

界面混响信号的仿真研究¹

葛凤翔 惠俊英* 蔡平* 彭应宁

(清华大学电子工程系 北京 100084)

*(哈尔滨工程大学水声工程系 哈尔滨 150001)

摘要 该文研究了基于“网络模型”的界面混响信号仿真,给出了简要的理论介绍、具体实现方法和相应的仿真结果,并对仿真结果进行了诸如统计特性、时空相关特性和频谱特性的检验,检验结果表明,混响信号仿真是成功的。

关键词 网络模型, 混响

中图分类号 TN958.99

1 引言

关于海洋混响信号的仿真方法较多,混响统计理论模型最初是由 Faure 提出的,苏联学者奥里雪夫斯基和美国学者 Middleton 就这一问题作了系统的讨论,并被称为 FOM 混响理论模型^[1]。在此基础上简单的混响信号序列仿真通常是先在混响包络服从瑞利分布,相位服从均匀分布的假设下产生归一化平稳随机混响信号序列,然后按混响信号强度的衰减规律加权来最终产生实际的混响信号序列。由于基阵的运动、指向性和风速等因素均未在模型中体现,因而这种仿真较为粗糙。之后有人把这些参数融入混响信号的时变功率谱中,通过对功率谱的转换以获得混响信号序列^[2],但这种方法在计算上过于复杂。文献[3]在对整个海洋空间积分的基础上,推导了混响仿真信号的时变预测模型,这种方法的缺点是物理概念不很明确。在本仿真中,我们采用物理意义明确的“网络模型”。“网络模型”在很多文献中已有这种提法^[1,4],但真正付诸实现的还比较少,或者只是比较粗糙的实现。究其原因,主要在于他们在建模过程中没有明确影响混响信号的主次因素,导致了模型复杂化。本文给出了一种实现简单的“网络模型”,但却充分考虑了影响混响信号的主要海洋环境因素。本文所提仿真模型的另一大优点是能较方便地实现混响信号空间相关性的检验。

2 网络仿真模型分析

在文献[5]中,混响的定义是:混响是存在于海洋中的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而形成的。“网络模型”正是根据这一定义的思想来建立的。下面给出混响信号“网络模型”的仿真流程图(图1):

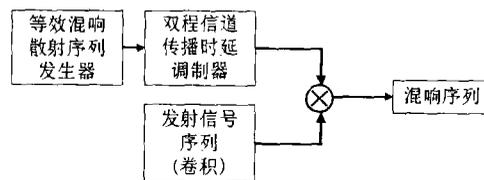


图 1 混响序列仿真流程图

根据上述混响信号仿真的思想,可以得到如下混响信号离散实现的具体方法(图2):

¹ 1999-11-09 收到, 2000-09-14 定稿

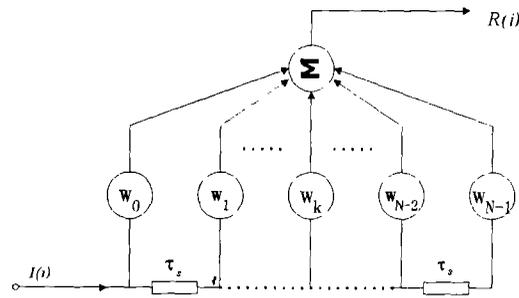


图 2 混响仿真网络模型的实现

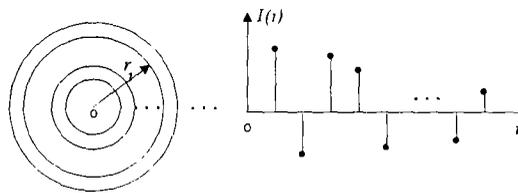


图 3 混响散射环带及等效散射点划分示意图

$$R = W \times I \tag{1}$$

其中 $R(i)$ 表示混响信号序列, 取权函数 $W = S$, 即信号的抽样序列, $I(i)$ 表示第 i 个环带的散射强度, 在这里设定声信号传播损失按球面波规律衰减, 具体如图 3 所示, 图中 O 点为垂直分置的发射和接收水听器的投影; r_i 为环带半径, 可由下式求得

$$\left[(r_i^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} + (r_i^2 + (z \pm d)^2)^{\frac{1}{2}} \right] - \left[(r_{i-1}^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} + (r_{i-1}^2 + (z \pm d)^2)^{\frac{1}{2}} \right] = \frac{cT}{32} \tag{2}$$

式中 z 为发射换能器的位置 (m), d 为接收换能器与发射换能器的间距 (m)。

混响的产生过程, 实际上就是混响散射序列与发射信号之间的卷积, 为减小计算量, 在构造散射序列时对散射环带的宽度以信号脉宽的 $1/32$ 或更多的等时间间隔来划分, 然后在非零散射序列之间插零, 以对信号脉宽 32 等分为例, 插入零点的个数为

$$M = \left(\frac{TF_s}{32} \right) - 1 \tag{3}$$

式中 F_s 为信号的采样频率 (kHz), 其中散射序列中的非零值是一随机序列, 其均值为 0, 方差由揉合了各种海洋环境因素的 ξ_i 决定:

$$\zeta_i = \Gamma[S_s(\theta_i), S_i, \eta_i, b(\theta_i), b'(\theta_i)] \tag{4}$$

其中下标 i 表示第 i 块界面散射面积单元; $S_s(\theta_i)$ 为界面混响散射强度, 取决于海况、底质、掠射角和频率; S_i 是产生界面混响的元散射面积; 而 η_i 则表示按球面波衰减规律的双程传播损失, 是混响信号强度变化的决定性因素; $b'(\theta_i), b(\theta_i)$ 则分别表示收、发指向性函数; 则 $I(i)$ 可表示为

$$I(i) = \sqrt{\xi_i} \cdot X \tag{5}$$

其中随机变量 X 服从 $N(0,1)$ 正态分布.

3 混响信号的仿真

根据与混响信号有关的发射信号和海洋环境参数 (比如: 声源级、发射信号的形式和频带、风速、海底底质等), 我们可以得到相应条件下的混响信号序列. 图 4 给出了一些在不同条件下混响信号的仿真结果, 其中海深为 60m, 接收点位于离海面 30m 海深处, 风速为 20 节, 多普勒频移量 10 节, 混响信号强度按 3~4 倍衰减规律衰减, 海底为同一种底质 (如沙底、岩石底或泥底等):

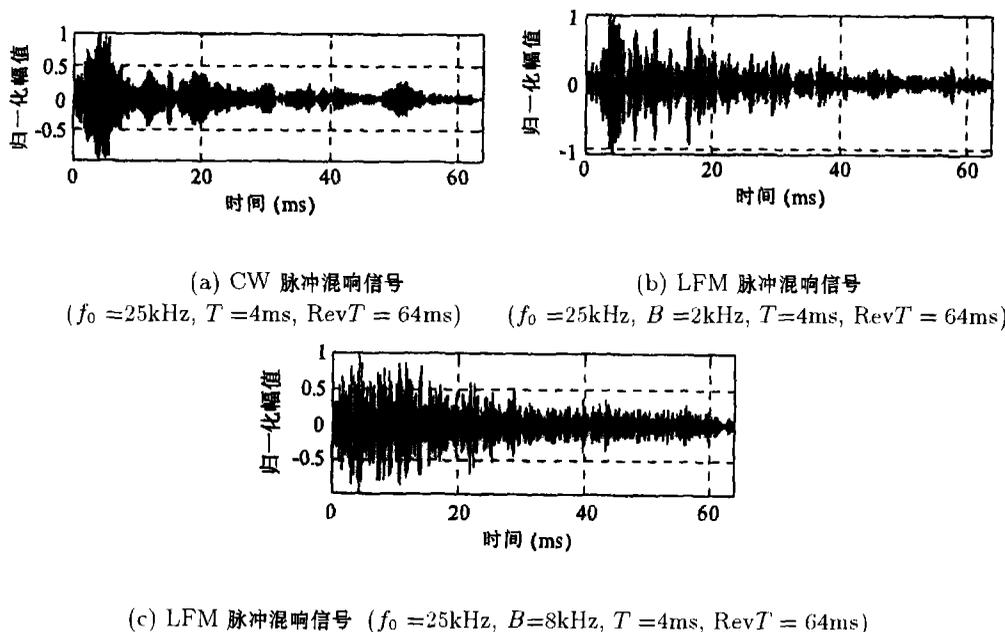


图 4 仿真结果

图中所用符号的定义如下: f_0 : 发射信号中心频率 (kHz), T : 发射信号脉冲宽度 (ms), $\text{Rev}T$: 混响信号宽度 (ms), B : 发射信号带宽 (kHz), Doppler: 多普勒频移量 (kn).

4 仿真混响信号的特性检验

4.1 仿真混响信号概率密度特性检验

图 5(a),5(b) 是经 100 次 Monte-Carlo 仿真得出的混响信号瞬时值和包络的概率密度仿真值与理论值的比较. 仿真结果表明, 两者基本符合理论分析结果, 即混响信号瞬时值符合高斯分布, 包络符合瑞利分布^[5,6].

4.2 仿真混响信号的时间相关特性检验

由图 6、图 7 可以看出, 混响仿真信号的时间相关特性符合理论分析结果, 即混响信号的时间相关半径与发射信号的带宽成反比^[5,6].

4.3 混响仿真信号的空间相关特性检验

所谓混响信号的空间相关性, 就是彼此相距一定距离的两个接收点接收到的混响信号之间的相关性^[5]. 混响信道作为一随机空变信道, 文献 [6] 给出了空间互相关函数的定义:

$$R_{HH}(r-r') = \langle H(f,r) \cdot H^*(f,r') \rangle \quad (6)$$

其中 r, r' 表示两个接收点空间坐标的矢径, $H(f, r), H^*(f, r')$ 分别表示相应参数的混响信号. 在各态历经条件下, 用时间平均代替统计平均. 按接收点空间位置关系, 又可分为水平空间关系和垂直空间关系, 如图 8 所示.

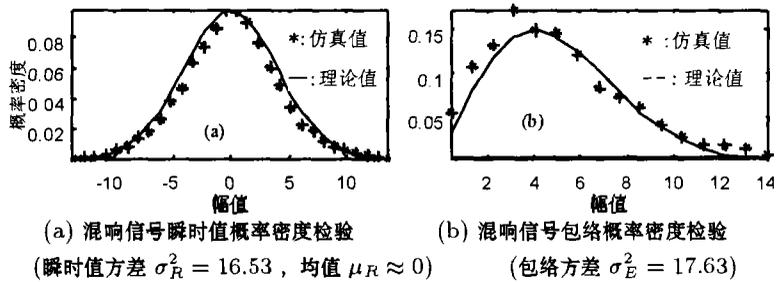


图 5

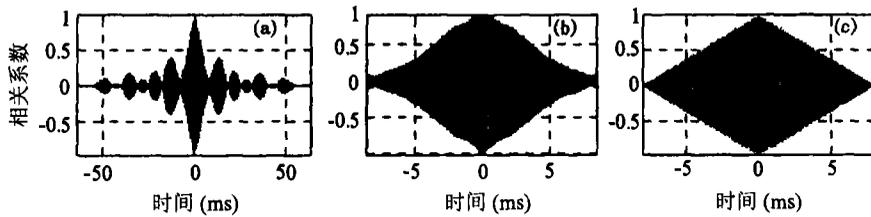


图 6 CW 脉冲及其混响信号的自相关函数
($T=8\text{ms}$, $f_0=20\text{kHz}$, $\text{Rev}T=64\text{ms}$)

(a) 混响信号自相关 (b) 混响信号自相关的局部放大 (c) 发射信号自相关

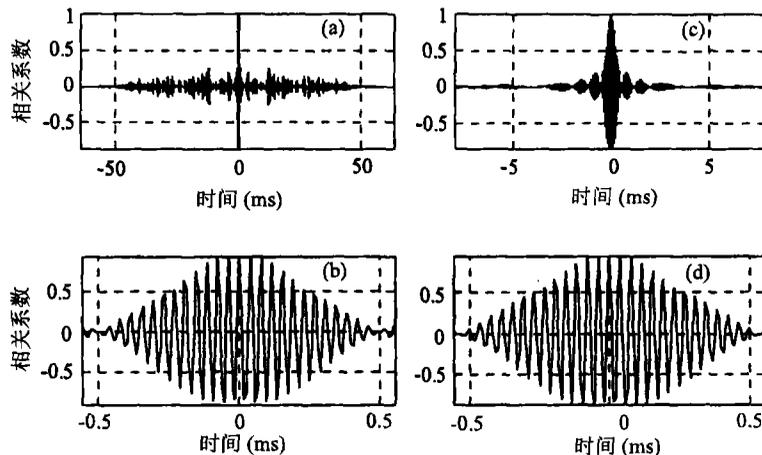


图 7 LFM 脉冲及其混响信号的自相关函数
($T=8\text{ms}$, $f_0=26\text{kHz}$, $B=2\text{kHz}$, $\text{Rev}T=64\text{ms}$)

(a) 混响信号自相关 (c) 发射信号自相关
(b) 混响信号自相关局部放大 (d) 发射信号自相关局部放大

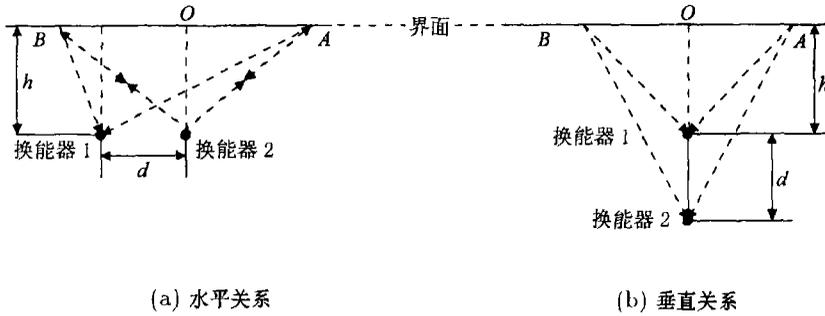


图 8 接收点空间位置关系图

本“网络模型”是基于等时间间隔的元入射信号来确定元散射面积的，因此，在这里可以独立考虑两个接收基元的声程，从而来确定各自的元散射单元。取脉宽为 2ms，载频为 25kHz 的 CW 脉冲信号来研究两个接收点水平放置与垂直放置时，相应接收点接收的混响信号之间的相关性，100 次 Monte-Carlo 仿真的结果示于表 1 和表 2(表中 λ 为发射信号波长)。可以看出，混响仿真信号的空间相关性符合理论分析结果，即混响信号的水平空间相关性随距离的增加衰减很快；而垂直空间相关性随距离的增加衰减较慢。

表 1

水平距离	相关系数
λ	0.8652
2λ	0.5024
3λ	0.2853

表 2

垂直距离	相关系数
5λ	0.8588
10λ	0.7878
15λ	0.7234

4.4 混响仿真信号的频谱特性检验

图 9、图 10 画出了混响信号与发射信号的频谱图。由图 9、图 10 可以看出，仿真结果符合理论分析结果，即混响信号的频谱与发射信号的频谱具有一致性^[5,6]。

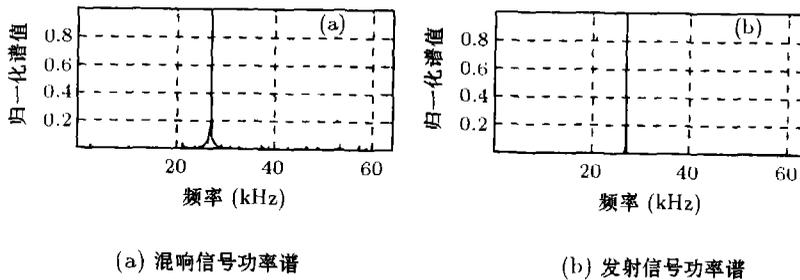
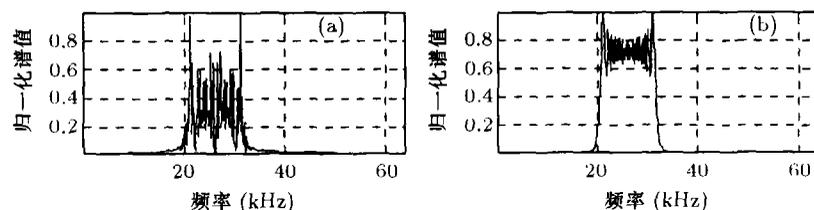


图 9 CW 脉冲信号和混响信号的频谱对比
($f_0 = 27\text{kHz}$, Doppler=3kn)

5 结 论

本文主要完成了水声学中界面混响信号的计算机仿真。并在此基础上，结合混响信号的理论 and 实际情况，对混响仿真信号的特性进行了检验和比较分析，得到了如下结论^[5-8]：(1) 混响信号瞬时值的概率密度分布服从高斯分布，而包络服从瑞利分布。(2) 混响信号和发射信号的自相关函数很接近；混响包络的时间相关半径与发射信号的带宽成反比。(3) 混响信号水平空间相关性随距离增加衰减很快；而垂直空间的相关性则较强。(4) 混响信号和发射信号的频谱具有一致性。检验结果表明，混响信号的仿真是成功的。



(a) 混响信号功率谱

(b) 发射信号功率谱

图 10 LFM 脉冲信号和混响信号的频谱对比

(B = 12kHz, $f_0 = 26$ kHz, Doppler = 0km)

参 考 文 献

- [1] 朱 莹, 编著, 主动声呐信息检测原理, 第一版, 北京, 海洋出版社, 1990, 95-107.
- [2] Hodgkiss, An oceanic reverberation model, IEEE. J. of OE., Apr., 1984, OE-9(2), 63-72.
- [3] 方世良, 海洋混响信号的序贯仿真, 声学技术, 1996, 15(3), 101-104.
- [4] 侯自强, 等著, 声呐信号处理, 第一版, 北京, 海洋出版社, 1986, 65-78.
- [5] B. B. 奥里雪夫斯基著, 罗耀杰, 等译, 海洋混响的统计特性, 第一版, 北京, 科学出版社, 1977, 100-151.
- [6] 惠俊英, 编著, 水下声信道, 第一版, 北京, 国防工业出版社, 1992, 99-109.
- [7] R. J. Urlick, 著, 洪申, 译, 水声原理, 第一版, 哈尔滨, 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990, 190-230.
- [8] 刘伯胜, 等编著, 水声学原理, 第一版, 哈尔滨, 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1992, 187-212.

RESEARCH ON THE INTERFACE REVERBERATION SIMULATION

Ge Fengxiang Hui Junying* Cai Ping* Peng Yuingning

*(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, 100084, China)***(Dept. of Underwater Acoustical Eng., Harbin Eng. University, Harbin 150001, China)*

Abstract A realization of the interface reverberation simulation based on the network model is presented. The brief introduction, main operational steps and simulation results about the interface reverberation are given. Then the statistic characteristics, the time-space correlation and spectrum of the simulated reverberation are tested. The analyzed results show that the simulation based on the network model is successful.

Key words Network model, Reverberation

- 葛凤翔: 男, 1974 年生, 博士生, 主要研究方向是雷达和声纳信号处理等。
 惠俊英: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要的研究方向是水声物理和声纳信号处理等。
 蔡 平: 男, 1949 年生, 教授, 主要的研究方向是水声物理和声纳信号处理等。
 彭应宁: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是谱估计, 自适应滤波, 阵列信号处理, 雷达信号处理, 微光图像信号处理等。