

相关测速声呐海底回波仿真系统设计

李丹丹^{1,2}, 陈 龙¹, 王长红¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 相关测速声呐通过对回波数据的空间相关函数与空间相关函数理论公式进行模型匹配来获得载体速度等信息。回波空间相关函数的主瓣宽度影响载体的速度估计及精度。因此对海底回波空间相关函数特性的研究就显得尤为重要。依据相关测速声呐的工作特点, 提出了采用 Model-View-Controller(MVC)模式构建相关测速声呐海底回波仿真系统的设计方法, 并基于 VC 6.0 软件开发平台将其实现。建立了友好的系统可视化仿真界面, 为回波空间相关函数特性的研究提供了便利的平台。

关键词: 相关测速声呐; 回波空间相关函数; 仿真软件

中图分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-05-0417-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.05.007

The simulation design of sea-bottom backscattering for correlation velocity log system

LI Dan-dan^{1,2}, CHEN Long¹, WANG Chang-hong¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The correlation sonar for velocity measurements (*i.e.* the correlation velocity log system) obtains the velocity of vessel and other information by using model-matching of the correlation function of echo data with the theoretical correlation function. The main lobe width of the spatial correlation of sea-bottom backscattering influences the accuracy of the vessel velocity estimation. Therefore, it is greatly important to research the spatial correlation of sea-bottom backscattering for correlation sonar. Based on the characteristics of correlation sonar, the MVC design pattern is proposed to build the simulation system of sea-bottom backscattering for correlation sonar, and the simulation software is implemented on the VC 6.0 software development platform. Establishing a friendly system of visual communication interface, the simulation software provides a convenient platform for the research on bottom reverberation simulation.

Key words: correlation sonar for velocity measurement; bottom reverberation; simulation software

0 引言

海洋混响包含着许多物理、声学特性, 是影响声呐性能的重要因素之一。对于工作于浅海的主动声呐, 海洋混响是主要的干扰信号; 对于测速、测深以及成像声呐, 海洋混响是主要的研究对象。因此, 深入研究混响的特性是十分必要的。海底混响作为海洋混响的重要组成部分, 长期以来, 国内外的学者对海底混响特性进行了大量的研究。由于组织进行海上实验需要花费大量的人力物力, 同时, 仿真技术是一种可控制、无破坏性、耗费小、并允许多次重复的实验手段, 多数学者选择建模仿真方法^[1-5], 进行理论分析后, 采用模拟仿真进行验证分

析, 最终将其用于实际。

本文的研究工作主要基于相关测速声呐, 它的换能器基阵是平面阵, 由一个发射子阵和数个接收阵元组成。发射阵元垂直向下发射声波, 入射角基本接近 0°。提出了采用 MVC 模式构建相关测速声呐海底回波仿真系统的设计方法, 将数据、显示和处理相分离, 提高了程序的可维护性、可移植性、可扩展性与可重用性。并基于 VC 6.0 软件开发平台实现了相关测速声呐海底回波仿真系统软件, 为海底回波空间相关函数特性的研究提供了便利的平台。同时将海底沉积层密度梯度引入海底混响仿真模型, 使海底混响仿真更接近海底的实际情况。

1 相关测速声呐系统架构

相关测速声呐的实时工作系统由硬件和软件两部分组成。硬件系统一般分为水下分机和水上分

收稿日期: 2013-07-12; 修回日期: 2013-10-16

作者简介: 李丹丹(1989—), 女, 天津人, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 王长红, E-mail: wangch@mail.ioa.ac.cn

机, 主要包括换能器基阵、DSP 处理机、数字显示平台、模拟分机等, 完成信号的发射、接收和采集、存储、处理和显示等功能。软件系统主要完成信号发射控制、回波采集、数据处理以及结果的显示和保存等功能。

将相关测速声呐系统的实际工作进行简化, 系统的架构主要包括以下 4 个模块: 信号发射、海洋散射回波、回波接收以及信号处理。如图 1 所示。



图 1 相关测速声呐系统架构

Fig.1 The structure of the correlation sonar for velocity measurements

其中, 信号发射模块主要负责生成发射声波。散射回波模块负责形成各接收阵元的海底散射回波。回波接收模块负责获得散射回波, 并进行数据截取、解调滤波等预处理工作。信号处理模块负责对经过预处理的回波数据进行再处理, 包括空间相关函数矩阵的计算、模型匹配以及其他处理等。

2 海底回波模型

海底混响主要由海底沉积层中沉积物的非均匀性以及海底界面的不平整性导致的声散射引起的。很多学者在海底回波建模方面做了大量的工作^[6-8], 本文只作出简要的描述说明。

习惯上用海底回波散射截面来表征海底散射强度。海底回波散射截面为海底表面散射的反向散射截面与沉积层体积的反向散射截面之和^[6-8]:

$$\sigma(\theta) = \sigma_i(\theta) + \sigma_v(\theta) \quad (1)$$

其中: $\sigma_i(\theta)$ 为海底表面单位面积单位立体角对应的散射截面; $\sigma_v(\theta)$ 为海底沉积物单位面积单位立体角对应的散射截面。

对应的海底回波强度为^[8]

$$I(t) = I_i(t) + I_v(t) \quad (2)$$

实际的海底沉积层介质具有分层或非均匀结构, 是各向异性的。海底沉积物随着掩埋深度的增加, 由于压实和固结等作用, 一般有密度和声速增大的趋势。密度和声波速度是研究海底声波反射特性的重要参数。沉积物中的密度梯度和速度梯度使得海水与沉积层交界面处的声散射变得复杂, 影响到海底表面反射损失、海底表面以及沉积层散射强度。空间相关函数根据接收阵元接收到的海底回波数据计算而来, 这就使得海底沉积层密度梯度和速度梯度在空间相关特性的研究过程中具有重要意

义。考虑到海底表层沉积物中速度梯度较密度梯度弱, 因此主要将海底垂直密度梯度引入到海底回波模型中。

2.1 垂直密度梯度模型

沉积层分布着各种类型的沉积物, 不同类型沉积物的密度不同。垂直方向上, 海底表层沉积物的密度梯度主要由生物扰动作用形成。生物扰动作用是生物体对沉积物颗粒的混合作用^[9]。沉积层表层的沉积物受到生物扰动作用, 孔隙率不断变小, 密度不断增大。由于沉积作用是持续进行的, 后续沉积物将表层的沉积物掩埋, 成为表层沉积物。掩埋深度越深, 生物扰动作用时间就越长, 孔隙率越小, 密度越大。即随着深度的增加沉积物密度迅速增加。随着沉积深度增加至一定值时, 生物扰动作用最终将会停止。

海底沉积层密度是随深度变化的函数, 可以表示为^[10]:

$$\rho(z) = \rho_s - (\rho_s - \rho_0)/(1+az), \quad z \geq 0 \quad (3)$$

式中, z 为沉积物掩埋深度, $z=0$ 表示海水与沉积层交界面; ρ_s 为深度 $z=\infty$ 处沉积物密度; ρ_0 为海水与沉积层交界面处密度; a 为密度分布参数。

由式(3)可知, 当 $\rho_s = \rho_0$ 时, $\rho(z) = \rho_s$, 即未引入密度梯度情况下沉积物的密度。

2.2 反射系数的计算

假设海底沉积层介质为各向同性的流体时, 声波在海水与沉积层交界面上的反射系数一般表示为瑞利反射系数:

$$R(\phi) = \frac{\rho v \sin \phi - [1 - (v \cos \phi)^2]^{1/2}}{\rho v \sin \phi + [1 - (v \cos \phi)^2]^{1/2}} \quad (4)$$

其中, $\rho = \rho_s / \rho_w$, ρ_w 为海水密度; $v = v_s / v_w$, v_s 和 v_w 分别为声波在沉积层和海水中的传播速度; $\phi = \pi/2 - \theta$ 为掠射角, θ 为入射角。

引入沉积层垂直密度梯度, 结合沉积层密度公式(3), 反射系数可表示为:

当 $\rho_0 \neq \rho_w$ 时,

$$R(\phi) = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 + 1} \quad (5)$$

$$R_1 = (\rho_0 v_s - \rho_w v_w) / (\rho_0 v_s + \rho_w v_w) \quad (6)$$

$$R_2 = - \int_0^\infty \frac{a(\rho_s - \rho_0)}{2(1+az)^2 \rho(z)} e^{2ik \sin \phi z} dz \quad (7)$$

其中, k 为海水中声波波数。

当 $\rho_0 = \rho_w$ 时,

$$R(\phi) = R_2 \quad (8)$$

2.3 海底表面散射模型

建立海底表面散射模型主要有两种方法：一种是基于小尺度微扰近似建立的微扰模型；另一种是基于大尺度基尔霍夫近似建立的基尔霍夫模型。考虑到相关测速声呐垂直向下发射声波的工作特点，采用基尔霍夫模型对海底表面的散射回波进行建模。

根据基尔霍夫模型，海底表面的回波散射截面为^[7]

$$\sigma_i(\theta) = \frac{bq_c |R(0^\circ)|^2}{8\pi [\sin^{4\alpha}(\theta) + dq_c^2 \cos^4(\theta)]^{1+\alpha/2\alpha}} \quad (9)$$

其中：

$$q_c = C_h^2 2^{1-2\alpha} k^{2(1-\alpha)} \quad (10)$$

$$d = \left[\frac{8\alpha^2 \Gamma\left(\frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2\alpha}\right)} \right]^{2\alpha} \quad (11)$$

$$b = \frac{d^{\frac{1}{2} + \frac{1}{2\alpha}} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{2\alpha} \quad (12)$$

$$C_h^2 = \frac{2\pi w_2 h_0^{-\gamma_2} \Gamma(2-\alpha) 2^{-2\alpha}}{\alpha(1-\alpha)\Gamma(1+\alpha)} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{\gamma_2}{2} - 1 \quad (14)$$

其中： w_2 为表征海底表面起伏程度的二维高度谱的谱强度； γ_2 为谱指数； h_0 为参考长度； $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。

t 时刻接收到的海底表面散射回波强度为^[8]

$$I_i(t) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=\theta_1(t)}^{\theta_2(t)} I_x \left(t - \frac{2R}{v_w} \right) \frac{\sigma_i(\theta) b^4(\theta, \varphi)}{R^4 10^{\alpha_w R/5}} dA \quad (15)$$

其中： $I_x(t)$ 为发射声波强度； $R=L/\cos\theta$ ， L 为发射阵元与海底的垂直距离； $dA=R^2 \sin\theta d\theta d\varphi$ ， φ 为水平方位角； α_w 为声波在海水中的衰减系数； $b(\theta, \varphi)$ 为收发系统的指向性系数； $\theta_1(t)$ 和 $\theta_2(t)$ 分别为 t 时刻散射区域对应入射角的下限和上限。

2.4 海底沉积层体积散射模型

沉积层的体积散射截面表示为^[6,8]

$$\sigma_v(\theta) = 5\sigma_2 \nu_l(\theta) / A \quad (16)$$

其中： $A \equiv 2/(10 \log_{10} e)$ ； $\sigma_2 = \sigma_{v0}/\alpha_b$ 为体积散射常数， σ_{v0} 为体积散射系数， α_b 为声波在沉积层中的衰减系数； $\nu_l(\theta)$ 为大尺度粗糙海底表面的均方根斜率 ζ 较小 ($\zeta < 0.1$) 情况下声波的双程传播损失^[6,8]：

$$\nu_l(\theta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\zeta} \int_{\theta-\pi/2}^{\theta} \nu_f(\theta-\vartheta) \exp\left(-\frac{\vartheta^2}{\zeta^2}\right) d\vartheta \quad (17)$$

其中，

$$\zeta^2 = \frac{[2\pi w_2 h_0^{-\gamma_2}]^{\frac{1}{\alpha}}}{2(1-\alpha)} \left(\frac{k^2}{\alpha}\right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \quad (18)$$

$\nu_f(\theta)$ 为海底表面平整情况下的双程传播损失。

$$\nu_f(\theta) = \begin{cases} [1-R^2(90^\circ-\theta)]^2 \cos^2\theta [1-(v \sin\theta)^2]^{-1/2}, & \theta > \theta_c \\ 0, & \theta \leq \theta_c \end{cases} \quad (19)$$

其中， $\theta_c = \sin^{-1}(v^{-1})$ 为全反射时临界角。则 t 时刻接收到的沉积层体积散射回波强度为^[8]：

$$I_v(t) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=\theta_1(t)}^{\theta_2(t)} \frac{\sigma_{v0} \nu_l(\theta) b^4(\theta, \varphi)}{R^4 10^{\alpha_w R/5}} \left\{ \int_{l=l_1(t)}^{l_2(t)} I_x \left(t_d - \frac{l-l_1(t)}{v_s} \right) \exp(-2\beta_e l) dl \right\} dA \quad (20)$$

其中： $\beta_e = 0.2303\alpha_b$ ； $l_1(t)$ 和 $l_2(t)$ 分别是 t 时刻声波的首部和尾部在沉积层中传播的距离。

3 仿真系统软件的设计与实现

MVC(Model-View-Controller)是一种软件设计模式，它的设计思想是将一个应用的输入、处理、输出流程按照 Model、View、Controller 进行分离。模型(Model)负责数据管理，视图(View)负责从模型中获得信息，并在屏幕上加以显示。控制器(Controller)负责对模型中任何变化的传播加以控制，确保用户界面和模型之间的对应关系，协调着模型和视图的工作。

MFC 文档-视图结构是在 MVC 支撑下软件界面体系结构的一个具体应用模型。文档用来管理和保存数据，视图用来显示数据。本文采用 MVC 设计模式，基于 MFC 文档-视图结构来实现仿真系统软件，有利于软件的功能扩展和后期维护。

3.1 模型部分

模型是仿真软件的主体部分，主要包括业务逻辑模块和数据模块。

依据上述相关测速声呐的系统架构，业务逻辑模块主要完成生成发射信号、模拟海底散射过程、接收回波数据，处理回波数据。图 2 给出了工作流程图。

数据模块使用一个数据类，相当于一个数据库，定义各种数据格式以及共享数据变量等，并实现简单的数据读取、存储等功能。文档类负责从数据库中获取需要显示的各种数据，并进行一些简单的数据转换，提供给各视图类显示。

3.2 控制器部分

软件的控制部分由一个引擎类来实现，负责

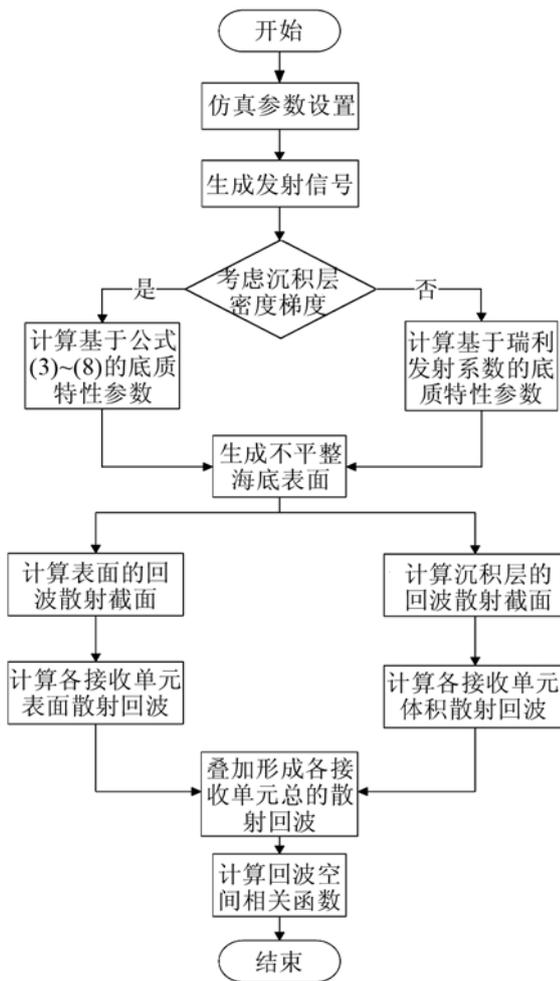


图 2 仿真软件的工作流程图

Fig.2 The working flowchart of the simulation software

接收来自界面的请求，如参数设置请求、开始仿真请求。将其交给模型进行处理。

图 3 为用户参数设置界面，引擎类需接收的参数有：

(1) 系统的收发综合开角。相关测速声呐发射阵元垂直向下发射声波，发射开角为 30°，接收开角为 60°，系统的收发综合开角为 19.0°，发射声波呈圆锥形。

(2) 声波入射角度。根据相关测速声呐工作特点，默认入射角度为 90°。

(3) 独立仿真次数。在计算空间相关函数时，采用多次独立仿真求平均的方法。

(4) 海底深度。相关测速声呐的作用距离。

(5) 沉积物平均粒径的 ϕ 值。该参数表征各种沉积物类型，区分不同海底地质。

(6) 脉冲填充数 (Q 值)。使用的发射声波是经过载波调制的宽带伪随机信号， Q 值用于调节发射信号带宽。

(7) 密度分布参数 (a)。表征沉积层密度梯度的

大小，当密度分布参数的值为零时，根据式(3)，为未引入密度梯度，将沉积层视为各向同性的、均匀的流体。

(8) 载波频率。

(9) 载体三维速度。用于发射信号的形成。

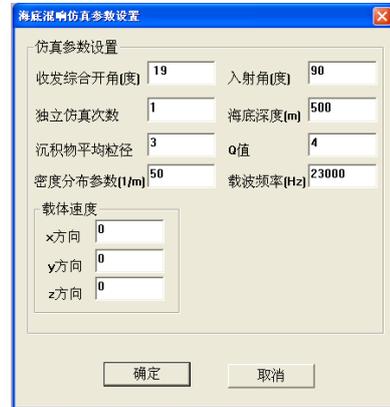


图 3 用户参数设置界面

Fig.3 The interface of parameter setting

3.3 视图部分

由于模型和视图的分离使得一个模型可以对应多个视图。本文采用切片静态视图来实现单文档多视图，即将主框架窗口划分为几个子窗口，每个子窗口代表一个视图，内容由对应的视图来管理，所有的视图各自与文档相关联，从文档获得数据。各视图分别用于仿真参数的文本显示以及回波的散射截面、某接收阵元接收的海底回波、回波的空间相关函数以及沉积层密度梯度的图形显示。效果图如图 4 所示。该仿真结果采用表 1 所示仿真参数，考虑沉积层的密度梯度，密度分布参数为 50/m。

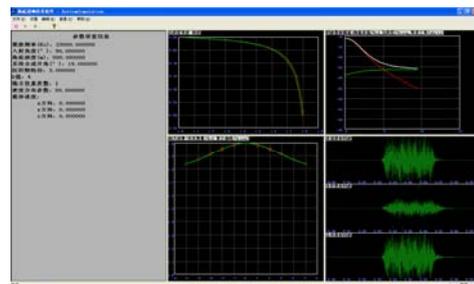


图 4 仿真软件运行效果图

Fig.4 The effect drawing of simulation software running

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters of simulation

综合收发开角 / (°)	入射角度 / (°)	仿真次数	海底深度 / m	ϕ	Q	a /m / kHz	载波频率 / kHz	载体速度 X / (m/s)	载体速度 Y / (m/s)	载体速度 Z / (m/s)
19	90	1	500	3	4	50	23	0	0	0

仿真参数直接影响回波空间相关函数。本文所设计的仿真软件可根据用户的需求，在不同仿真参

数下进行回波仿真, 并将结果以图形的形式呈现给用户, 便于用户观察分析仿真结果。

4 结论

本文通过搭建相关测速声呐的仿真系统, 基于MVC设计模式, 分别从模型、视图、控制三部分完成了相关测速声呐海底回波仿真系统软件的设计与实现, 为海底回波相关函数特性的研究提供了便利的平台, 同时, 为仿真软件今后的扩展和维护提供了方便。此外, 本文将沉积层密度梯度引入海底混响仿真模型, 使海底混响仿真更接近海底的实际情况。

今后研究的重点将立足于海底混响的物理机制, 考虑复杂海底地形情况, 逐步完善相关测速声呐海底回波仿真软件。

参 考 文 献

- [1] 高博, 朴胜春, 杨士莪. 浅海远程海底混响的空间相关特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(8): 935-940.
GAO Bo, PIAO Shengchun, YANG Shi'e. The spatial correlation of long range bottom reverberation in shallow water[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(8): 935-940.
- [2] 朱艳, 陈刚, 鲁辛凯. 水平分置海底混响信号的空间相关特性研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(5): 56-59.
ZHU Yan, CHEN Gang, LU Xinkai. Research on space correlation characteristic of horizontal bistatic seafloor reverberation signals[J]. Ship Science And Technology, 2009, 31(5): 56-59.
- [3] 蒯多杰, 王长红, 冯雷, 等. 海底回波空间相关特性研究[J]. 声学学报, 2009, 34(5): 385-395.
KUAI Duo jie, WANG Changhong, FENG Lei, et al. Spatial correlation analysis of sea-bottom backscattering[J]. Acta Acustica, 2009, 34(5): 385-395.
- [4] 王美娜. 关于混响信号建模及其时空统计规律的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
WANG Meina. The research of the reverberation signal model and its time-space statistic regularity[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [5] Smith B V, Atkins P R. Horizontal spatial correlation of bottom reverberation for normal incidence[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(5): 2197-2206.
- [6] Jackson D R, Winebrenner D P, Ishimaru A. Application of the composite roughness model to high - frequency bottom backscattering[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1986, 79(5): 1410-1422.
- [7] Mourad P D, Jackson D R. High frequency sonar equation models for bottom backscatter and forward loss[C]// Oceans' 89, 1989: 1168-1175.
- [8] Sternlicht D D, Moustier C P D. Time-dependent seafloor acoustic backscatter(10-100kHz)[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2003, 114(5): 2709-2725.
- [9] 杨群慧, 周怀阳, 季福武, 等. 海底生物扰动作用及其对沉积过程和记录的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 932-941.
YANG Qunhui, ZHOU Huaiyang, JI Fuwu, et al. Bioturbation in seabed sediments and its effects on marine sedimentary processes and record[J]. Advances In Earth Science, 2008, 23(9): 932-941.
- [10] Lyons A P, Orsi T H. The effect of a layer of varying density on high-frequency reflection, forward loss, and backscatter[J]. IEEE J. of Oceanic Eng., 1998, 23(4): 411-422.