

# 一种改进的基于扩频信号的混响产生模型<sup>\*</sup>

宁万正<sup>1</sup>, 王海燕<sup>1</sup>, 申晓红<sup>1</sup>, 宁焕梅<sup>2</sup>, 孙青岩<sup>1</sup>  
 (1.西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072;  
 2.东营市河口区第一中学, 山东 东营 257200)

**摘要:** 提出了一种某一时刻有贡献的散射体数目随时间变化的方法, 并将对散射信号的求和转换为对信号与散射特性函数的卷积, 简化了计算方法。仿真中, 利用扩频信号作为发射信号对海面混响进行了模拟, 对比分析了混响的频谱与发射信号频谱之间的关系, 验证了混响瞬时值和幅值包络的分布函数。仿真和分析结果表明, 混响模型可以有效地模拟实际海洋混响。

**关键词:** 混响; 单元散射模型; 扩频信号; 频谱; 统计特性

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)01-0073-03

## An improved reverberation model based on spread spectrum signal

Ning Wanzheng<sup>1</sup>, Wang Haiyan<sup>1</sup>, Shen Xiaohong<sup>1</sup>, Ning Huanmei<sup>2</sup>, Sun Qingyan<sup>1</sup>  
 (1.College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
 2.No.1 Middle School of He Kou, Dongying 257200, China)

**Abstract:** In modeling process, a method that a number of contributing scatters changing with time is put forward. The sum of scattering signals is converted to convolution between transmitted signal and scattering signal, which simplifies the calculation. In the computer simulation, using the spread spectrum signal, the surface reverberation is imitated. The relationship between the transmitted signal spectrum and the reverberation spectrum is contrasted, and the distribution functions of reverberation values and envelope amplitudes are proved. Simulation and analysis results confirm the established model can effectively be imitated actual ocean reverberation.

**Key words:** reverberation; unit scattering model; spread spectrum signal; frequency spectrum; statistical property

主动目标探测系统中, 利用目标回波信号探测工作在水中或水面上的物体, 从而完成对目标的跟踪及定位。在探测过程中, 回波信号除受海洋环境噪声的影响外, 还受到混响的干扰, 尤其在近距离探测时, 混响是回波信号的主要干扰源<sup>[1-2]</sup>。了解混响的特性是研究抗混响信号处理方法和评价目标探测系统性能的基础, 对实测混响的分析是获取其特性的一种有效手段, 然而, 通常情况下获得实际海洋环境中的混响需要进行海试实验, 这样会付出高昂的代价。因此声纳工作者在研究混响信号抑制算法时采用数学方法对混响进行建模与仿真, 用其替代实测混响数据。

长期以来, 国内外学者对海洋混响做了大量的研究。参考文献[3]利用高斯白噪声通过带通滤波器与预先设计的混响包络函数相乘得到混响, 这种方法产生的

混响瞬时值和幅值显然能够服从混响统计学认为的分布特性, 但混响和信号之间的密切关系没有体现出来。混响逐点模拟的理论模型主要有单元散射模型和点散射模型, 其中单元散射模型应用比较广泛<sup>[4]</sup>。但是在该模型中都设定在每一时刻有贡献散射体的个数相同, 这与实际并不相符。本文在单元散射模型理论的基础上, 提出了一种某一时刻有贡献的散射体个数随时间的不同而变化的方法, 并利用扩频信号进行了海面混响仿真。该方法操作方便, 易于实现, 为研究抗混响信号处理和目标探测提供了便利条件。

### 1 混响统计理论

混响是由海洋中大量无规则的散射体产生的散射波在接收点叠加而成。由于海洋中大量的散射体都按照各自的规律分布在海水介质中, 它们距声源和接收机的距离有近有远, 入射声波到达这些散射体的时刻也有先有后,

\* 基金项目: 国家科技重大专项海洋深水油气田开发工程(2008ZX05026)

## 技术与方法 Technique and Method

同一时刻到达接收机的散射波只来自有贡献区域内的散射体,这些散射波的总和构成了该时刻的混响信号。混响统计理论认为,一般混响过程的单元散射模型可表示为:

$$R(t) = \sum_{i=1}^N a(t_i) v(t-t_i) \quad (1)$$

其中  $a(t_i)$  是第  $i$  个散射体的散射波的随机幅度,函数  $v(t-t_i)$  表示单个散射声波的形状,  $N$  为  $t$  时刻有贡献的散射体的个数。

### 2 混响模型的建立

混响是一个复杂的随机过程,它受到多种因素的影响,对其进行理论分析与模拟时,需要忽略某些次要因素,即简化混响的产生模型。本文在混响建模时做了如下假设:

- (1) 声散射波沿直线传播;
- (2) 传播损失按球面波扩展损失计算;
- (3) 传播过程中不考虑多径干扰;
- (4) 不考虑二次散射;
- (5) 海水中声速不变。

界面混响的单元散射模型如下:在某一时刻  $t_i$ ,对混响有贡献的区域如图 1 所示的圆环,圆环内有效散射体个数为  $N$ 。图 1 中,点  $M$  既是发射端,也是接收端。它位于海中,距离海面的距离为  $h$ ,  $MA$  长度为  $r_i$ ,散射波波数为  $k=2\pi f/c$ ,其中  $f$  为信号的瞬时频率,  $c$  为海水声速。设第  $n$  个散射体的散射系数为  $R_{in}=a_n e^{j\psi_n}$ ,  $1 \leq n \leq N$ ,则  $t_i$  时刻散射特性函数为:

$$P(t_i) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_i} e^{-jkr} R_{in} \frac{1}{r_i} e^{-ikr_i} \quad (2)$$

化简得:

$$P(t_i) = \frac{1}{r_i^2} \sum_{n=1}^N e^{-j2kr} a_n e^{j\psi_n} \quad (3)$$

在实际环境中,随着观测时间的延长,对混响有贡献的区域逐渐扩大,其有效散射体个数也在增多。传统的单元散射模型中,固定散射体个数的方法显然不符合实际,从而导致混响的模拟效果不够理想。某一时刻,有效散射体的数量与该时刻有贡献的区域面积成正比。如果假定单位面积的散射体个数一定,那么就可以确定在不同时刻对应的不同区域下散射体的数目。改进的单元散射模型如下:

图 1 中,  $MA$  的长度  $r_{MA}=ct_i/2$ ,  $MB$  的长度为  $r_{MB}=c(t_i-T)/2$ ,其中,  $T$  为发射信号的脉冲宽度,根据直角三角形性质,得到  $OA$ 、 $OB$  的长度分别为:

$d_{OA} = \sqrt{r_{MA}^2 - h^2}$ ,  $d_{OB} = \sqrt{r_{MB}^2 - h^2}$ ,则圆环面积  $S_i = \pi(d_{OA}^2 - d_{OB}^2)$ ,设单位面积内有贡献的散射体个数为  $N$ ,则  $t_i$  时刻第  $i$  个圆环有贡献的散射体个数为  $N_i = [S_i \times N]$ 。于是式(3)变为:

$$P(t_i) = \frac{1}{r_i^2} \sum_{n=1}^{N_i} e^{-j2kr} a_n e^{j\psi_n} \quad (4)$$

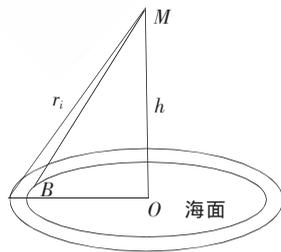


图 1 混响建模几何图

混响的产生过程实际上在不同时刻,所有有贡献的散射体的回波在接收端的再次叠加,也可以看作是混响散射特性函数与发射信号之间的卷积。假设发射信号为  $s(t)$ ,则混响可以表述为:

$$R(t) = s(t) \otimes P(t_i) \quad (5)$$

### 3 扩频信号的产生

主动目标探测时,为了适应探测系统需求和增加系统隐蔽性,通常需要在较低的信混比下进行工作。根据香农容量定理,增加发射信号的带宽可以保证信道的传输容量,扩频信号就是通过一定的编码方式,将有效信息变换成类似高斯白噪声序列,再进行载波调制,从而达到增加信号带宽的目的。由于扩频序列具有噪声特性,因此扩频信号增加了探测系统的隐蔽性<sup>[5]</sup>。

图 2 是直接扩频信号的产生原理框图。采用伪随机码序列( $m$ 序列)作为扩频函数,首先将  $m$  序列通过编码器编码,然后对载波进行 PSK 调制,得到的发射信号即为扩频信号。本文采用  $m$  序列的本原多项式为  $x^8+x^4+x^3+x^2+1$ ,载波信号是幅值为 1,中心频率为 20 kHz 的正弦波信号,信号持续时间  $T=0.025$  s,信号的采样频率为 120 kHz。图 3 为扩频信号的频谱,从图中可以看出,载波经过扩频以后,信号频带以 20 kHz 为中心,向左右展宽 10 kHz。

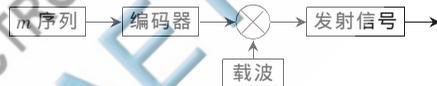


图 2 扩频信号产生原理框图

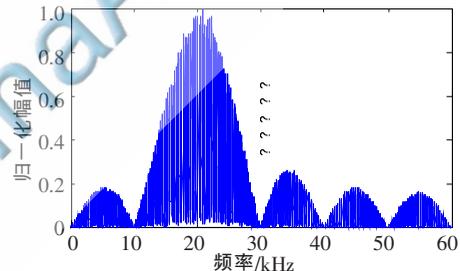


图 3 扩频信号频谱

### 4 混响的仿真与分析

假设海面距离接收机的距离  $h=30$  m,海水中声速  $c=1500$  m/s,则信号到达海面并返回所需时间为 0.04 s。假设散射体的散射系数  $a_n$  和瞬时相位  $\psi_n$  都是服从均匀分布的随机数,且  $0 \leq \psi_n \leq 2\pi$ ,  $0 \leq a_n \leq 1$ 。采用扩频信号作为发射信号,发射信号幅值  $A=1$ ,对混响进行仿真,产生的混响如图 4 所示。从图 4 可以看出,整体上混响强度随着时间的增长逐渐衰减,但局部起伏较大。图 5 为混响的频谱,对比图 3 可以看出,混响的频谱与发射信号的频谱相似,相对于扩频信号带宽,混响的扩展频带可以忽略。

### 5 模型验证

混响统计学认为混响的瞬时值服从高斯分布,包络近似服从瑞利分布<sup>[1]</sup>。

#### 5.1 混响瞬时值

混响瞬时值服从高斯分布,其概率密度函数为:

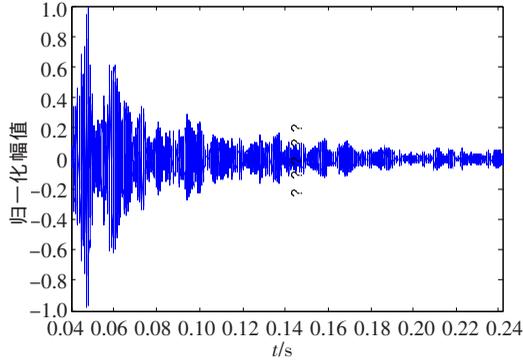


图4 混响时域波形

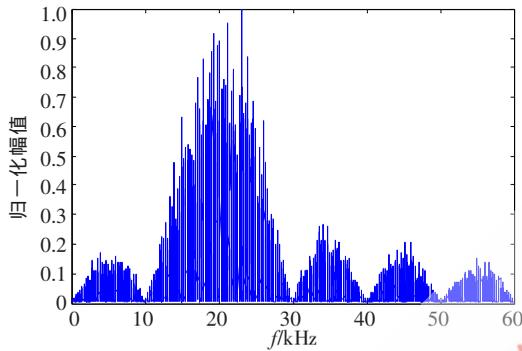


图5 混响频谱

$$f(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_V} \exp\left(-\frac{V^2}{2\sigma_V^2}\right) \quad (6)$$

其中,  $\sigma_V$  是瞬时值  $V$  的方差。图6是对扩频信号产生的混响的瞬时值做的统计直方图(统计总数为24600, 瞬时值划分为500等份), 可以看出混响瞬时值近似服从高斯分布。

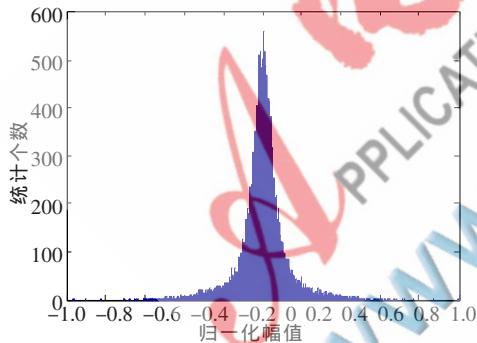


图6 混响瞬时值概率密度

## 5.2 混响曲线包络

为了讨论混响振幅(混响曲线包络)的分布规律, 将混响表示为如下形式:

$$V(t) = E(t) \cos[\omega t + \varphi(t)] \quad (7)$$

其中,  $E(t)$  是混响的慢变包络,  $\varphi(t)$  是混响的相位。可以证明: 凡由大量幅值几乎相同, 而相位在  $0 \sim 2\pi$  内均匀分布的信号叠加后得到的和信号, 其振幅服从瑞利分布规律, 所以振幅分布的概率密度函数表示如下:

$$f(E) = \frac{E}{\sigma_E^2} \exp\left(-\frac{E^2}{2\sigma_E^2}\right) \quad (8)$$

其中,  $\sigma_E^2$  是混响的方差。由式(8)可以得出瑞利分布的

如下参数:

$$\text{平均值 } E = \int_0^{\infty} E f(E) dE = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_V \quad (9)$$

$$\text{平均功率(均方值)} \bar{E}^2 = \int_0^{\infty} E^2 f(E) dE = 2\sigma_V^2 \quad (10)$$

混响包络平方  $J=E^2$  的概率密度  $f(J)$ :

$$f(J) = \left(\frac{1}{2\sigma_V^2}\right) \exp\left(-\frac{J}{2\sigma_V^2}\right) \quad (11)$$

$$\text{起伏率 } \eta = \left[\frac{\bar{E}^2 - (E)^2}{(E)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \times 100\% \approx 52\% \quad (12)$$

从式(12)可以看到, 混响过程不仅围绕其平均衰减曲线作随机起伏, 而且起伏较大, 这一点可以从图4中混响时域序列得到验证。图7是对扩频信号产生的混响的幅值做的统计直方图(统计总数为24600, 瞬时值划分为500等份), 可以看出混响幅值近似服从瑞利分布。

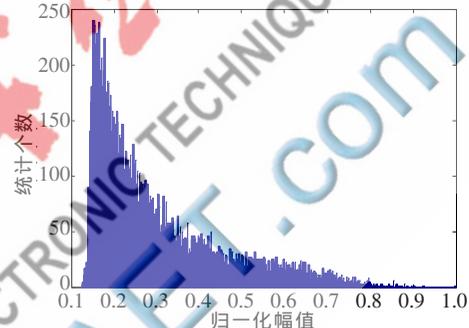


图7 混响幅值概率密度

本文根据混响统计理论, 改进了单元散射模型, 建立了海面混响产生模型, 利用直接扩频信号作为发射信号对模型进行了仿真。通过对混响的频谱的分析, 以及混响瞬时值、幅值的分布特性的验证, 本文所建模型准确有效, 能够模拟实际的海洋混响。用同样的建模方法可以模拟海底混响, 将有贡献的区域由圆环变为球壳, 该模型同样可以模拟体积混响。

## 参考文献

- [1] 刘伯胜, 雷家煌. 水声学原理(第二版)[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [2] 吴玮, 王海燕, 申晓红, 等. 基于AR模型的自适应浮动门限检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(11): 2499-2501.
- [3] 王新晓, 黄建国, 张群飞. 海洋混响仿真技术研究[J]. 声学与电子工程, 2002(3): 27-30.
- [4] 王美娜. 关于混响信号建模及时空统计规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [5] 蔡晓哲. 直接序列的扩频信号检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.

(收稿日期: 2011-07-14)

## 作者简介:

宁万正, 男, 1985年生, 硕士, 主要研究方向: 水声信号检测与处理。