

基于简正波理论的浅海低频混响时间序列仿真

郑 灏^{1,2†} 李整林^{1,3}

(1 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院研究生院 北京 100190)

(3 中国科学院声学所南海研究站 海口 570105)

摘要 混响场时域信号序列的数值实现对主动声纳目标模拟器研制具有重要意义。本文所述适用于水平变化浅海环境混响时间序列的一种实现方法,基于现有的浅海简正波相干混响理论。所述方法的思路是通过相干散射场随机序列与发射信号的离散卷积来构成混响时域序列,文中以 Pekeris 均匀浅海环境为例,给出了相应的混响时间序列仿真结果,并对仿真结果的频谱特性、统计特性、强度衰减以及垂直相关特性等进行了系统检验。结果表明,由仿真混响时间序列所获得的混响特性与理论结果相符,可用于浅海混响序列的仿真。

关键词 混响, 仿真, 简正波

中图分类号: O427.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2012)04-0272-05

Realization of low frequency reverberation sequence in shallow water based on normal-mode theory

ZHENG Hao^{1,2} LI Zhenglin^{1,3}

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(3 Haikou Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics Chinese Academy of Sciences, Haikou 570105)

Abstract Numerical realization of reverberation time sequence is very important for active sonar simulation. Based on the existing shallow-water coherent reverberation model, a simulation method for low frequency reverberation time sequence in time domain is proposed. The reverberation sequence is realized through discrete convolution of scattering field and emitting signals. The simulation result under Pekeris waveguide is given and the characteristics of reverberation spectrum, statistics, reverberation loss level and vertical correlation are tested through numerical examples. It is shown that the simulation results are in accordance with the theoretical analysis. This method could be used for shallow-water reverberation simulation.

Key words Reverberation, Simulation, Normal-mode

2011-12-28 收稿; 2012-06-04 定稿

作者简介: 郑灏 (1985-), 男, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 研究方向: 水声信号处理。

李整林 (1974-), 男, 研究员, 博士生导师。

† 通讯作者: 郑灏, E-mail: zhenghao@mail.ioa.ac.cn

1 引言

混响是主动声纳特有的一种背景干扰。浅海混响是主动声纳系统探测目标时近程的最主要限制因素。所以,研究混响模型及其特性对主动声纳信号处理具有重要意义。在实际工作中,要获得高质量的混响数据往往比较困难,且海上实验费用昂贵。而混响信号的仿真可以作为替代手段,为主动声纳系统信号处理方法的设计提供参考依据。因此,混响时间序列的仿真对于混响理论以及抗混响干扰技术的研究具有重要意义。

近年来,浅海混响问题的研究已经取得了一些进展,基于简正波理论的混响模型,其物理概念比较清楚,适合于计算浅海中的混响衰减,并考虑了混响的多途效应^[1-3]。在浅海简正波混响理论基础上,得到了浅海混响垂直相关的一般表达式,浅海混响垂直相关随混响时间、频率、收发深度等参数的变化关系也有了更深入的研究^[4-6]。国内学者关于混响时间序列仿真做了一些研究^[7-10],但混响模型建立过于简单、混响衰减及散射强度问题没有考虑、关于混响序列仿真方法方面的描述相对较少。文献^[10]采用简正波方法对海底混响仿真,但其方法只适用于水平海底条件,且现有的仿真方法主要适用于窄带高频发射信号的混响仿真等。国外文献则缺乏混响仿真的详细实现方法。水平缓变浅海的绝热简正波相干混响理论适合于浅海中低频混响计算,为混响时间序列仿真奠定了理论基础^[3]。

本文在已有的简正波海底混响强度计算模型的基础上,将适用于水平缓变浅海的绝热简正波混响理论应用于混响时间序列仿真,可用于仿真浅海环境中不同声源信号形式的低频、宽带发射信号的混响序列。该方法物理意义清晰,且较准确地反映了混响产生的过程。

2 绝热简正波混响理论

如图1所示,声源位于深度 z_s 处,水听器位于深度 z_r 处,假定声传播方向为水平,混响有效区域可以近似为一个半径为 $ct/2$,宽度为 $ct/2$ 的圆环带(c 为声速, τ 为信号脉宽)。混响区域内大量无规则散射体对入射声信号产生的散射波信号在接收点叠加形成了最终的混响信号,即

$$R(t) = \sum_i p_i^{scatt}, \quad (1)$$

其中, p_i^{scatt} 为圆环带内第 i 个散射体产生的散射信号。

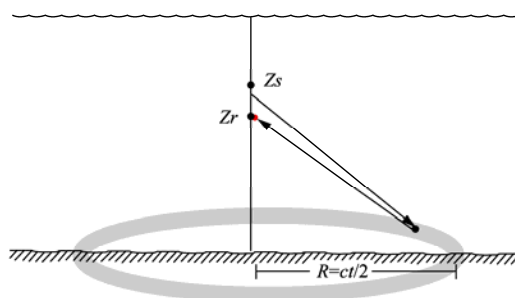


图1 混响区域示意图

混响信号的产生可以划分为图2所示的3个过程:(1)声信号从声源出发经海洋信道传播后入射到散射元处;(2)入射信号经散射元散射产生散射信号;(3)散射信号经海洋信道传播到达接收点。则 t 时刻混响信号可以表示为

$$R(t) = I_0 \iint_{A(t)} \sum_m \sum_n H_m(r_{mn}) H_n(r_{mn}) S_{mn} dA_{mn}, \quad (2)$$

其中, I_0 为声源强度, H_m 为第 m 号简正波从声源到散射体的传输函数, H_n 为第 n 号简正波从散射体到接收器的传输函数, S_{mn} 为第 m 号入射简正波激发第 n 号散射简正波的单元散射强度, r_{mn} 为散射单元 dA_{mn} 到声源或接收器的距离。

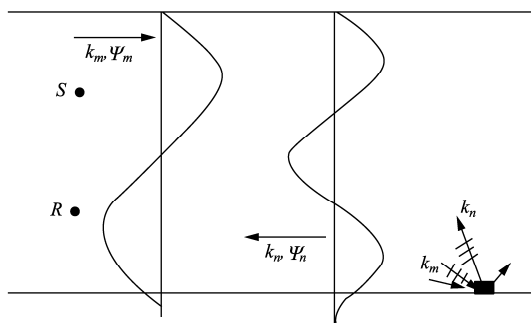


图2 简正波混响示意图

对于水平变化的环境,使用绝热简正波理论计算入射声场和散射声场^[3]。假设海面为自由平面,海底为分段变化的不平海底,介质密度 $\rho(r;z)$ 和声速 $c(r;z)$ 随着距离和深度而变化,则位于深度 z_s 处的一点声源产生的传播声场为

$$p(r, z) \approx \frac{i\sqrt{2\pi}}{\rho(z_s)} e^{-i\pi/4} \sum_m \Psi_m(z_s) \Psi_m(r, z) \frac{e^{i \int_0^r k_m(r) dr}}{\sqrt{\int_0^r k_m(r) dr}}, \quad (3)$$

其中, z_s 为声源深度, $k_m(r)$ 和 $\Psi_m(r, z)$ 分别为距离 r 处第 m 号简正波的本征值和本征函数。(3)式中的声场既包含入射部分又包含反射部分, 不能作为混响入射声场。在海面或海底界面处, 简正波本征函数 $\Psi_m(r, z)$ 可表示为

$$\Psi_m(r, z) = A_m(r, z) \left[e^{-i\varphi_m(r, z)} + \text{Re}^{i\varphi_m(r, z)} \right], \quad (4)$$

其中, $R = |\text{Re}^{i\alpha}|$ 为界面反射系数, $A_m(r, z)$ 为模态函数的幅值, 满足:

$$4|A_m(r, z)|^2 = [\Psi_m(r, z)]^2 + \gamma_m^{-2} (\partial \Psi_m(r, z) / \partial z)^2, \quad (5)$$

$\gamma_m^2(z) = \omega^2 / c^2(z) - k_m^2$, $c(z)$ 是声速, $\varphi_m(r, z)$ 是垂直相位, 可以表示为:

$$\varphi_m(z) = \begin{cases} \tan^{-1} [\gamma_m \Psi_m(r, z) / (\partial \Psi_m(r, z) / \partial z)] + m\pi, & m \text{ 为奇数} \\ \tan^{-1} [\gamma_m \Psi_m(r, z) / (\partial \Psi_m(r, z) / \partial z)] + (m+1)\pi, & m \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (6)$$

综合(3)和(4)式可得第 m 号简正波从声源到达边界 z_b 处的入射声场

$$p_m^{\text{inc}}(r, z_b) \approx \frac{i\sqrt{2\pi}}{\rho(z_s)} e^{-i\pi/4} \Psi_m(z_s) \times A_m(r, z_b) \frac{e^{i \int_0^r k_m(r) dr - \varphi_m(r, z_b)}}{\sqrt{\int_0^r k_m(r) dr}}. \quad (7)$$

由互易定理, 可得第 n 号简正波从散射元到达接收点的散射声场

$$p_n^{\text{scatt}}(r, z_b) \approx \frac{i\sqrt{2\pi}}{\rho(z_s)} e^{-i\pi/4} \Psi_n(z_r) \times A_n(r, z_b) \frac{e^{i \int_0^r k_n(r) dr - \varphi_n(r, z_b)}}{\sqrt{\int_0^r k_n(r) dr}}. \quad (8)$$

对于第 m 号简正波入射激发第 n 号散射简正波的散射系数可表示为

$$g_{mn} = |g_{mn}| e^{i\xi_{mn}}, \quad (9)$$

其中, ξ_{mn} 为散射相位。综合(7)~(9)式, 并将不同号简正波产生的声场叠加求和, 可得接收器处混响声场

$$p_{\text{rev}}(r) \approx \frac{2\pi i}{\rho^2(z_s)} \sum_{m=1}^M \Psi_m(z_s) A_m(r, z_b) \frac{e^{i \int_0^r k_m(r) dr - \varphi_m(r, z_b)}}{\sqrt{\int_0^r k_m(r) dr}} \times \sum_{n=1}^M \Psi_n(z_r) A_n(r, z_b) \frac{e^{i \int_0^r k_n(r) dr - \varphi_n(r, z_b)}}{\sqrt{\int_0^r k_n(r) dr}} \times |g_{mn}| e^{i\xi_{mn}}. \quad (10)$$

把不同号简正波的入射声场和散射声场写成向量形式, 把散射系数 g_{mn} 用矩阵表示, 则混响声场可以表示为矩阵形式

$$p_{\text{rev}}(r) = \mathbf{P}^{\text{inc}} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{P}^{\text{scatt}}. \quad (11)$$

单频条件下的相干混响强度衰减可表示为

$$RL(r, z) \approx -10 \log \left[|p_{\text{rev}}(r)|^2 \pi r c \right]. \quad (12)$$

经一定频带范围内的能量平均后可以得到较为平滑的混响强度衰减

$$RL(r, z) \approx -10 \log \left[\frac{\pi r c}{\Delta f} \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} |p_{\text{rev}}(r)|^2 df \right]. \quad (13)$$

其中, f_0 为中心频率, Δf 为带宽。

结合网络模型^[8], 仿真混响时间序列的产生过程相当于混响声场与发射信号的卷积, 设发射信号的频谱为 $S(\omega)$, 则混响时间序列可表示为

$$R(t) = \frac{1}{2\pi} \int S(\omega) P_{\text{rev}}(r, \omega) e^{-j\omega t} d\omega. \quad (14)$$

在实际仿真过程中, 将混响区域划分为距离接收点为 r_i ($i=1, 2, \dots$) 处的若干圆环带, r_i 与混响时间 t_i 的关系为 $r_i = ct_i/2$, c 为声速。分别求出每一个圆环带产生的混响声场及混响序列, 最后将各处混响序列叠加得到最终的混响时间序列。这种处理使得不同混响时间下的混响场幅度按混响衰减规律减小。同时, 令(9)式中散射系数的相位随机分布, 以保证仿真的混响信号近似为有色、非平稳的随机信号。

3 仿真实现

3.1 混响时间序列仿真

文献[3]已对水平缓变环境下的相干混响模型进行了检验, 本文主要就混响时间序列的数值实现及混响统计特性进行研究。不失一般性, 这里以 Pekeris 均匀浅海波导为例进行仿真。其中, 海底水平均匀, 海深 100m, 等声速剖面, 声速为 1500m/s, 海底密度 1.65g/cm^3 , 海底声速为 1650.0m/s, 海底衰减系数为 $0.35\text{dB}/\lambda$, 散射系数根据 Lambert 定律计算:

$$g_{mn} = \mu \sin \theta_m \sin \theta_n. \quad (15)$$

其中, $10 \log \mu = -27\text{dB}$ 。散射系数相位取 $[0, 2\pi]$ 均匀分布随机相位。

声源深度 50m, 接收水听器深度 70m。以脉宽为 0.25s 的线性调频信号 (LFM) 作为发射信号, 载频 500Hz, 调频宽度为 100Hz。仿真过程中, 采样率为 8192 Hz, 傅里叶反变换的点数为 2048, 将混响区域划分为 80 个圆环带, 每个圆环带产生 0.25s 的混响信号, 将各段信号叠加得到 20s 混响时间序列, 仿真结果如图 3 所示。图 4 给出了发射信号频谱均值与接收的混响信号频谱均值的比较。图 5 是从混响时域信号经 FFT 分析获得的混响衰减曲线。

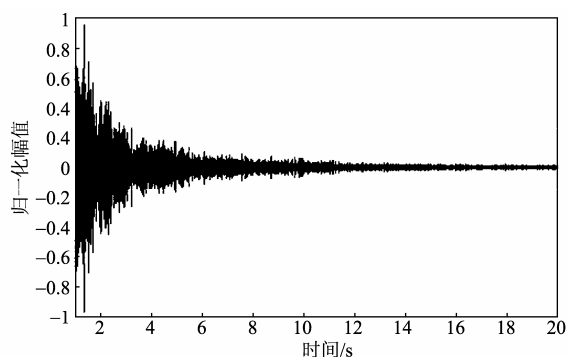


图3 LFM 信号的混响时间序列

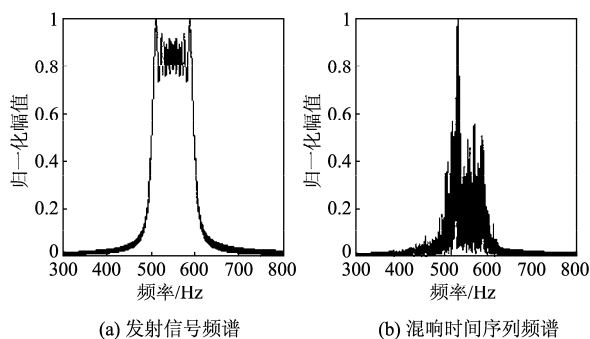


图4 LFM 发射信号与混响时间序列的频谱对比

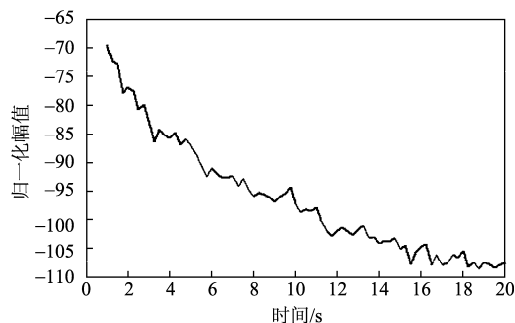


图5 混响强度衰减曲线

3.2 混响序列统计特性检验

混响信号是由大量散射体散射的回波叠加而成, 从本质上讲, 是一种随机信号。根据中心极限定理可知, 当散射体数量足够多时, 混响幅度的瞬时值服从高斯分布, 包络值服从瑞利分布^[11]。但混响是一个有色、非平稳随机过程, 在对混响信号进行统计特性分析之前, 先对其做平稳化处理。将仿真得到的混响信号等分成 n 段, 将每段信号 $s_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 看作是平稳信号, 令该段能量为 E_i , 即 $E_i = \sum_t s_i^2(t)$ 。对 $s_i(t)$ 作如下处理:

$$s_i^{st}(t) = s_i(t) / E_i. \quad (16)$$

将处理后的各段信号 $s_i^{st}(t)$ 重新连接, 得到平稳随机序列 $S(t)$ 。这一过程只是改变了混响信号的平均强度, 其统计特性并未改变。对仿真混响信号做平稳化处理, 分析平稳序列 $S(t)$ 瞬时值各点在 $[-1, 1]$ 的 100 个等分区间内的分布情况, 得到的结果与高斯分布曲线作比较, 如图 6 所示。取平稳序列 $S(t)$ 的包络值, 分析其各点在 $[0, 1]$ 的 100 个等分区间内的分布情况, 得到结果与瑞利分布曲线作比较, 如图 7 所示。由图可以看出, 仿真值与理论值基本一致。

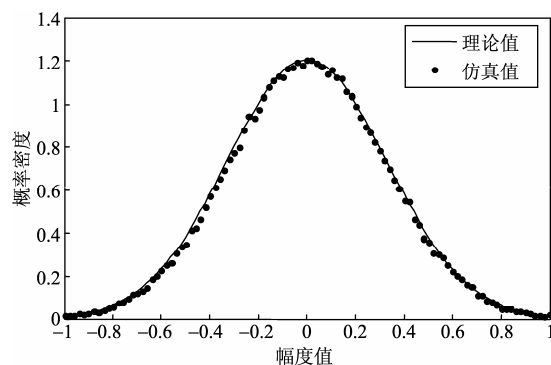


图6 混响序列瞬时值概率密度

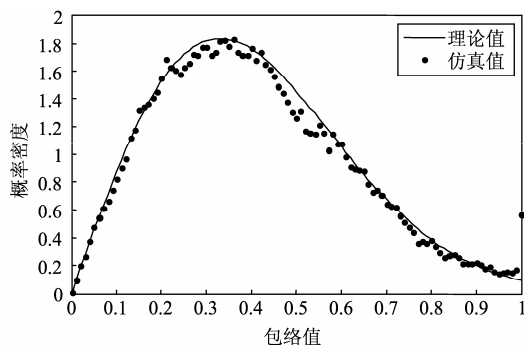


图 7 混响序列包络值概率密度

混响的垂直相关特性是声纳系统抗混响设计的重要物理基础,由相关定义,不同深度 z_1, z_2 处的两个接收器的混响垂直相关可表示为

$$RVC(r, z_1, z_2) = \text{Re} \left(\frac{\sum_f p_{\text{rev}}(r, z_1, z_s) p_{\text{rev}}^*(r, z_2, z_s)}{\sqrt{\sum_f |p_{\text{rev}}(r, z_1, z_s)|^2 \sum_f |p_{\text{rev}}(r, z_2, z_s)|^2}} \right) \quad (17)$$

经理论分析可知,混响信号垂直相关随混响时间 t (散射距离 r) 的增加而增加,随频率 f 的增加而减小^[4]。图 8 分别给出载频为 500 Hz、1000 Hz 和 1500 Hz,调频宽度为 200 Hz,脉宽为 0.25 s 的 LFM 发射信号产生仿真混响序列的垂直相关系数,其中声源深度为 50 m,接收点深度分别为 70 m 和 72 m。可以看出,三条曲线都随时间增加而上升,并且频率越大,垂直相关系数越低。

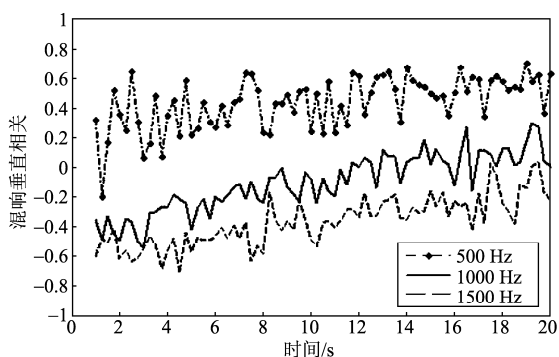


图 8 混响垂直相关随时间、频率变化

4 总结与讨论

本文在水平缓变浅海绝热简正波相干混响理论模型基础上,结合混响网络模型,给出了一种混响时间序列的仿真方法,可用于模拟浅海低频混响场随时间变化特性。对 Pekeris 均匀浅海环境仿真得到的混响序列的频谱、统计特性以及垂直相关等特性进行了检验和分析,结果表明,仿真信号特性与理论值一致,仿真方法可行。文中产生的混响时间序列可供深入研究抗混响技术参考。对于海底倾斜等水平缓变环境的混响场,涉及三维声场,计算量巨大,相应的混响场统计特性更有待进一步研究,这将是我們下一步的工作重点。

参 考 文 献

- [1] 张仁和,金国亮. 浅海平均混响强度的简正波理论[J]. 声学学报, 1984, 9(1): 12-19.
- [2] ELLIS D D. A shallow water normal-mode reverberation model [J]. J. Acoust. Soc. Am, 1995, 97(5): 2804-2814.
- [3] LI Z L, ZHANG R H, LI F H. Coherent reverberation model based on adiabatic normal mode theory in a range dependent shallow water environment [C]. Shallow Water Acoustics, 2010: 300-307.
- [4] 李风华,刘建军. 浅海混响的垂直相干性[J]. 声学学报, 2003, 28(6): 173-178.
- [5] ZHOU J X, ZHANG X Z. Reverberation vertical coherence and sea-bottom geoaoustic inversion in shallow water [J]. IEEE J. Oceanic Eng, 2004, 29(4): 988-999.
- [6] 刘建军,李风华,郭良浩. 浅海混响的垂直相关和海底反射损失与散射强度的反演[J]. 声学学报, 2004, 29(1): 494-503.
- [7] 方世良. 海洋混响信号的序贯仿真[J]. 声学技术, 1996, 15(3): 101-104.
- [8] 葛凤祥,惠俊英,蔡平等. 界面混响信号的仿真研究[J]. 电子信息学报, 2001, 23(12): 1292-1297.
- [9] 王新晓,黄建国,张群飞. 海洋混响仿真技术研究[J]. 声学电子工程, 2002, (3): 27-30.
- [10] 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.
- [11] 奥里雪夫斯基. 海洋混响的统计特性[M], 罗耀杰译. 北京: 科学出版社, 1977: 67-94.