

主动声纳混响模拟及性能分析*

刘建萍 凌国民 许钢灿

(中国船舶重工集团公司第 715 研究所 杭州 310012)

摘要 根据混响的统计特性和信号的谱特性,对主动声纳典型信号的混响进行仿真,结合试验数据对仿真结果进行对比检验,并结合不同的信号检测方法,用仿真数据与海试实录数据进行抑制混响的能力分析,证明提出的混响仿真方法对主动声纳设计的实用性。

关键词 混响;模型;主动声纳;仿真

中图分类号 TN929.3

Reverberation Simulation of Active Sonar and
its Performance Analysis

Liu Jianping Ling Guomin Xu Gangcan

(715th Research Institute of CSIC, Hangzhou 310012)

Abstract Based on the reverberation statistical characteristic and signal spectrum property, giving the reverberation simulation result of typical active sonar signal, comparing the simulation reverberation with the other one made by record sea trial data. Then using the simulated and sea trial data, analyzing two typical signal reverberation suppressing capability by combining with these two different signal detecting methods. The conclusion proves this reverberation simulation method for the active sonar design is practicable and applicable.

Key words reverberation, model, active sonar, simulation

Class Number TN929.3

1 引言

混响是主动声纳的主要干扰之一,对于海洋信道,特别是在浅海环境下,它是引起主动声纳虚警的主要原因^[1~3]。因此对于主动声纳设计而言,混响是要考虑的重要因素之一。混响仿真技术是主动声纳设计的重要工具。

混响建模是仿真的基础,但要建立精确的数学模型存在两个难点,一是缺乏求解复杂边界条件的分析工具;二是难以辨别和测量影响混响过程的所有参数^[4]。

因此要建立精确的混响仿真算法是难以实现的,本文从实用的观点出发,研究一种简便的混响仿真算法。

首先,考虑到混响是一随机过程,我们用典型的混响分布特性来逼近;同时,混响是由发射波形引起的,我们根据发射信号的谱并结合多普勒效应来模拟混响的谱特性。在此基础上形成了混响仿真信号。这种方法具有简单实用的优点,可作为主动声纳设计的一种有用工具。

本文还对仿真结果进行了特性分析与实录数据对比,验证其可用性。

* 收稿日期:2008 年 11 月 19 日,修回日期:2008 年 12 月 16 日

作者简介:刘建萍,女,硕士研究生,研究方向:水声信号处理。

2 典型信号的混响仿真

根据 Middleton 提出的混响统计模型^[5], 设声源发出的窄带脉冲信号为 $s(t)$, 其复数形式为 $|s_0(t)|e^{j\varphi(t)}$, 那么 t 时刻的混响声压可以表示成

$$p(t) = \sum_{n=1}^N g(r_n) f(r_n) |\alpha_n| |s_0(t - t_n)| \cdot e^{j[\omega_0(t-t_n) + \varphi(t-t_n) + \varphi_n]} \tag{1}$$

其中, $g(r_n)$ 是位于 r_n 处的微元 Δv_n 中散射体的个数, 是取值为 0 或 1 的随机变量; $f(r_n)$ 表示 Δv_n 中散射体散射回波的双程传播衰减因子, 取 $f(r_n) = e^{-\alpha}$, $\alpha = 0.5 \sim 1.5$; t_n 为该回波到达的时刻; N 是对时刻 t 有贡献的散射空间微元的总数。

通过计算可知, 上述 $p(t)$ 由于其实部、虚部满足零均值的高斯分布, 所以其振幅 $|p(t)|$ 就服从瑞利分布。

据此, 同时根据典型平台的谱扩展规律^[6]对混响包络谱作调整, 提出如图 1 所示的混响仿真框图:

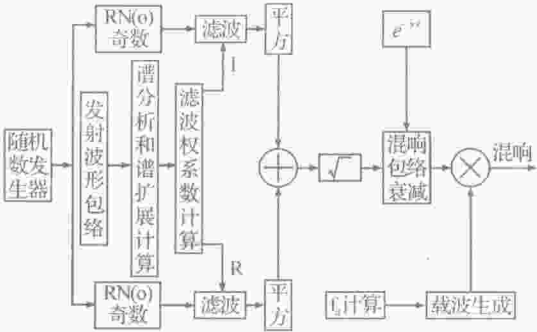
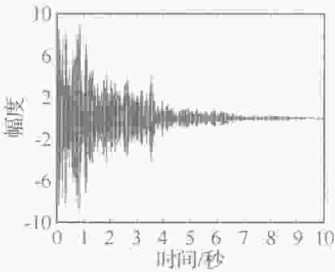
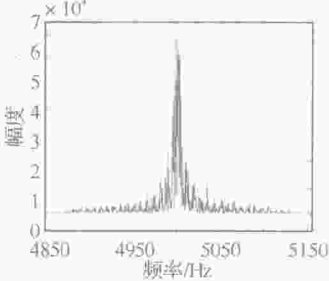


图 1 混响的仿真框图

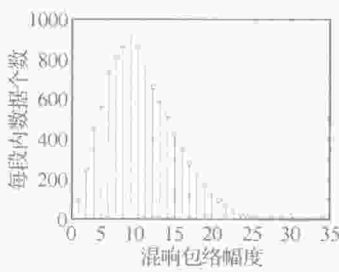
3 CW 信号与 HFM 信号的混响仿真



(a) CW 信号混响时域波形图



(b) CW 信号混响频谱图



(c) CW 信号混响包络统计分布图

图 2 CW 信号仿真图

由图 2 可以看出, 仿真的 CW 信号混响的中心频率在 5000Hz, 带宽大概 8Hz, 混响的包络统计满足瑞利分布, 符合仿真的要求。

3.2 HFM 信号的混响仿真

同样根据图 1, HFM 信号混响的具体仿真步骤如下:

3.1 CW 信号的混响仿真

根据图 1, CW 信号混响的具体仿真步骤如下:

- 1) 生成两个独立的随机数
 - 2) 随机数与信号的包络卷积求出混响包络
- 卷积表达式为:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{M-1} x[k]h[n-k] \tag{2}$$

其中, $x[n]$ 为奇数或偶数随机数, $h[n]$ 为 CW 信号包络的响应函数, 对矩形包络, 也可以写成:

$$h[n] = u[n] - u[n-1], 0 \leq n \leq M \tag{3}$$

所以

$$y[n] = x[n] * (u[n] - u[n-1]) = \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k], 0 \leq n \leq M \tag{4}$$

其中, $u[n]$ 为单位阶跃, 即 $u[n] = \begin{cases} 1, n \geq 0 \\ 0, n < 0 \end{cases}$

滑动平均的表达式:

$$h[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k], 0 \leq n \leq M \tag{5}$$

式(4)结果与式(5)的滑动平均表达式仅相差一个系数 $1/M$, 所以, 卷积也可以用滑动平均实现。

3) 混响包络的载波调制

例如, 当 CW 信号中心频率 $f_0 = 5000\text{Hz}$, 信号脉宽 $T = 200\text{ms}$, 衰减因子 $\alpha = 0.5$, 多普勒扩展为 1 节时, 仿真的 CW 信号混响时域波形图、混响频谱图以及混响包络的统计分布图如图 2, 其中混响包络统计样本个数为 10000。

- 1) 生成两个独立的随机数
 - 2) 随机数与信号的包络卷积求出混响复包络
- 卷积表达式为:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{M-1} x[k]h[n-k] \tag{6}$$

其中, $x[n]$ 为奇数或偶数随机数, $h[n]$ 为 HFM 信

号包络的响应函数。

3) 混响包络的载波调制

例如,当 HFM 信号中心频率 $f_0=5000\text{Hz}$,脉宽 $T=200\text{ms}$,衰减因子 $\alpha=0.5$,带宽 $B=200\text{Hz}$,

仿真的 HFM 信号的混响时域波形图、混响频谱图以及混响包络统计分布图如图 3,其中混响包络统计样本个数为 10000。

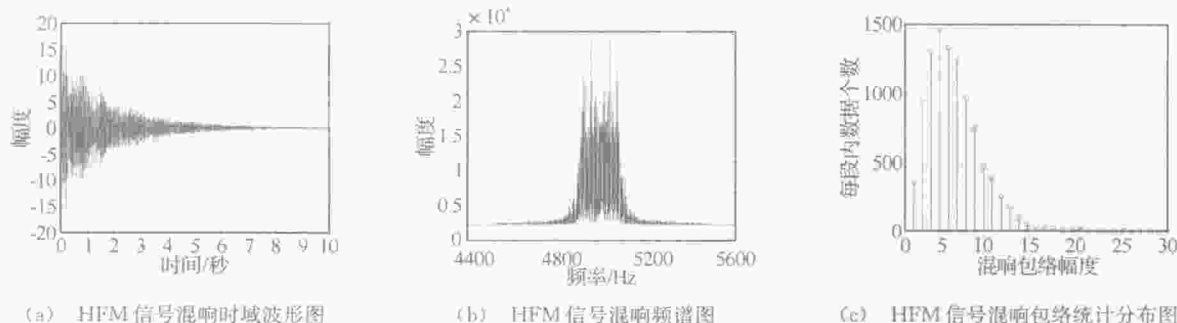


图 3 HFM 信号仿真图

由图 3 可以看出,仿真的 HFM 信号混响的中心频率在 5000Hz ,带宽大概是 200Hz ,混响包络的统计分布满足瑞利分布,符合仿真的要求。

3.3 海试数据的混响分析

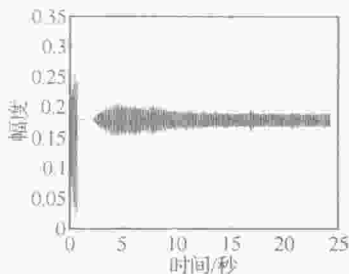


图 4 海试数据时域波形图

实际混响数据取自 40 米海深海域,数据的时域波形如图 4,该数据已经过时间增益控制 (TVG) 放大,开始时 TVG 控制达 -60dB ,然后逐步释

放,幅度上与仿真信号有一定的差别。从图 4 可以看出整个数据最前边是串漏信号,接着是混响,12 秒以后以噪声为主,约 17 秒处出现了一个回波。

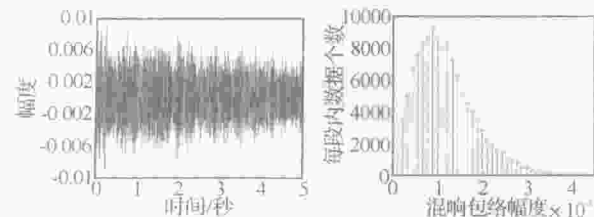


图 5(a) 海试数据 CW 信号混响时域波形图 图 5(b) 海试数据 CW 信号混响包络统计分布图

海试数据 CW 信号混响的时域波形图和混响包络统计分布图如图 5,其中混响包络统计样本个数为 120000。图 5 中的混响是通过截取图 4 中 5 秒后的混响数据(截取长度为 5 秒),再通过带宽 500Hz 、中心频率与 CW 信号频率相同的带通滤波得到的,由于数据受时间增益控制的影响,其衰减规律与仿真的结果有一定的差别。海试数据 HFM 信号混响的时域波形图和混响包络统计分布图如

图 6,其中混响包络统计样本个数为 120000。图 6 中的混响采用与 CW 信号相同的数据,再通过带宽 500Hz 、中心频率与 HFM 相同的带通滤波得到的。

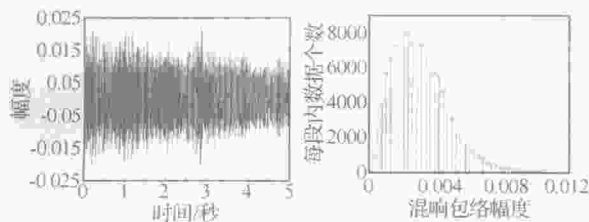


图 6(a) 海试数据 HFM 信号混响时域波形图 图 6(b) 海试数据 HFM 信号混响包络统计分布图

从图 2 和图 5 的比较以及图 3 和图 6 的比较可以看出仿真的混响时域波形、频谱分布以及包络的统计特性与试验数据的基本一致,验证了仿真的正确性。

4 仿真和实录混响对比分析

4.1 对仿真混响加入信号的处理结果

对仿真的 10 秒的 CW 信号的混响加入等长度的随机噪声并在 2 秒时加入相同脉宽和频率的 CW 信号,其中加入的 CW 信号与混响的峰值信混比为 -6dB ,加入的 CW 信号与加入的噪声的峰值信噪比为 9dB 。对加入了信号和噪声的仿真混响进行带宽为 8Hz 的窄带滤波,归一化结果如图 7。

从图 7 可以看出,窄带滤波明显的提高了信噪比,但没有改变信混比。对仿真的 10 秒的 HFM 信号混响加入等长度的随机噪声并在 2 秒时加入相应的 HFM 信号,其中加入的 HFM 信号与混响的信混比为 -6dB ,加入的 HFM 信号与加入的噪声的信噪比为 9dB 。对加入了信号和噪声的仿真混响与响应的 HFM 信号作相关,归一化的结果如

图 8 所示。

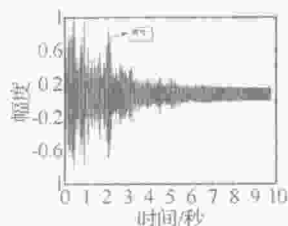


图 7(a) 仿真 CW 信号混响加入 CW 信号、噪声波形图

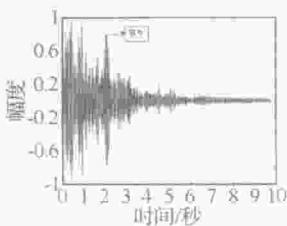


图 7(b) CW 混响加入信号、噪声后窄带滤波结果图

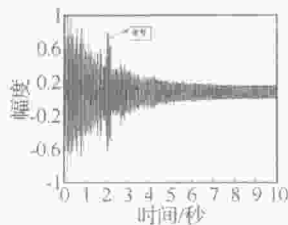


图 8(a) 仿真 HFM 信号混响加入 HFM 信号波形图

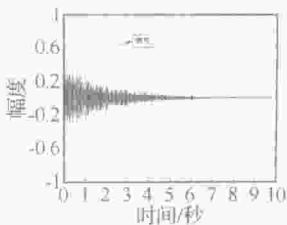


图 8(b) HFM 混响加入信号后与信号的相关图

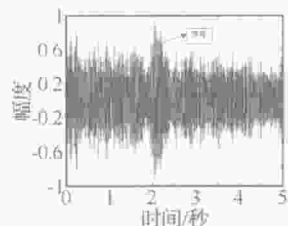


图 9(a) 海试数据 CW 信号混响加入 CW 信号波形图

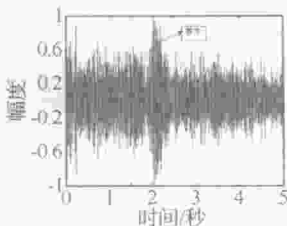


图 9(b) 海试数据 CW 混响加入信号后窄带滤波结果图

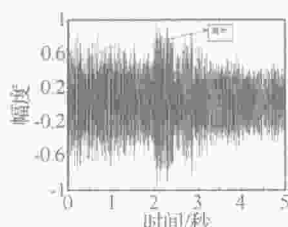


图 10(a) 海试数据 HFM 信号混响加入 HFM 信号波形图

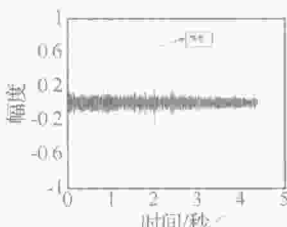


图 10(b) 海试数据 HFM 混响加入信号后与信号的相关图

从图 8 可以看出,相关处理不仅明显地提高了信噪比,而且较大的提高了信混比。

比较图 7 和图 8 的仿真结果可以看出 HFM 信号通过相关可以很明显的提高信混比,有较好的抗混响能力,而 CW 信号通过窄带滤波几乎没有提高信混比。

4.2 对海试实录混响加入信号的处理结果

对海试数据中长为 5 秒的 CW 混响在 2 秒时加入相同脉宽和频率的 CW 信号,加入的 CW 与混响的信混比为 -6dB,然后对加入信号的混响进行带宽为 8Hz 的窄带滤波处理,归一化结果如图 9。

由图 9 可看出 CW 信号的窄带滤波并没有改变信混比。比较图 7 和图 9 可看出明显的差异,这是由于实际数据的时间增益控制的影响的,但是没有影响分析结果,CW 信号的窄带滤波没有改变信混比。

对海试数据中长为 5 秒的 HFM 信号混响在 2 秒时加入相应的 HFM 信号,加入的 HFM 信号与混响的信混比为 -6dB,然后对加入信号的混响与 HFM 信号作相关处理,归一化的结果如图 10。

由图 10 看出,相关可以明显地提高信混比。比较图 8 和图 10 可看出明显的差异,这是由于实际数据的时间增益控制的影响的,但是没有影响结果,HFM 信号的相关可以明显地提高信混比。

比较图 9 和图 10 的数据处理结果可以看出 HFM 信号有较好的抗混响能力,通过相关可以很明显的提高信混比,具有较高的混响抑制指数 $RI^{[6]}$ ($RI = 10 \lg \frac{B}{\theta_h}$, B 为信号带宽, θ_h 为水平波束宽度),而 CW 信号的窄带滤波几乎没有提高信混比,这与仿真的结果一样,验证了仿真的正确性。

5 结语

本文根据 Middleton 提出的混响统计模型建立了一种简易混响仿真方法,并通过仿真的 CW 信号和 HFM 信号混响与试验数据中混响的对比,验证了此混响仿真方法的可行性。对仿真与试验数据,分别通过 CW 信号的窄带滤波和 HFM 信号的相关处理验证了各自抗混响能力,与理论分析结果有较好的一致性。

参考文献

- [1] 刘贯领,沈文苗,凌国民. 声纳信号抗混响能力和声兼容性分析[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 319~322
- [2] 朱楚. 主动声纳检测信息原理[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- [3] Thomas A. Palka, etc. Reverberation Characterization and Suppression by Means of Principal Components [C]. In Oceans'98, Nice, France, 1998, 1501~1506
- [4] Paul C. Etter. Underwater Acoustic Modeling and Simulation (Third Edition)[M]. Spon Press, 2003
- [5] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2002, 11
- [6] A. D. Waite. Sonar for Practising Engineers (Third Edition)[M]. John Wiley & Sons, 2002