强度特征的仿真计算。对于标准 Benchmark 潜艇，以艇艏为 0° ，艇艉为 180° ， 90° 入射角度下某发射频率的二维强度分布如图 11 所示。



图 11 90° 入射散射强度分布
Fig. 11 Scattering intensity distribution in vertical incidence

将上述板块元计算得到的目标特征在空间坐标系下进行网格化处理, 采用基于成像声纳波束覆盖范围的合成算法, 通过水平和垂直波束范围划分, 将尺度目标成像划分成若干网格, 将网格内相邻的板块元聚为一类, 对应一个散射强度数据, 构成声纳图像的像素点仿真。网格化处理过程如下:

step 1: 确定成像网格的范围。根据成像声纳和目标的相对位置、波束形成角度范围, 确定成像网格范围, 在目标长度 x 轴和 y 轴上表示为 $[\min(x), \max(x)]$ 、 $[\min(y), \max(y)]$ 。

step 2: 计算每个网格的位置。设网格的位置坐标为 $[X_i, Y_j]$, i 与 j 分别表示网格所在的列与行。第 i 列、第 j 行的网格在 x 轴和 y 轴方向的范围为:

$$\begin{cases} x \in [(\min(x), X_1], y \in [(\min(y), Y_1], i=1, j=1 \\ x \in [X_{i-1}, X_i], y \in [Y_{j-1}, Y_j], \text{ else} \end{cases} \quad (4)$$

根据成像声纳的波束宽度确定映射间隔, 如图 12 所示。

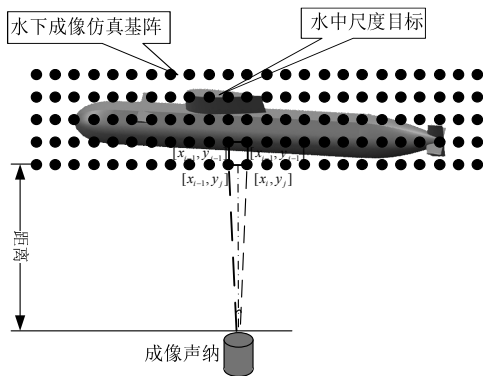


图 12 映射间隔划分图

Fig. 12 Partition map of mapping bay

已知目标长度 L 、航向角 φ , 水平角度间隔为 $\Delta\theta$, 垂直角度间隔为 $\Delta\beta$ 。根据正弦定理:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}L = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2}L\right)^2 + d^2 - dL \cos \varphi}}{\sin \theta_1} \\ \frac{1}{2}L = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2}L\right)^2 + d^2 + dL \cos \varphi}}{\sin \theta_2} \end{cases} \quad (5)$$

计算得到 θ_1 、 θ_2 、 Θ , 则水平方向平均分为 m 份:

$$m = \Theta / \Delta\theta \quad (6)$$

同样, 可以对垂直方向上分割 n 份, 则映射角度 $i \cdot \Delta\theta$ 与 $j \cdot \Delta\beta$ 所对应的网格的位置坐标 $[X_i, Y_j]$ 计算公式如式(7):

$$\begin{cases} X_i = X_{\min} + \frac{d_1 \sin(i-1)\Delta\theta}{\sin(\pi/2+\theta_1 - (i-1)\Delta\theta)} \\ Y_j = Y_{\min} + \frac{d_3 \sin(j-1)\Delta\beta}{\sin(\pi/2+\beta_1 - (j-1)\Delta\beta)} \end{cases} \quad (7)$$

Step 3: 将网格内所有散射面元的强度叠加, 即为映射后的水中尺度目标强度特征。

90°入射下的 Benchmark 标准潜艇回波成像映射结果如图 13 所示。其中, 每一个网格均代表矩形基阵中的一个阵元。

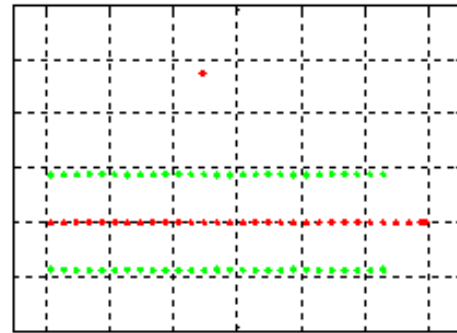


图 13 声散射强度映射像素图

Fig. 13 Acoustic scattering intensity mapping pixel map

4 半实物仿真结果

水声成像半实物仿真系统经过设计实现之后, 运行良好。成像声纳能对接收的水声回波信号进行正确成像。图 14~15 分别为 Benchmark 标准潜艇数学仿真成像图和半实物成像结果图。

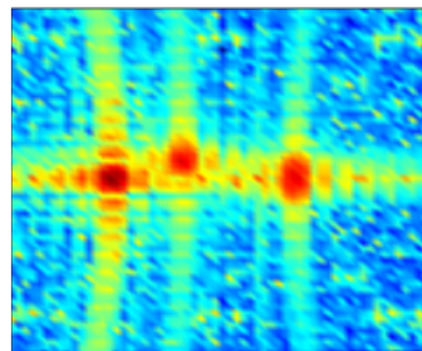


图 14 数学仿真成像结果

Fig. 14 Numerical simulation Imaging

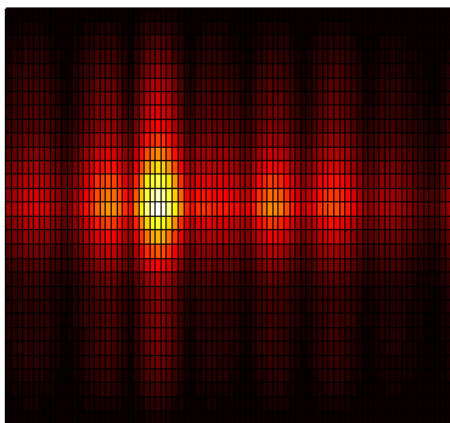


图 15 半实物仿真系统成像结果

Fig. 15 Imaging of semi physical simulation system

由图 14~15 可见, 试验成像结果可以反映出目标的亮区特征, 与数学仿真成像结果一致。

5 结论

本文对水声成像半实物仿真系统的设计和实现技术进行了探讨, 通过板块元算法建立了水下尺度目标空间声图像回波模型, 确定了主要组成部分的功能、组成, 并进行了硬件和软件设计, 研究了将模型应用于仿真系统的实时信号生成技术, 完成了基于消声水池的半实物仿真试验。由半实物仿真结果可知, 水声成像半实物仿真系统能有效的实现基于水声物理场的水下尺度目标的水声成像回波信号模拟, 对水下成像产品的研制和检测具有重要意义。为了进一步完善半实物仿真系统, 后续还要在回波模拟的逼真度方面做深入研究。

参考文献:

- [1] 钟宏伟. 国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 215-225.

Zhong Hongwei. Review and Prospect of Equipment and Techniques for Unmanned Undersea Vehicle in Foreign Countries[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(3): 215-225

- [2] 范军. 水下复杂目标回声特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.

Fan Jun. Study on Echo Characteristic of Complex Underwater Targets[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2001.

- [3] 范军, 汤渭霖, 卓琳凯. 声呐目标回声特性预报的板块元方法[J]. 船舶力学, 2012, 16(1/2): 171-180.

Fan Jun, Tang Weilin, Zhuo Linkai. Planar Elements Method for Forecasting the Echo Characteristics from Sonar Targets[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(1/2): 171-180.

- [4] 孙乃威, 李建辰, 万亚民, 等. 基于改进板块元法的潜艇目标强度预报仿真[J]. 鱼雷技术, 2016, 24(4): 254-258.

Sun Naiwei, Li Jianchen, Wan Yamin, et al. Simulation of Submarine Target Strength Forecast Based on Improved Planar Element Method[J]. Torpedo Technology, 2016, 24(4): 254-258.

- [5] 彭水. 双基地目标强度及回波时域特性研究[J]. 船舶电子工程, 2009, 29(9): 175-177.

Peng Shui. Study on Time Domain Characteristics of Bistatic Target Strength and Echo[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(9): 175-177.

- [6] 郑士杰, 袁文俊, 缪荣兴, 等. 水声计量测试技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995.

Zheng Shijie, Yuan Wenjun, Liao Rongxing, et al. Hydroacoustic Measurement and Testing Technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1995.