

# 不同底质海底窄带混响信号空间相关半径研究

韩荣荣, 孙 辉, 朱广平, 张明辉, 刘 刚

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 海底混响是主动声呐的主要干扰之一, 分析海底混响信号的空间相关特性是抗海底混响技术研究的基础。本文依据混响信号的空间相关特性, 从理论上解释海底混响信号空间相关半径的定义, 利用实验数据研究了在不同海底底质情况下混响信号空间相关半径变化规律以及不同底质混响信号强度的变化。研究表明不均匀海底底质情况下, 散射体颗粒增大, 混响信号空间相关半径减小且底质较硬时混响信号较强。

**关键词:** 相关半径; 海底混响; 不同底质

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-05-0398-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.05.003

## Research on the correlation radius of narrowband seafloor reverberation under different seafloor sediments

HAN Rong-rong, SUN Hui, ZHU Guang-ping, ZHANG Ming-hui, LIU Gang

(Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The reverberation is one of the main interferences for active sonar system, so the analysis of spatial correlation characteristics for underwater reverberation is the basis of the anti-reverberation technology. Based on the spatial correlation characteristics of reverberation, the definition of the spatial correlation radius of seafloor reverberation is explained in theory, and the variations of the spatial correlation radius and the reverberation intensity with different seafloor sediments are studied by use of experimental data. Under non-uniform seafloor sediments, the results show that the spatial correlation radius of seafloor reverberation decreases as the scattering particle size increases, and the reverberation intensity increases as the seafloor sediment hardens.

**Key words:** correlation radius; bottom reverberation; different sediment.

## 0 引言

混响是海洋中大量无规则散射体对入射信号产生的散射波在接收点上接收到的所有散射波的总和。其信号具有动态范围大、与发射信号相关性较强等特点<sup>[1]</sup>。在主动声呐检测中, 海底混响是沉底目标探测的主要干扰, 因此分析海底混响的特征对声呐抗海底混响技术的研究具有重要意义。混响仿真的主要方法有两种, 一种是根据混响信号的概率分布, 仿真所需分布的混响信号<sup>[2,3]</sup>; 另一种是单元散射模型, 即将海底划分为小散射单元, 计算每个单元的散射信号在接收点的迭加得到混响信号<sup>[4-6]</sup>。本文进行海底混响的仿真时基于比较成熟的单元散射模型, 使用网格化的方法对海底有效散射区域

进行划分, 对不同海底底质混响信号的相关半径进行研究。使用此模型来仿真海底混响信号, 其物理意义明确, 能得到混响在不同位置的空间相关性, 可以作为抑制海底混响研究的基础。

单元散射模型是将海底划分为小散射单元, 每个散射单元的散射系数服从一定的规律, 计算每个单元的散射信号在接收点的迭加来得到海底混响信号。可见, 在单元散射模型中, 如何划分单元和单元的尺寸为此模型的关键。已有学者研究表明, 海底混响信号的空间相关性随海底散射系数相关半径的增大而减小<sup>[7]</sup>, 同时与海底底质特征有关<sup>[8]</sup>。

## 1 海底混响空间相关半径的定义

用在铅垂线上分开的两个水听器研究混响的空间相关性, 证明海底混响比来自深水散射层的混响的相关性强得多。

混响的空间相关理论分析如图 1 所示, 两水听器之间相距为  $d$ , 假设散射体是相互独立的散射源, 而且采用窄带滤波, 因此, 散射源发出的声波经散

收稿日期: 2013-04-28; 修回日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11204051)

作者简介: 韩荣荣(1983—), 女, 哈尔滨人, 博士研究生, 研究方向为海洋声场分析。

通讯作者: 韩荣荣, E-mail: hanrongrong@hrbeu.edu.cn

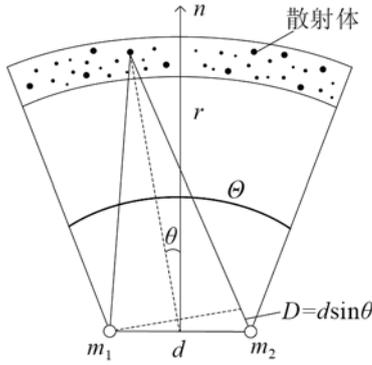


图 1 计算混响空间相关的示意图  
Fig.1 Illustration of calculating reverberation spatial correlation

射体后，散射声波在接收水听器的输出端可以看成是单频简谐波。当散射体到水听器的距离  $r$  远大于  $d$  时，分别写出两个水听器处的散射波声压为

$$\begin{cases} X_1(t) = A \sin \omega t \\ X_2(t) = A \sin \omega \left( t - \frac{D}{C} \right) \end{cases} \quad (1)$$

其中： $\omega$  为声频率，rad/s； $C$  为介质中的声速，m/s； $A$  为混响声压的振幅； $D$  为散射声波传播到两水听器之间的程差，m。

$$D \approx d \sin \theta \quad (2)$$

其中  $\theta$  为散射体到两个水听器中心的连线和水听器连线的法线  $n$  之间的夹角，rad。

于是有

$$X_2(t) = A \sin \omega \left( t - \frac{d \sin \theta}{C} \right) \quad (3)$$

由式(1)和(3)可得  $X_1$  和  $X_2$  之间的相关函数  $K$  为

$$K = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t) \cdot X_2(t) dt \quad (4)$$

则其相关系数为

$$R = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t) \cdot X_2(t) dt}{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X_1^2(t) dt} \quad (5)$$

将式(1)和(3)代入式(5)中，可得

$$R = \cos(kd \sin \theta) \quad (6)$$

式中： $k$  为波数， $k = \omega/C$ 。

考虑所有散射元的作用，则

$$R_{\text{总}} = \sum \cos(kd \sin \theta) \quad (7)$$

如果水听器的水平指向性开角为  $\Theta$ ，本次实验测得  $\Theta \approx 23.5^\circ$ ，并有  $\theta \leq \Theta$ ，则  $\sin \theta \approx \theta$

$$R_{\text{总}} = \int_{-\Theta/2}^{\Theta/2} \cos(kd\theta) d\theta = \frac{\sin \frac{\pi d}{\lambda} \Theta}{\frac{\pi d}{\lambda} \Theta} \quad (8)$$

可见，当发射信号频率一定时，混响场的空间相关系数和发射换能器的水平指向性开角有关，且

随水听器间距的增大表现为振荡衰减的形式，开角越大混响空间相关系数越大，如图 2 所示。

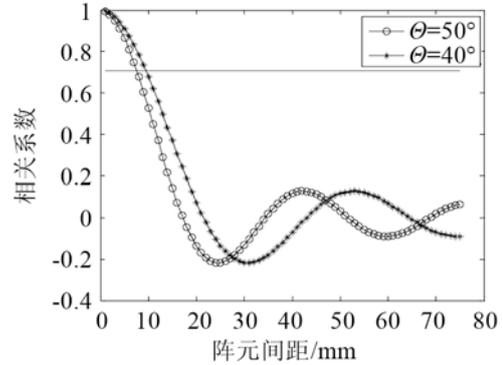


图 2 不同水平指向性开角  $\Theta$  下混响相关系数  
Fig.2 The reverberation correlation coefficients of different horizontal beamwidths  $\Theta$

当发射换能器的水平指向性开角一定时，混响的空间相关系数仅和频率有关，且随水听器间距的增大表现为振荡衰减的形式，且频率越高相关系数越小，如图 3 所示。

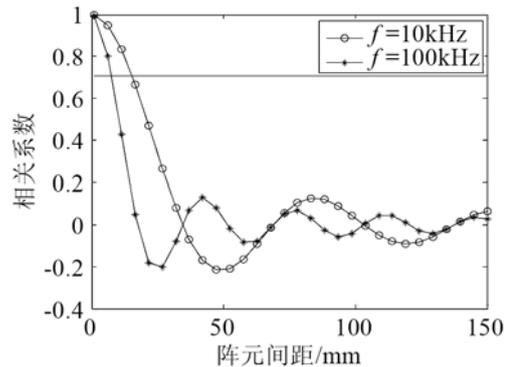


图 3 不同频率混响相关系数  
Fig.3 The reverberation correlation coefficients of different frequencies

理论上定义空间两点混响信号的相关系数下降至 0.707 时对应的距离为混响信号空间相关半径，那么只要知道发射换能器开角和发射频率，则混响信号空间相关半径可以计算得到。但是实际上这里并没有考虑到海底底质的实际情况，下面探讨在海底不同底质的情况下，如颗粒大小与材质不同对混响信号空间相关半径等的影响。

## 2 实验测量不同海底底质的混响空间相关半径

在不同海底底质的情况下，将海底颗粒简单描述为如图 4 所示的排列。图 4 中不同的颗粒大小对应于不同的起伏与周期，这仅是海底散射体的其中一种可能的排列，并没有数量级的精确描述。

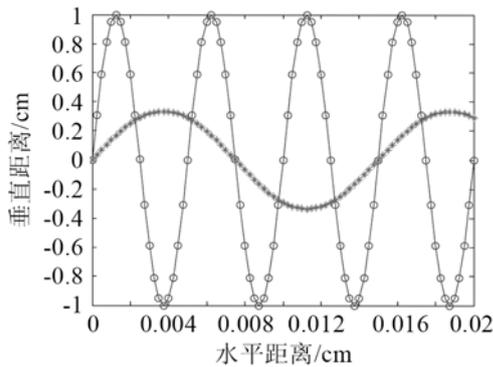
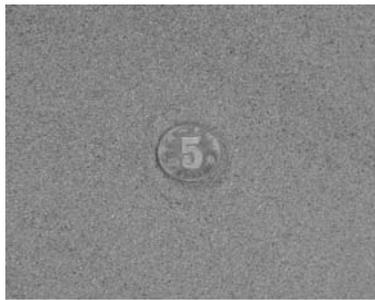


图 4 粗糙度不同海底底质起伏示意图

Fig.4 Illustration of seafloor sediment fluctuation for different roughnesses

本文在实验中,选取三种不同的材质(颗粒大小不同)作为海底混响散射体,如图 5 所示。对在这三种海底底质情况下的混响信号空间相关半径和强度进行讨论。

实验条件:发射信号频率为 100 kHz,经测量



(a) 直径均值为 0.8mm 大小不均匀的细砂



(b) 直径均值为 2.26mm 大小不均匀的粗砂



(c) 直径均值为 6.5mm 大小不均匀的石头

图 5 不同海底底质照片

Fig.5 Photos of different seafloor sediments

发射换能器在-3 dB 处的水平指向性开角为 47°。理论计算得到在此条件下混响的相关系数随阵元间距的变化关系如图 6 所示。

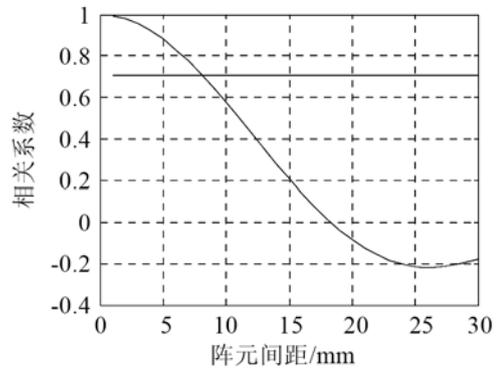


图 6 仿真混响相关系数随阵元间距的变化

Fig.6 The variation of the simulated reverberation correlation coefficient with the element separation

从图 6 中可得在上述频率和发射换能器条件下混响信号空间相关半径的理论计算结果为 8.1 mm。

在实际测量中,使用上述发射换能器,发射频率为 100 kHz,海底底质不同的散射体(如图 5)得到的混响信号空间相关系数与阵元间距的关系,如图 7 所示。

图 7 中,经测量得到细砂的混响空间相关半径为 7.28 mm,粗砂的混响空间相关半径为 4.03 mm,石头的混响空间相关半径为 3.82 mm。上述实验结果中,只有细砂混响空间相关半径与理论计算得到的混响空间相关半径相比拟。可见,理论计算混响空间相关半径只与发射信号频率和发射换能器的水平指向性开角有关是不够的,还需要考虑海底底质的散射体颗粒大小。

实验结果说明不均匀颗粒越大混响空间相关半径越小。在上述各个散射体中细砂底较为平坦,粗砂与石头底颗粒较大且不均匀,使得海底表面凹凸不平,在相同的空间距离得到的混响信号,起伏大的相关性弱,所以混响空间相关半径就会相应地减小。

实验数据表明,上述三种不同的散射体得到的混响信号的强度也有差别,其混响信号包络如图 8 所示。

在图 8 中,点表示细砂的混响包络,线是粗砂的混响包络,虚线是石头的混响包络。可见,从石头到细砂,其混响强度是依次增大的。证明发射换能器在此发射角度的情况下,不同材质的散射体产生的混响信号的强弱不同。

表 1 综合描述了在海底为不同散射体时的相关半径和混响强度的关系。

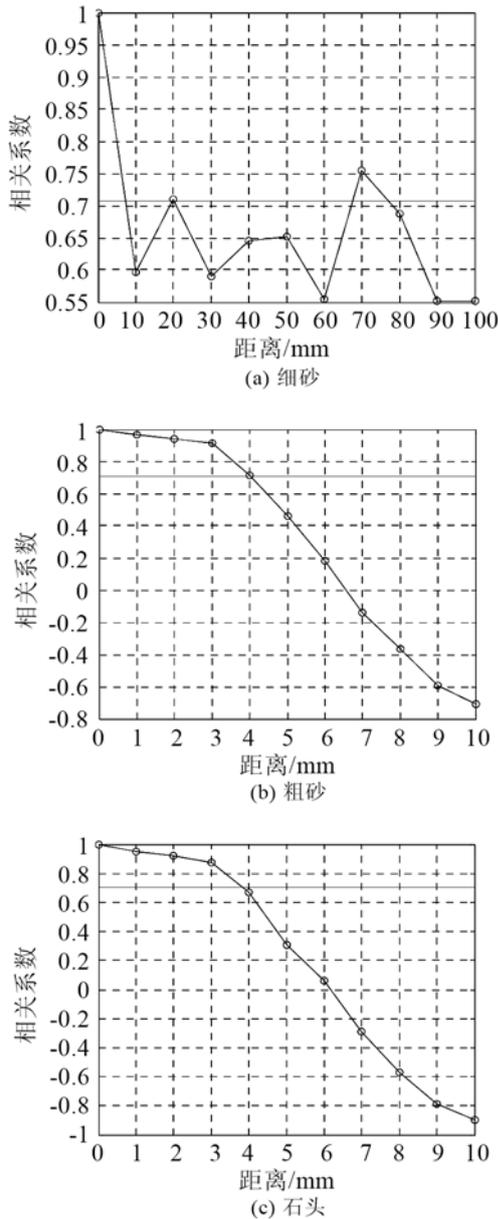


图 7 实测不同底质混响相关系数随距离的变化  
 Fig.7 The variations of the measured reverberation correlation coefficient with the element separation under different seabed sediments

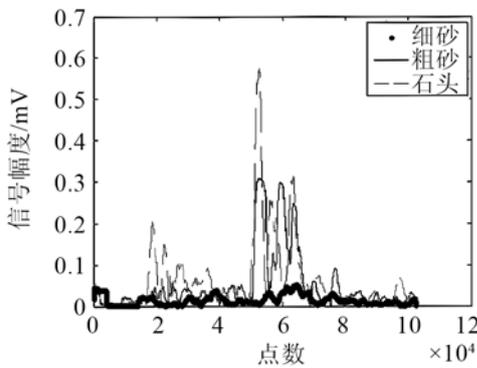


图 8 不同底质混响信号的包络  
 Fig.8 Envelopes of reverberation signals under different seabed sediments

表 1 不同海底底质的混响空间相关系数与混响强度  
 Table 1 The reverberation spatial correlation coefficients and reverberation intensity under different seabed sediments

	直径/mm	相关半径/mm	强度
细砂	0.8	7.28	弱
粗砂	2.26	4.03	较强
石头	6.5	3.82	强

### 3 结论

本文在理论上计算了混响信号空间相关半径，利用实验数据与理论相结合，表明理论计算结果与实际情况中的细砂吻合较好，由于理论计算并没有考虑到海底底质的不同，所以当不均匀的散射体颗粒增大时，混响空间相关半径减小。为今后的抗混响技术研究提供理论基础。

#### 参 考 文 献

- [1] 张蔚, 严胜刚, 刘建国. 主动声呐均匀线列阵的混响仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 383-412.  
 ZHANG Wei, YAN Shenggang, LIU Jianguo. Simulation research on reverberation for active sonar uniform linear array[J]. Computer Simulation, 2012, 29(8): 383-412.
- [2] Abraham D A, Lyons A P. Reverberation envelope statistics and their dependence on sonar beamwidth[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(1): 126-137.
- [3] Abraham D A, Lyons A P. Simulating non-rayleigh reverberation and clutter[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 347-362.
- [4] V. V. 奥列雪夫斯基. 罗耀杰, 赵清, 武延祥, 译. 海洋混响统计特性[M]. 北京: 科学出版社, 1977.  
 Olshevskii V V. LUO Yaojie, ZHAO Qing, WU Yanxiang, translate. Statistical characteristics of sea reverberation[M]. Beijing: Science Press, 1977.
- [5] 胡家福, 朱广平, 张卫强. 收发分置声呐浅海近程混响信号建模研究[J]. 海洋技术, 2012, 31(2): 27-31.  
 HU Jiafu, ZHU Guangping, ZHANG Weiqiang. Modeling study on shallow sea short-range reverberation signal for bistatic sonar [J]. Ocean Technology, 2012, 31(2): 27-31.
- [6] 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.
- [7] 朱燕, 陈刚, 鲁辛凯. 水平分置海底混响信号的空间相关特性研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(5): 56-59.  
 ZHU Yan, CHEN Gang, LU Xinkai. Research on space correlation characteristic of horizontal biostatic seabed reverberation signals[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(5): 56-59.
- [8] 蒯多杰, 冯雷, 王长红, 等. 不同底质混响空间相关函数仿真分析[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 1062-1063.  
 KUI DUOJIE, FENG LEI, WANG CHANGHONG, et al. Reverberation simulation and analysis of different sediments using spatial correlation method[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 1062-1063.