

# 基于简正波的浅海混响序列仿真

姚万军, 蔡志明

(海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

**摘要:** 提出了一种基于简正波的混响时间序列仿真方法, 基于运动声源和接收器的简正波声场和混响点散射模型, 推导出了模型的理论公式, 给出了其实现方法和仿真结果, 并就仿真结果进行了混响时间序列幅度瞬时值、包络值的概率分布密度以及时间相关性等统计检验。和理论结果对比表明了该仿真模型的有效性, 可用于浅海低频混响序列的仿真。

**关键词:** 混响序列; 简正波; 点散射模型; 仿真

中图分类号: O421

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0025-04

## Simulation of reverberation sequence in shallow-water based on normal-mode theory

YAO Wan-jun, CAI Zhi-ming

(Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** A method of simulating time sequence of reverberation is presented based on the normal modes theory and the Point-scattering approach. The brief theoretical deduction, realization of the simulation method is given. Then some characters of the reverberation sequence, such as the distribution of probability density of transient amplitude and envelop, the time correlation, are tested. The comparison of the test with the theoretical analysis shows the validity of this method for the simulation of low frequency reverberation time sequence in shallow-water.

**Key words:** reverberation sequence; normal modes; point-scattering models; simulation

## 1 引言

海洋中混响是主动声呐工作的主要干扰, 混响的预报对声呐的使用和设计有着重要的意义。混响强度的仿真大多结合了已有的传播模型, 深海中混响强度的仿真建模较为成熟, 已有的模型大多都是基于射线理论。对于浅海而言, 由于声线传播复杂的多途结构, 混响强度的预报一般不用射线理论, 而是像浅海传播一样, 基于简正波理论进行计算(但浅海近程混响一般还是基于射线理论)<sup>[1,2]</sup>。而对于混响时间序列的仿真而言, 已有的模型则往往对传播以球面或柱面扩展简化处理<sup>[3,5]</sup>, 典型的模型如 REVSIM<sup>[3]</sup>, 它的原理是从声呐系统及平台、海洋环境、散射元特性等参数出发, 计算混响的时变复包络功率谱, 再用 AR 模型拟合此复包络功率谱, 以特定的高斯白噪声驱动此 AR 滤波器, 以产生仿真的混响时间序列, 其中传播按球面扩展处理。本

文提出的基于简正波理论的混响时间序列仿真方法, 对传播模块采用了简正波理论计算, 从而解决了混响时间序列建模中传播损失的计算问题。方法基于混响建模的点散射模型, 基本散射元为环状小网格, 考虑声源和散射元的相对距离、方位以及声源的运动等因素, 对所有散射元散射回波求和则得混响时间序列。海面混响、体积混响和海底混响处理方法上并无本质不同, 本文以海底混响为例进行说明。

## 2 理论推导

首先看运动声源和接收器的简正波声场。设初始时刻声源和接收器相距  $r$ , 深度分别是  $z_s$  和  $z_r$ 。假定二者均做匀速运动, 速度分别是  $v_s$  和  $v_r$ , 深度保持不变; 声源在运动中发射脉冲信号; 海洋为分层介质。则接收脉冲的频谱可以表示为<sup>[6,7]</sup>:

$$P(r+v_r t, z_s, z_r, \omega) = \frac{i}{4\rho(z_s)} \sum_{m=1}^M S(\omega_m) \psi_m(z_s) \times \psi_m(z_r) H_0^1 \left[ k_{rm} r \left( 1 + \frac{v_r}{v_{mg}} \cos \theta_r \right) \right] \quad (1)$$

其中:

收稿日期: 2007-10-12; 修回日期: 2008-02-16

作者简介: 姚万军(1978-),男,湖北公安人,博士研究生,研究方向为水声仿真与建模。

通讯作者: 姚万军, E-mail: ywj2337@21cn.com

$$\omega_m = \omega - k_{r_m}(v_s \cos \theta_s - v_r \cos \theta_r) =$$

$$\omega \left(1 - \frac{v_s}{v_{mp}} \cos \theta_s + \frac{v_r}{v_{mp}} \cos \theta_r\right)$$

$v_{mp}$  和  $v_{mg}$  分别为简正波的相速度和群速度,  $\theta$  为声源或接收器的速度与二者连线的夹角,  $S(\omega)$  为发射信号频谱,  $\rho(z_s)$  为源深度处海水密度,  $\psi_m(z)$  为  $m$  号简正波本征值  $k_m$  对应的本征函数,  $H_0^{(1)}(\cdot)$  为第零阶一类 Hankel 函数。仅考虑源运动, 对 Hankel 函数取远场近似形式, 则:

$$P(r, z_s, z_r, \omega) = \frac{e^{i\pi/4}}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi}} \sum_{m=1}^M S \left[ \omega \left(1 - \frac{v_s}{v_{mp}} \cos \theta_s\right) \right] \times$$

$$\frac{\psi_m(z_s) \psi_m(z_r)}{\sqrt{k_{r_m} r}} e^{ik_{r_m} r} \quad (2)$$

对于海底混响, 角度分量除了水平方位角, 还有垂直俯仰角, 分别设为  $\theta$  和  $\varphi$ 。设散射元  $dA$  的散射方向性函数为  $\xi(\alpha_m, \alpha_n)$ , 把简正波声场分为入射声场和反射声场, 在收发同置的假设下, 利用声场互易原理, 得到  $dA$  在接收器处的散射声场为:

$$P^{rev}(r, z_s, z_r, \omega) =$$

$$\frac{i}{\rho^2(z_s) 8\pi} \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M S \left[ \omega \left(1 - \frac{v_s}{v_{mp}} \cos \theta_s \cos \varphi_s - \frac{v_s}{v_{np}} \cos \theta_s \cos \varphi_s\right) \right] \frac{\psi_m(z_s) A_m(z_b) e^{i\phi_m(z_b)}}{\sqrt{k_{r_m} r}} \times$$

$$e^{ik_{r_m} r} \frac{\psi_n(z_s) A_n(z_b) e^{i\phi_n(z_b)}}{\sqrt{k_{r_n} r}} e^{ik_{r_n} r \left(1 - \frac{v_s}{v_{ng}} \cos \theta_s \cos \varphi_s\right)} \times \xi(\alpha_m, \alpha_n) \quad (3)$$

对式(3)做 IFFT, 可得来自  $dA$  的混响声压表达式:

$$P^{rev}(r, t, \theta_s, \varphi_s) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P^{rev}(r, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (4)$$

假设发射信号为窄带脉冲信号, 中心频率为  $\omega_0$ , 则源信号形式可以写为:  $s(t) = a(t) \exp(-j\omega_0 t)$ 。把式(3)代入式(4), 对本征值  $k_r(\omega)$  在中心频率处展开, 整理得到:

$$P^{rev}(r, t, \theta_s, \varphi_s) =$$

$$\frac{i}{\rho^2(z_s) 8\pi} \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \frac{\psi_m(z_s) A_m(z_b) e^{i\phi_m(z_b)} e^{-\beta_m r}}{\sqrt{k_{r_m}(\omega_0) r}} \times$$

$$\frac{\psi_n(z_s) A_n(z_b) e^{i\phi_n(z_b)} e^{-\beta_n r \left(1 - \frac{v_s}{v_{ng}} \cos \theta_s \cos \varphi_s\right)}}{\sqrt{k_{r_n}(\omega_0) r}} \times$$

$$\xi(\alpha_m, \alpha_n) \times h(t) \quad (5)$$

其中,  $\beta$  为本征值  $kr$  的虚部,  $h(t)$  的形式为:

$$h(t) = \frac{1}{1-\gamma_p} a \left[ \frac{1}{1-\gamma_p} (t - \tau_g) \right] e^{-i\frac{\omega_0}{1-\gamma_p} (t - \tau_p)}$$

$$\tau_p = \frac{r}{v_{mp}} + \frac{r(1-r)}{v_{np}}, \quad r_g = \frac{v_s}{v_{ng}} \cos \theta_s \cos \varphi_s \quad (6)$$

$$\tau_g = \frac{r}{v_{mg}} + \frac{r(1-r)}{v_{ng}}$$

接收到的混响信号是混响区域所有散射元回波的

叠加, 即:

$$P^{rev}(t) = \sum_{i=1}^N p_i(r_i, t, \theta_i, \varphi_i) \quad (7)$$

其中  $N$  为对  $t$  时刻混响有贡献的散射区域中散射元总数。

设  $t$  时刻的海底混响影响区域可以近似为  $[\bar{v}_g(t - \tau_0)/2, \bar{v}_g t/2]$ , 其中  $\bar{v}_g = 2(1/v_{mg} + 1/v_{ng})^{-1}$  为平均群速度,  $\tau_0$  为声源脉冲宽度。设混响仿真时间区间为  $(t_s, t_e)$ , 则总的距离区域为  $[\bar{v}_g(t_s - \tau_0)/2, \bar{v}_g t_e/2]$ 。将整个区域划分为一系列的圆环带, 每个环带又划分为若干面元, 每个面元代表一个散射元, 每个环带中散射元的方位是随机的。散射元划分的数量(即相当于散射元的大小)的选取需要综合考虑计算时间的要求、仿真结果精度以及源频率等因素。声源运动对混响影响区域的影响不予考虑。

散射强度是混响仿真中一个重要的基本参数, 文献[8]对散射强度的影响因素进行了详细的讨论, 并给出了很多经验公式。本文采用的散射强度  $S_b$  按 Lambert 定律计算, 单位面积的散射方向性函数为  $\sqrt{10^{S_b/10}}$ 。为体现散射元散射的变化性, 可同时进行一定的随机幅度相位调制。

利用简正波理论计算近场声场时, 连续谱的影响不能忽略, 否则会造成较大的误差。所以对于近程混响的计算, 必须考虑连续谱的作用, 即必须计算 EJP 割线的分支线积分。常用的处理方法一是直接数值计算分支线积分, 二是引入人工海底把泄漏简正波问题转化为正则 Sturm-Liouville 问题。本文采用另一种方法, 使用 Pekeris 割线, 用高号简正波来近似 EJP 割线的连续谱, 这和方法二在本质上是一样的。

### 3 仿真分析

#### 3.1 混响时间信号仿真

设定发射信号以及海洋环境的相关参数, 根据上面建立的模型, 就能得到仿真的混响时间序列。为此建立如下的海洋环境模型: 海深 100m, 声速分布为负声速梯度, 从海面的 1536m/s 线性变化到海底的 1506m/s, 密度 1000kg/m<sup>3</sup>。海底建模为无限均匀半空间, 压缩声速 1800m/s、衰减 0.4dB/ $\lambda$  ( $\lambda$  为波长), 切变波速 200m/s、衰减 0.6dB/ $\lambda$ , 密度 1500kg/m<sup>3</sup>。声源深度 26m。源信号 1 为脉宽为 0.2s 的 CW 波, 载频 200Hz。源信号 2 为脉宽 0.2s 的 LFM 信号, 载频 200Hz, 调频宽度为 20Hz。声源运动速度为 0。图 1 为这两种信号的仿真混响时间序列, 仿真起始时间为 0.3s, 幅度归一化参考值为

源信号幅值。图 2 为 LFM 信号及对应混响序列的频谱图。

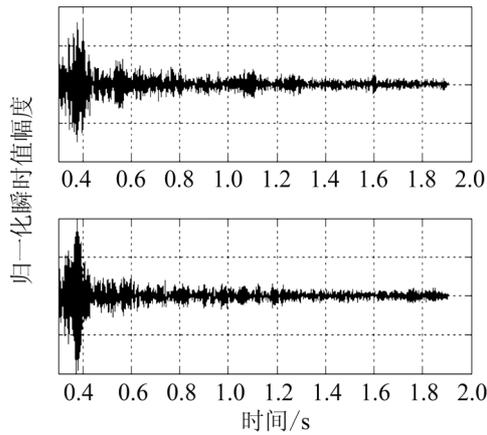


图 1 CW 和 LFM 混响时间序列  
Fig.1 Reverberation sequences for CW and LFM signal

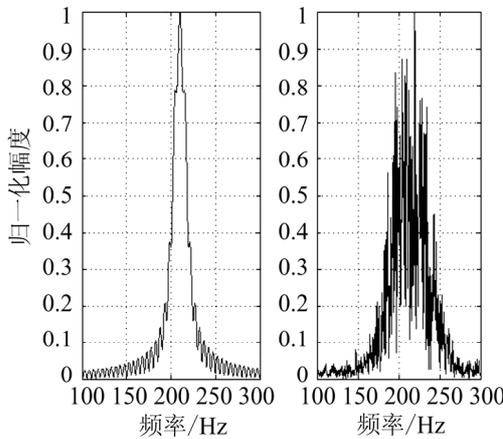


图 2 LFM 信号及对应混响序列频谱  
Fig.2 Frequency spectrums for LFM signal and its reverberation sequence

### 3.2 混响统计量检验

混响序列本质上是一种随机信号。利用上面的模型对混响序列的瞬时幅度值和包络值分布进行分析,图 3、4 分别为 CW 信号对应混响序列的瞬时幅度值和包络分布概率。从图中可见,仿真结果和理论分析吻合较好,即在一般情况下,混响幅度瞬时值服从高斯分布,而包络值服从瑞利分布<sup>[9]</sup>。需要注意的是,混响幅度和包络值服从这两种分布的前提是散射元位置的随机分布以及散射元回波的随机幅调制。当出现散射回波相对确定时(如海底某些固定点),或各散射元回波满足不同分布等情况时,混响幅度与包络和这两种理论分布的一致性将会受到影响。

据理论分析可知,混响信号的时间相关半径与源信号的带宽成反比<sup>[9]</sup>,图 5 和图 6 对 CW 源信号与其对应的混响序列的时间相关性进行了对比。仿真结果显示,二者的时间相关具有很好的一致性,

证明了上述结论。对源信号为 LFM 时的情况进行仿真也得到了同样的结论,但是同时发现,声源的多普勒频移会减弱这种相关性。

## 4 结论

本文提出的基于简正波理论的混响时间序列

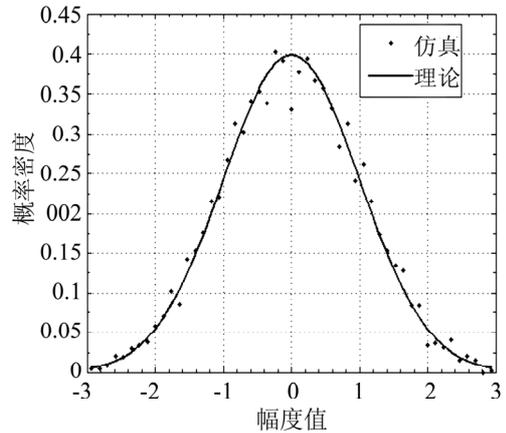


图 3 混响信号瞬时值概率密度  
Fig.3 Probability density of reverberation instantaneous value

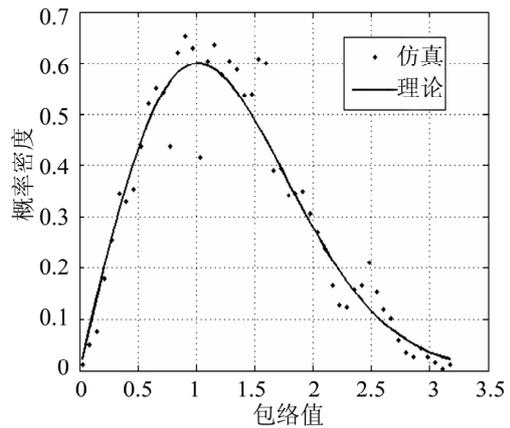


图 4 混响信号包络概率密度  
Fig.4 Probability density of reverberation envelope

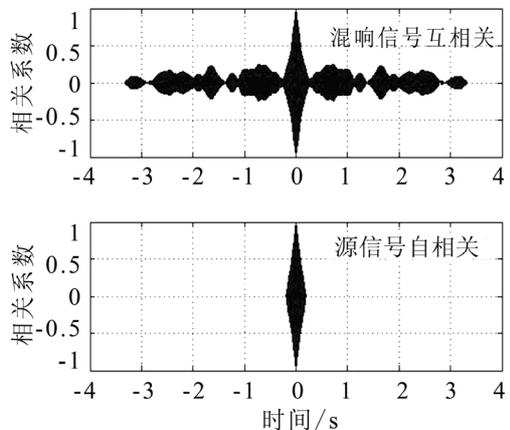


图 5 CW 信号及对应混响序列时间自相关  
Fig.5 The temporal auto-correlative coefficient of the simulated data and the CW source signal

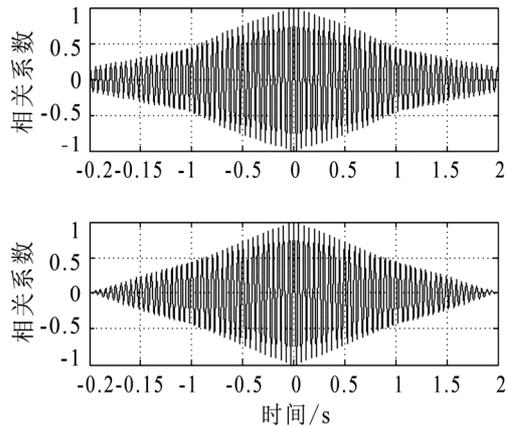


图6 CW信号及对应混响序列时间自相关局部放大

Fig.6 Enlarged part view of temporal auto-correlative coefficient of the simulated data and the CW source signal

仿真方法，其传播损失模块采用了简正波计算的方法，很好地克服了一般混响建模中传播损失简化计算的缺陷，使之很容易适合浅海等海底影响较大、声场参数复杂的海洋环境。文中对仿真的混响时间序列的频谱、瞬时幅度值、包络值以及时间相关特性进行了分析，和理论结果吻合较好，证明了这一仿真模型的有效性。但是，也正是由于简正波理论自身的特点，出于计算效率的考虑，本文建立的这种仿真模型目前仅应用于中低频声源混响序列的建模。同时，在近场，虽然引入了高号简正波，但计算时还会存在一定误差。对于高频或近场的情形，以射线理论代替简正波理论将是一个可行的选择。

## 参 考 文 献

- [1] Ellis D D. A shallow-water normal-mode reverberation model[J]. *J. Acoust. Soc. Am* (S0001-4966), 1995, **97**(5): 2804-2814.
- [2] 张仁和, 李文华, 裘辛方, 等. 浅海中的混响衰减[J]. *声学学报*, 1995, **20**(6): 417-424.  
ZHANG Rrenhe, LI Wenhua, QIU Xinfang, et al. Attenuation of reverberation in shallow water[J]. *Acta Acustica*, 1995, **20**(6): 417-424.
- [3] Luby J C, Lytle D W. Autoregressive modeling of nonstationary multibeam sonar reverberation[J]. *IEEE J. Ocean. Eng* (S0364-9059), 1987, **12**(1): 116-129.
- [4] 方世良. 海洋混响信号的序贯仿真[J]. *声学技术*, 1996, **15**(3): 101-104.  
FANG Shiliang. Sequence simulation of oceanic reverberation signal[J]. *Technical Acoustics*, 1996, **15**(3): 101-104.
- [5] 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.  
CAI Ping, LIANG Guolong, GE Fengxiang, et al. Research on the interface reverberation simulation[J]. *Journal of Haerbin Engineering University*, 2000, **21**(4): 31-35.
- [6] Schmidt H, Kuperman W A. Spectral and modal representations of the doppler-shifted field in ocean waveguides[J]. *J. Acoust. Soc. Am.* (S0001-4966), 1994, **96**(1): 386-395.
- [7] 张仁和, 黄晓砥, 宫在晓. 运动声源和接收器的脉冲简正波传播[J]. *声学学报*, 2004, **29**(4): 308-312.  
ZHANG Renhe, HUANG Xiaodi, GONG Zaixiao. Normal mode propagation of impulsive sound with the moving source and receiver[J]. *Acta Acustica*, 2004, **29**(4): 308-312.
- [8] Urick R J. *Principles of underwater sound*[M]. McGraw-Hill, New York, 1983.
- [9] 奥里雪夫斯基 B B 著, 罗耀杰等译. 海洋混响的统计特性[M], 科学出版社, 1977.  
Olshevskii B B. LUO Yaojie, translate. Statistical characters of the ocean reverberation[M]. Publishing Company of Sciences, 1977.