

基于运动平台的海底混响建模与仿真

房媛媛, 李亚安, 崔琳

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 混响是主动声呐目标检测的主要干扰, 混响的建模与仿真对研究水下信号处理具有重要的意义。以海底混响为研究对象, 综合考虑发射信号的波形、海底散射体散射特性以及运动平台带来的多普勒频移等影响因素, 提出了一种基于运动平台的海底混响仿真方法。该方法同时结合了散射原理与网络模型, 具有明确的物理意义, 且其仿真实现方法简单高效。最后, 通过分析混响仿真信号的瞬时值、包络的概率分布、频谱特性以及时间相关性, 验证了该方法对海底混响仿真的有效性。

关键词: 海底混响; 散射原理; 网络模型; 运动平台

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-06-0473-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.06.006

Modeling and simulation of sea bottom reverberation based on moving platform

FANG Yuan-yuan, LI Ya-an, CUI Lin

(Marine Engineering School of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Reverberation is the main influential factor for active target detection of sonar. Modeling and simulation of reverberation play an important role in the underwater signal processing. A novel sea bottom reverberation simulation method for moving platform was proposed under the consideration of a variety of influential factors, such as the waveform of transmission signal, the characteristics of scattering, the Doppler frequency drift caused by the platform movement, and etc. This method combines the scatter theory and network model and has clear physical meaning, which can be efficiently realized in simulation. The proposed method shows good performance in simulating sea bottom reverberation by analyzing the instantaneous value of the simulated reverberation signal, the probability distribution of the temporal envelop, the spectral characteristics, and the temporal correlation.

Key words: sea bottom reverberation; scatter theory; network model; moving platform

0 引言

主动声呐利用水下目标回波信息对目标进行探测, 从而完成对目标的识别、定位和跟踪任务。在海洋环境中, 由散射体散射作用所形成的混响是主动声呐目标检测的主要干扰。通常, 采用对实测混响数据分析的方法来了解海洋混响信号的相关特性, 进而完成对它的预测与抑制处理。然而, 在实际工作环境中要得到混响信号, 常常需付出高昂的实验代价^[1]。因此, 开展对混响信号的建模和仿真研究, 对水下信号处理研究具有重要意义。

关于混响的仿真, 从散射机理上分析主要有两

种方法: 点散射模型和单元散射模型^[2]。点散射模型假定散射体随机的分布于海洋中, 通过计算每个点散射体散射回波, 求和得到混响时间序列。该方法能够比较准确仿真混响信号, 但同时带来计算量较大的缺点。单元散射模型假定海洋中的散射体服从均匀分布, 同时根据发射角度将散射区域分成若干单元, 每个单元存在大量散射体, 将每个散射单元的贡献叠加起来就得到所求的混响信号。相比而言, 单元散射模型计算复杂度较小, 适用面较广, 在工程中被广泛使用。

本文使用的网络模型, 在文献[3-5]中已被提出, 但真正付诸实践的还比较少, 或只是比较粗糙的实现。本文在基于散射原理的基础上, 结合网络模型结构提出了一种简单高效且综合考虑了海洋环境因素的海底混响仿真方法, 并完成对基于运动声呐平台的海底混响仿真实验及其验证分析。

收稿日期: 2012-09-08; 修回日期: 2012-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179157)

作者简介: 房媛媛(1987-), 女, 新疆克拉玛依人, 硕士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 房媛媛, E-mail: 122406759@qq.com

2 海底混响仿真模型

2.1 模型假设

考虑到海洋环境的复杂多变,为使混响建模切实可行,首先对混响过程做出如下假设^[6]:

(1) 忽略声线弯曲的影响,假设声波在介质中沿直线传播;

(2) 假设仿真散射空间内的散射体是随机均匀分布的;

(3) 不考虑多次散射,只考虑散射体的一次散射;

(4) 在一个脉冲宽度的时间内,因为平台运动引起的散射元和接收单元的空间方位变化量可忽略。

2.2 散射原理

从散射机理上分析,混响仿真主要有两种方法:点散射模型和单元散射模型。在海底底质情况未知时,假设散射体出现在海底任意位置的概率相同,即散射体数量 N_a 服从泊松分布。假设混响过程各向同性,当采样单元内散射体数量足够多时,根据中心极限定理, $I(kT)$ 服从复高斯分布^[7], $I(kT)$ 表示第 k 个采样单元内的散射体关于 $Sf^2e^{j\phi}$ 的共同作用:

$$I(kT) = \sqrt{\frac{N_a}{2}} S(r) f^2(r) [Normal(0,1) + jNormal(0,1)] \quad (1)$$

式中: N_a 表示采样单元内散射体数量; S 表示散射项; f 表示传播项; $e^{j\phi}$ 表示散射单元随机相位扰动; r 表示散射单元中心对应距离方向坐标值。

当散射体数目较少时,中心极限定理将不再成立,可直接对 $I(kT)$ 进行展开求和:

$$I(kT) = \sum_i^{N_a(kT)} S(r_i) f^2(r_i) e^{j\phi_i} \quad (2)$$

根据 Lambert 定理,散射项 S 为

$$S = \sqrt{10^{\frac{\mu}{10}}} \sin(\alpha_i) \sin(\alpha_o) \quad (3)$$

式中: μ 表示垂直散射系数; α_i 表示入射掠射角; α_o 表示散射掠射角(收发合置声呐, $\alpha_i = \alpha_o$)。

传播项为

$$f(d) = \frac{1}{d} 10^{-\beta d} \quad (4)$$

式中: β 表示海水吸收系数; d 表示声呐与散射体间的距离。

2.3 多普勒频移

海底散射分布图如图 1 所示,假设平台以速度 v 沿着 X 轴运动,海底散射体相对于轴向的入射角为 α ,相对于速度方向的入射角为 θ ,与坐标平面的俯仰角为 ϕ ,得到该散射体的多普勒频移为

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \cos\theta \cos\phi \quad (5)$$

式中: f_0 为发射信号频率; c 为声音在水下的传播速度; 相关角度关系为 $\cos\alpha = \sin\theta \cos\phi$ 。

由式(5)分析知,当发射信号不变时,平台运动速度越快,回波信号产生的多普勒频移越大;当平台运动速度一定时,发射信号频率增大,回波的多普勒频移也会随之增大。

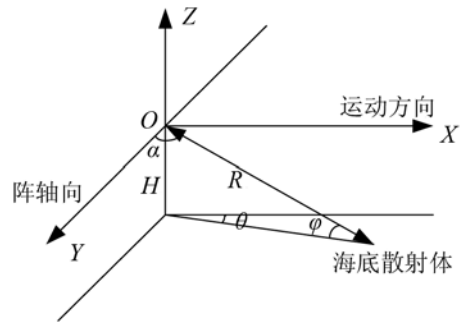


图 1 海底散射体分布图
Fig.1 Distribution of sea bottom scatters

3 结合网络模型的混响仿真算法

本文提出一种结合网络模型的海底混响仿真方法。所采用的网络模型,在本质上可以由混响信号的定义来理解为散射体散射回波信号在接收点的叠加。其仿真流程如图 2 所示。

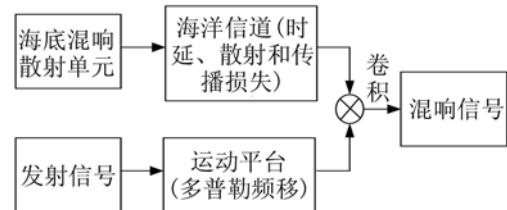


图 2 海底混响网络模型仿真流程
Fig.2 Network model simulation flow of sea bottom reverberation

依据上述仿真流程的思路,可以得到海底混响数字化实现的方法:

$$R = I \otimes S = \sum_{k=1}^{N_t} I(kT) s(t - kT) \quad (6)$$

式中: R 为仿真的海底混响信号; $s(t) = a(t) \exp(j2\pi f_i t)$ 为发射信号; $a(t)$ 为其包络值; f_i 为信号瞬时频率; f_d 为多普勒频移; I 表示第 k 个采样单元内的散射体关于 $Sf^2e^{j\phi}$ 的共同作用。

基于网络模型的混响产生过程,实际上就是海底散射体散射作用函数与发射信号之间的卷积。由于卷积计算的灵活方便,使本算法在计算时间、空间复杂度上更简单且高效。同时,由于本算法结合了点散射和单元散射原理,使其具有明确的物理意

义，便于人们对混响的产生过程产生一个直观理解。

4 海底混响仿真及结果分析

仿真条件如下，收发合置声呐位于深度为 100 m 的浅海中，距离海底 30m，声速取 1500m/s，声呐方位角束宽 $\Phi=\pi/6$ ，垂直散射系数 $\mu=-27\text{dB}$ ，海水吸收系数 $\beta=0$ ，运动平台速度为 20 kn。选取具有代表性的发射信号分别为 CW 信号(频率为 25 kHz，时长为 4ms)和 LFM 信号(频率为 25 kHz，调频带宽为 5 kHz，时长为 4 ms)，采样频率为 150 kHz。混响起始时间 0.04s，混响时长 0.2 s。仿真结果如下。

图 3 是发射信号及其频谱图。图 4、5 分别为 CW 信号和 LFM 信号基于点散射模型和单元散射模型的仿真结果，及其信号频谱图。与图 3 对比可知，混响信号的频谱与发射信号频谱具有一致性，且体现出了运动带来的多普勒频移 $f_d \approx 330\text{Hz}$ 。图 6 为基于单元散射原理的混响仿真的统计特性图，从图上我们可以总结得到，仿真结果的混响信号统计特性符合基本理论，即其瞬时值服从高斯分布，包络服从瑞利分布。混响的时间相关是用一个混响信号的自相关函数表示的，见图 7。由图 7 分析知，其时间相关半径与信号的带宽成反比。本文分别从仿真信号的统计特性、频率特性和时间自相性三个方面，验证了本仿真方法对基于运动平台的海底混响的仿真有效性。

5 结论

本文提出了一种结合散射原理和网络模型结构

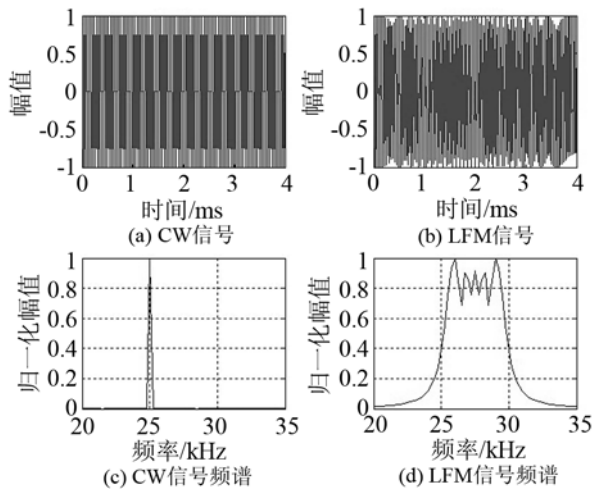


图 3 发射信号及其频谱图
Fig.3 Emission signal and its spectrum

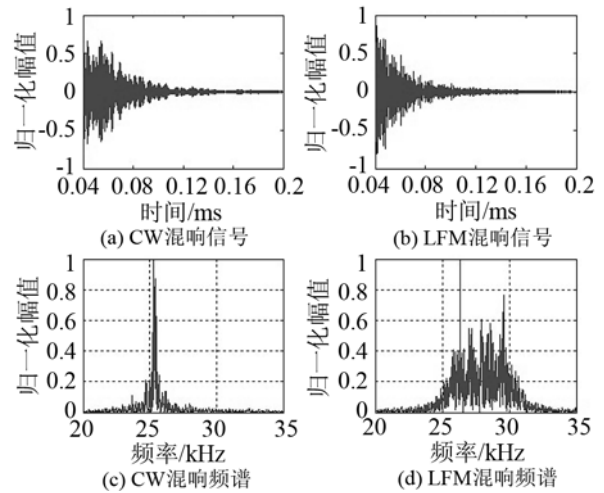


图 4 基于点散射原理的混响仿真
Fig.4 Reverberation simulation of network model based on the point scattering principle

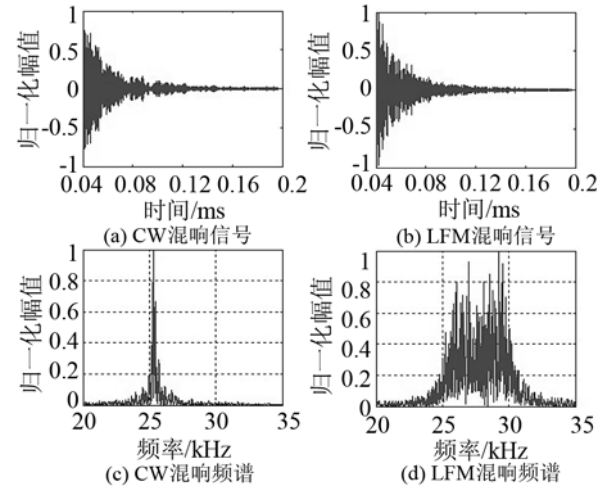


图 5 基于单元散射原理的混响仿真
Fig.5 Reverberation simulation of network model based on the unit scattering principle

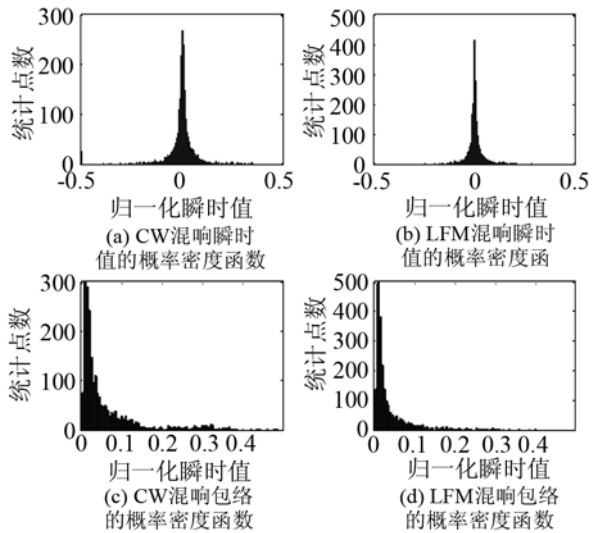


图 6 基于单元散射原理的瞬时值、包络概率分布
Fig.6 Probability distribution of instantaneous value and envelope value based on the unit scattering principle

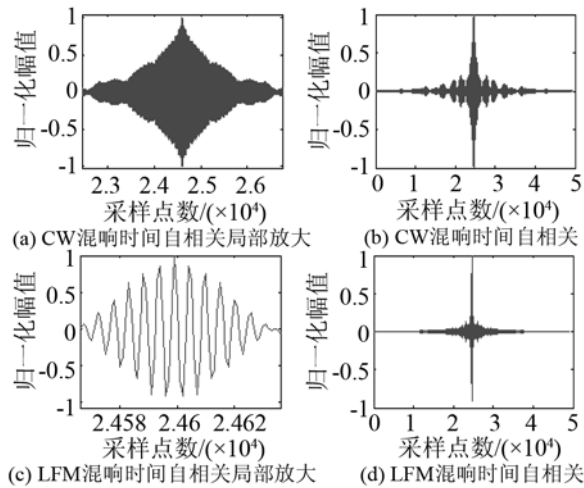


图7 混响时间自相关性

Fig.7 Autocorrelation of reverberation time

的海底混响仿真方法,既符合混响产生的物理机制,同时方法实现便捷。最后本文通过仿真实验,验证了本方法产生的混响信号的瞬时值和包络的概率密度分布、频谱特性以及时间自相关性,证明了本仿真方法对基于运动平台的海底混响的仿真有效性。

参 考 文 献

- [1] 郭熙业, 苏绍璟, 王跃科. 海底混响统计建模与仿真方法研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(7): 940-944.
- [2] SUN Qingyan, WANG Haiyan, SHEN Xiaohong, et al. Research on the Statistical Modeling and Simulation for interface Reverberation[C]// Computer Science and information Technology(ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference. 2010: 566-570.
- [3] 蔡平, 梁国龙, 葛凤翔, 等. 界面混响信号的仿真研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(4): 31-35.
- [4] CAI Ping, LIANG Guolong, GE Fengxiang, et al. Research on the Interface Reverberation Simulation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 21(4): 31-35.
- [5] CHEN Wenjian, SUN hui, ZHANG Minghui, et al. A model for Numerical Simulation Sea Bottom Reverberation Using Time-Space Discretization[C]// 2010 International Conference on Computer Application and System Modelin(ICCASM 2010), 2010: 240-243.
- [6] 朱堃. 主动声呐信息检测原理[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [7] ZHU Ye. Active sonar detection principle[M]. Beijing: Ocean Press, 1990.
- [8] 周晶, 郝保安, 陈亚林, 等. 运动声呐界面混响仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(1): 197-200.
- [9] ZHOU Jing, HAO Bao'an, CHEN Yalin, et al. Research on the Simulation of Interface Reverberation for Moveing Sonar[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(1): 197-200.
- [10] 郭熙业, 苏绍璟, 王跃科, 等. 收发合置情况下海底混响仿真[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(2): 141-145.
- [11] GUO Xiye, SU Shaojing, WANG Yueke, et al. Research on simulating seafloor reverberation in case of monostatic[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(2): 141-145.