

# 浅海波导远程信混比预报模型

王升<sup>1,2</sup>, 马力<sup>1</sup>, 吴金荣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190;  
2. 91388 部队 95 分队, 广东湛江 524022)

**摘要:** 浅海主动探测时, 海底混响是目标回波的主要背景干扰, 信混比影响主动声纳的性能。混响和目标回波都属于海洋中的散射问题, 利用简正波方法, 结合平面波散射函数建立了浅海远程信混比预报模型, 实现了不同环境参数下信混比的量化分析。仿真比较了不同信号形式、频率以及不同海底底质下的刚性球信混比曲线, 从理论上分析了回波随距离的振荡现象。结果表明: 用无指向性的声源探测目标时, 信混比较低, 探测较为困难; 宽带信号照射下目标回波更加平稳; 简正波之间的干涉导致回波随距离发生振荡, 频率越高, 干涉结构越复杂; 在硬海底环境中信混比相对较小且目标回波振荡剧烈。

**关键词:** 简正波; 混响; 目标回波; 信混比; 海底参数

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-06-0550-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.06.003

## Prediction model of echo-to-reverberation ratio in shallow water waveguide

WANG Sheng<sup>1,2</sup>, MA Li<sup>1</sup>, WU Jin-rong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

**Abstract:** For active detection in shallow water, seafloor reverberation has great influence on target detection, so echo-to-reverberation ratio determines the performance of active sonar. Both reverberation and target echo are scattering problems in ocean. In the paper, long-distance echo-to-reverberation ratio prediction model in shallow water has been built by associating normal-mode theory with plane-wave scattering function. The advantage of this model is that it enables making quantitative predictions of echo-to-reverberation ratio. The model has been applied to rigid sphere submerged in homogeneous water with various signals, frequencies and seafloor conditions. Results show: it is difficult to detect target by using omnidirectional source because of low echo-to-reverberation ratio; broadband signal makes echo smooth relatively; echo fluctuation phenomenon is found and analyzed theoretically as a result of interference among modes especially at high frequency; echo-to-reverberation ratio is low relatively and fluctuates obviously for hard seafloor.

**Key words:** normal-mode wave; reverberation; target echo; echo-to-reverberation ratio; seafloor parameter

## 0 引言

浅海波导中, 主动声纳发射的声波不仅照射到目标, 还与边界发生多次作用, 产生边界混响, 所以主动声纳探测定位目标时, 一个常见问题就是难以区分混响和目标回波。混响是海底、海面不平整性和海水的不均匀性造成的声散射, 根据海洋中产生混响的不同散射源可将混响分为海底混响、海面混响与体积混响, 一般情况下, 浅海混响主要由海

底散射引起。与环境噪声不同, 混响伴随发射信号产生, 混响强度随声源级增大而增大, 而且与目标回波有强相关性, 严重制约了主动声纳的性能发挥, 所以目标探测识别成功与否的关键就是信混比的高低。对于浅海远程低频混响和目标散射问题, 通常可借助简正波理论研究<sup>[1-3]</sup>; 关于浅海中信混比的研究相对较少, Dale D. Ellis<sup>[4]</sup>用简正波方法建立了浅海体积混响和目标回波模型, 分析了信混比和目标距离的关系, Harrison<sup>[5]</sup>采用射线方法比较了三种海底散射规律下混响和目标回波, 给出信混比的解析表达式; Nicholas C. Makris 和 Purnima Ratilal<sup>[6]</sup>从波动理论出发建立了分层介质中混响和目标散射统一模型, 通过计算窄带信号下的信混比, 表明信混比对水体层、沉积层以及声源、接收和目标深度有强依赖性。

收稿日期: 2011-11-28; 修回日期: 2012-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(10874201)、(11074271)

作者简介: 王升(1978-), 男, 山东安丘人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为水下目标回波特性。

通讯作者: 王升, E-mail: comwsh@sina.com

本文借助简正波理论和平面波散射函数建立了浅海信混比预报模型，具体分析了不同信号、频率和海底情况下刚性球的信混比。该模型能够预报不同环境下的目标回波、混响强度和信混比，可以为主动声纳的设计使用和性能发挥提供技术支持。

## 1 浅海信混比预报模型

### 1.1 海底或目标散射场

目标回波和混响都属于海洋中声散射问题，其区别是回波为确定目标的散射，混响由海洋中随机目标的散射引起。Dale D. Ellis<sup>[1]</sup>用简正波方法建立了浅海海底混响模型，给出了混响强度与脉宽的关系；T C. Yang<sup>[2]</sup>采用本征函数法研究了声速不均匀情况下的目标散射场；Li-gang Chen<sup>[3]</sup>等人给出了波导中刚性球回波波形具体算法。在此基础上，可以建立浅海波导中信混比预报模型。

在水平分层的浅海信道中，声场适合用简正波形式描述，单频点源产生的声场可以表示为

$$p(r, z) = \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{2\pi}{\xi_m r}} \psi_m(z_s) \psi_m(z) e^{i\xi_m r - \delta_m r + i\pi/4} = \sum_{m=1}^M A_m(r, z_s) \psi_m(z) \quad (1)$$

其中： $\xi_m$ 、 $\psi_m$  分别是第  $m$  号简正波的本征值和本征函数， $\delta_m$  是对应的衰减系数， $z$ 、 $z_s$  是接收点和声源深度， $r$  是接收点到声源的水平距离。在 WKB 近似的基础上，将声场分解为准平面波叠加形式<sup>[3]</sup>：

$$p(r, z) = \sum_{m=1}^M A_m(r, z_s) (\psi_m^-(z) + \psi_m^+(z)) \quad (2)$$

其中， $\psi_m^+(z)$  对应简正波分解得到的上行波， $\psi_m^-(z)$  对应分解得到的下行波。

在浅海信道中，入射场和散射场与式(2)具有同样的形式。目标散射场和海底散射场的计算原理类似，即在目标或海底处，首先将入射简正波和散射简正波分解成准平面波形式，然后与海底散射规律联系起来，得到海底散射场，与平面波照射下目标散射函数联系起来，则得到目标散射场，如图 1 所

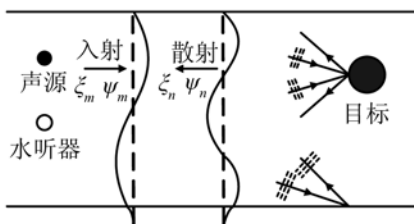


图 1 混响和目标回波的简正波方法示意图

Fig.1 Illustration of reverberation and target echo calculations with normal-mode theory

示。海底微元散射场和目标散射场统一表示为

$$p_s(r, z) = \sum_m^M \sum_n^N A_m C_{mn} A_n \quad (3)$$

其中： $A_m$  为入射声场， $A_n$  为散射声场， $C_{mn}$  为反向散射耦合矩阵。可以看出，混响和目标回波计算皆分为传播过程和散射过程，传播过程相同，为波导中的声传播，不同之处是散射耦合矩阵。

海底散射简正波耦合矩阵为：

$$C_{mm} = \psi_m^-(z_b) \psi_n^+(z_b) S(\alpha_m^-, \alpha_n^+) \quad (4)$$

目标散射简正波耦合矩阵<sup>[3]</sup>为：

$$C_{mn} = \begin{bmatrix} \psi_m^-(z_0) \psi_n^-(z_0) S(\alpha_m^-, \phi_i, \alpha_n^-, \phi_s) \\ + \psi_m^+(z_0) \psi_n^-(z_0) S(\alpha_m^+, \phi_i, \alpha_n^-, \phi_s) \\ + \psi_m^-(z_0) \psi_n^+(z_0) S(\alpha_m^-, \phi_i, \alpha_n^+, \phi_s) \\ + \psi_m^+(z_0) \psi_n^+(z_0) S(\alpha_m^+, \phi_i, \alpha_n^+, \phi_s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中： $\alpha_m^+$ 、 $\alpha_m^-$  分别为入射上行波和下行波的俯仰角； $\alpha_n^+$ 、 $\alpha_n^-$  分别为散射上行波和下行波的俯仰角； $\phi_i$ 、 $\phi_s$  分别为入射波和散射波的水平方位角，反向散射时， $\phi_i = 0$ ， $\phi_s = \pi$ ； $S(\alpha_m^-, \phi_i, \alpha_n^-, \phi_s)$  为自由空间目标散射函数； $S(\alpha_m^-, \alpha_n^+)$  为海底散射函数，采用 Lambert 定律， $S(\alpha_m^-, \alpha_n^+) = \mu \sin(\alpha_m^-) \sin(\alpha_n^+)$ ， $10 \log \mu = -27$ ； $z_0$ 、 $z_b$  分别为目标和海底深度。

当目标形状不规则或者目标介质特性非理想时，散射函数难以用解析形式给出，可以通过实验远场测量换算获得。

### 1.2 脉冲信号的混响强度

任一时刻的混响为所有对该时刻混响有贡献的海底区域散射场的叠加，考虑到实际情况，声源发射信号为时宽受限的脉冲信号，将散射场在脉冲信号照射区域  $A(t)$  上积分，可得混响强度<sup>[1]</sup>

$$R(t) = \int_{A(t)} I_0 |p_s(r)|^2 dA \quad (6)$$

任意一号简正波照射到海底，会激发出所有散射简正波。水听器在  $t$  时刻接收到的混响信号是由满足时延条件的组合简正波叠加而成的，由于各个简正波组合的时延不同，对  $t$  时刻混响产生贡献的区域也不同，可以表示为<sup>[1]</sup>

$$dA_{mn} = 2\pi r_{mn} dr_{mn} \quad (7)$$

$$r_{mn} = \left(\frac{1}{u_m} + \frac{1}{u_n}\right)^{-1} t \quad (8)$$

$$dr_{mn} = \left(\frac{1}{v_m} + \frac{1}{v_n}\right)^{-1} d\tau \quad (9)$$

其中： $u_m$ 、 $u_n$  为简正波群速度； $v_m$ 、 $v_n$  为简正波相速度； $I_0$  为源信号声强。设源信号持续时间为  $0 < t < \tau_0$ ，将式(6)展开，忽略交叉项，得到非相干混响强度<sup>[1]</sup>为

$$R(t) = 2\pi \int_0^{\tau_0} I_0 \sum_m \sum_n A_m^2 C_{mn}^2 A_n^2 \frac{u_m u_n}{u_m + u_n} \frac{v_m v_n}{v_m + v_n} t d\tau \quad (10)$$

对于单频(CW)信号, 本征值和本征函数为常量, 混响强度表示为

$$R(t) = 2\pi t E_0 \sum_m \sum_n A_m^2 C_{mn}^2 A_n^2 \frac{u_m u_n}{u_m + u_n} \frac{v_m v_n}{v_m + v_n} \quad (11)$$

对于线性调频(LFM)信号, 将脉冲长度  $\tau_0$  分为  $K$  段, 每段内本征值和本征函数近似认为常量, 总混响近似为各分段的混响强度的线性叠加:

$$R(t) = 2\pi \sum_k \sum_m \sum_n E_k A_m^2 C_{mn}^2 A_n^2 \frac{u_m u_n}{u_m + u_n} \frac{v_m v_n}{v_m + v_n} \quad (12)$$

其中,  $E_k$  为各分段信号能量。由此可见, 混响强度与脉宽有关, 脉宽越大, 混响强度越大。

### 1.3 脉冲信号的目标回波强度

脉冲信号的目标回波强度取时域信号有效值。为了获得时域的目标回波信号, 需将发射信号频带内所有散射信号叠加, 即散射场的傅里叶变换<sup>[2]</sup>:

$$p_s(t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) p_s(r, z) e^{-i\omega t} d\omega \quad (13)$$

其中,  $S(\omega)$  为声源发射信号频谱。

### 1.4 波导中的信混比

根据上述回波和混响强度公式, 将混响时间关系近似转换为距离关系, 则信混比为

$$SRR(r) = 20 \log [p_v(r)] - 10 \log [R(r)] \quad (14)$$

其中:  $p_v(r)$  为目标回波时域信号有效值,  $R(r)$  为中心距离  $r$  附近海底产生的混响强度。

## 2 仿真分析

设定发射信号和海洋环境相关参数, 根据前文建立的模型, 可以得到回波和混响强度随距离变化的曲线。海洋环境相关参数如图 2。声源为 0dB 点源, 发射信号为 CW 波, 载频 300Hz, 脉宽 1s。简正波本征值和本征函数借助 KRAKEN 程序计算。目标为刚性球, 半径为 10m, 其散射函数<sup>[3]</sup>为

$$S(\alpha_m, \phi_i, \alpha_n, \phi_s) = \frac{i}{k} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \frac{j_l^*(ka)}{h_l^{(1)}(ka)} P_l(\cos \theta) \quad (15)$$

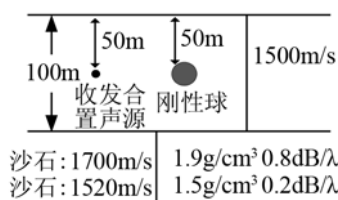


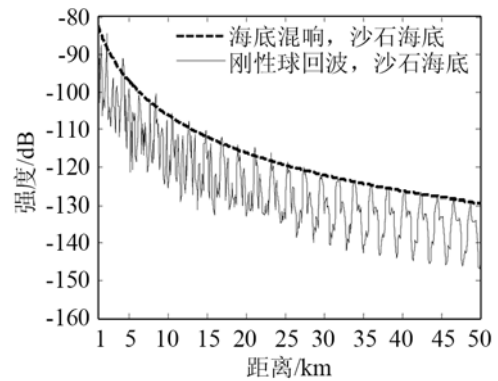
图 2 环境参数和目标、发射接收位置示意图

Fig.2 Schematic of environmental parameters and positions of target, source and receiver

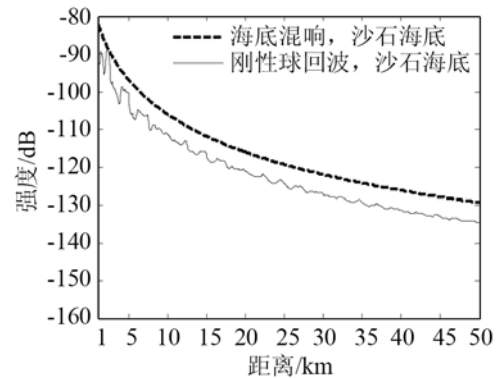
其中:  $k$  为目标处的波数,  $a$  为刚性球半径,  $\theta$  为入射波和散射波的夹角,  $P_l(\cos \theta)$  是宗量为  $\cos \theta$  的第  $l$  阶勒让德函数,  $h_l^{(1)}(kr)$  是宗量为  $kr$  的  $l$  阶第 1 类球汉克尔函数,  $j_l(kr)$  是宗量为  $kr$  的第  $l$  阶球贝塞尔函数。

### 2.1 不同发射信号的信混比

图 3(a)、3(b)分别为 CW 信号和 LFM 信号 (280~320Hz) 的目标回波和混响强度, 海底为沙石海底。由图 3 可见, 两种情况下信混比变化趋势相同, CW 信号产生的回波在距离上剧烈振荡, LFM 信号则较为平缓。这种振荡是由不同号简正波之间的干涉引起的, 不同频率干涉结构不同, 宽带信号在整个频带内作平均, 干涉程度降低。



(a) CW 信号



(b) LFM 信号

图 3 刚性球回波和混响强度变化曲线  
Fig.3 Reverberation and rigid sphere echo versus range

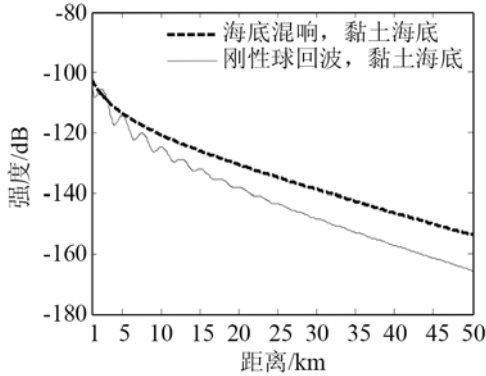
### 2.2 不同发射频率的信混比

图 4 为不同发射频率下目标回波和混响强度曲线, 黏土海底。由图 4 可见: 随频率增大, 回波振荡结构越复杂, 目标距离声源越远, 振荡程度越小; 频率越高, 远程混响和目标回波衰减越大。相干混响强度同样有类似现象, 李风华等已结合实验中出现的混响振荡现象作过解释<sup>[7,8]</sup>。下面对目标回波振荡现象作分析。

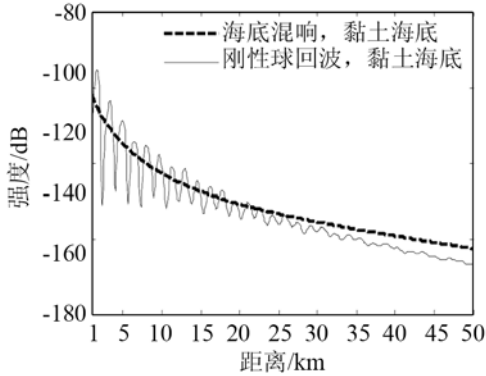
令式(3)中  $A_m = B_m e^{i\zeta_m r}$ ,  $A_n = B_n e^{i\zeta_n r}$ , 则目标散射

场可以重新表示为

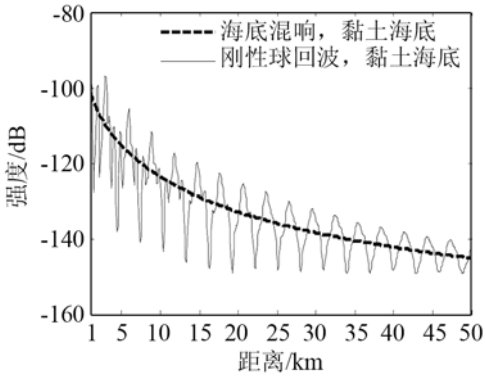
$$p_s(r, z) = \sum_m^M \sum_n^M B_m C_{mn} B_n e^{i(\xi_m + \xi_n)r} \quad (16)$$



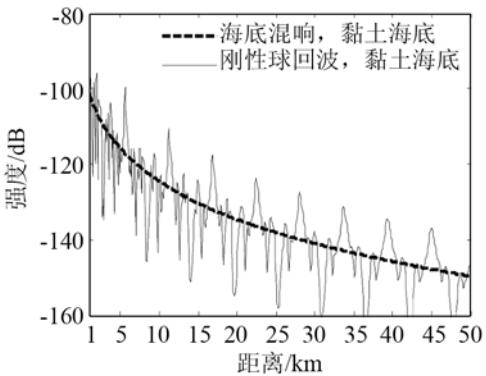
(a) 发射频率为 100Hz



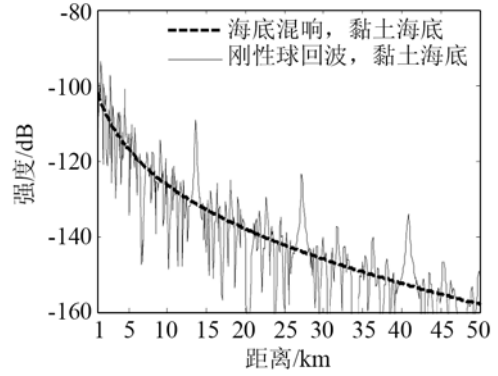
(b) 发射频率为 200Hz



(c) 发射频率为 400Hz



(d) 发射频率为 800Hz



(e) 发射频率为 2000Hz

图 4 不同频率的刚性球回波和混响强度曲线(黏土海底)  
Fig.4 Reverberation and rigid sphere echo curves for different frequencies (silt seafloor).

目标回波强度可表示为

$$I_s = p_s p_s^* = \sum_m \sum_{m'} \sum_n \sum_{n'} B_m B_m^* C_{mn} C_{m'n'}^* B_n B_n^* \times e^{i(\xi_m + \xi_n - \xi_{m'} - \xi_{n'})r} \quad (17)$$

如果将  $I_s$  表示为相干项和非相干项的叠加, 式 (17) 可以表示为

$$I_s = \sum_m \sum_n |B_m|^2 |C_{mn}|^2 |B_n|^2 + \sum_{m \neq m' \text{ 或 } n \neq n'} \sum_n \sum_{n'} B_m B_m^* C_{mn} C_{m'n'}^* B_n B_n^* \times e^{i(\xi_m + \xi_n - \xi_{m'} - \xi_{n'})r} \quad (18)$$

式(18)中第一项为非相干项, 随距离单调递减; 第二项表示不同组合简正波(1号入射简正波和1号散射简正波)之间的相互干涉, 随距离振荡变化。浅海低频时, 有效简正波对应的掠射角一般很小,  $C_{mn} C_{m'n'}^*$  的相位近似为零, 任意两对组合简正波发生干涉的振荡周期为

$$\Delta r_{mm'n'n'} = \frac{2\pi}{\xi_m + \xi_n - \xi_{m'} - \xi_{n'}} \quad (19)$$

当入射或散射两项中, 一项简正波号数相同, 另一项为本征值最接近的两号简正波时, 振荡周期  $\Delta r$  最大; 随着频率增高, 相邻简正波的本征值越接近, 振荡周期越大。随着目标距离增大, 高号简正波快速衰减, 回波相干性减弱。

回波强度随距离振荡现象实际是由于目标散射信号在传播中不同号简正波之间的干涉引起的, 是声传播的强度振荡在目标回波中的体现。由于目标对简正波的耦合作用, 回波中各号简正波相位复杂变化。干涉图案不仅与频率有关, 还受到声速梯度、海底底质、目标深度等因素影响, 因此回波干涉图案呈现复杂结构。

### 2.3 不同海底的信混比

为分析海底底质对信混比的影响, 选用沙石和黏土两种海底, 发射 300Hz 的 CW 信号, 具体参数如图 2。图 5 给出了两种海底的回波和非相干混响

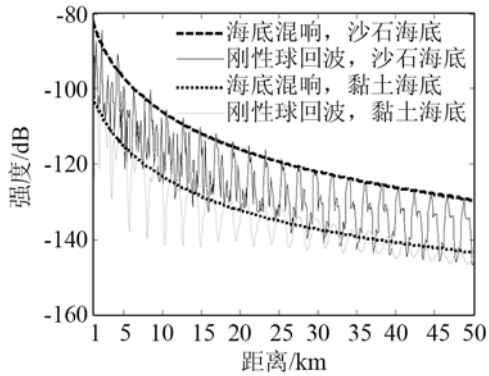


图5 不同海底的刚性球回波和混响强度曲线

Fig.5 Reverberation and rigid sphere echo curves for different seafloors

强度曲线,可以看出,海底参数对刚性球回波和混响的影响较大,主要体现在回波随距离振荡和信混比两个方面。

(1) 相对于软海底,硬海底混响和回波强度较大,但信混比相对较小。

硬海底吸声性能弱,保留在海水中声能量较多,300 Hz 声波在沙石海底激发出 19 阶简正波,而黏土海底只激发出 6 阶简正波,所以硬海底的目标回波和混响强度较大。从硬海底到软海底,由传播损失变化导致的混响变化和回波强度变化幅度接近,但在散射过程,目标散射变化微小,海底散射强度降低较多;硬海底临界角为  $28.1^\circ$ ,而软海底临界角为  $9.3^\circ$ ,只激发出低阶简正波,根据 Lambert 定律,低掠射角散射强度小,软海底只有前 6 阶简正波,平均散射强度较小。所以从硬海底到软海底,混响强度相对于回波减小幅度更大,导致软海底信混比相对较大。

(2) 相对于软海底,硬海底目标回波在距离上发生剧烈振荡。

回波振荡由简正波间的干涉引起,硬海底激发出的简正波较多,所以干涉程度强。

### 3 结论

本文利用简正波方法,建立了与距离无关的分层浅海中信混比预报模型,理论基础是平面波入射

声场近似和目标散射场远场近似,所以适合于计算远场低频目标回波和混响,近场计算有较大误差,计算高频时效率较低,不适用于目标与界面很近以至于两者之间的多次散射不能忽略的情况。

浅海波导中,目标回波信混比有较强的环境参数依赖性,本文对不同环境条件下的信混比进行了仿真分析,结果表明:

(1) 和指向性声源相比,无指向性声源探测目标时,信混比较低。

(2) 宽带信号照射下目标回波更加平稳。

(3) 简正波之间的干涉导致回波强度随距离振荡。

(4) 和软海底相比,硬海底环境中信混比相对较小;采用 CW 信号探测目标时,硬海底目标回波振荡幅度较大。

### 参 考 文 献

- [1] Ellis D D. A shallow-water normal-mode reverberation model[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, **97**(2): 2804-2814.
- [2] Yang T C. Scattering from an object in a stratified medium. I. Frequency dispersion and active localization[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1994, **96**(2): 1003-1019.
- [3] Chen L G, Yuan B C, Liu J G. Echo waveform prediction algorithm for a target in the shallow water wave-guide[C]// The 1st International Conference on Information Science and Engineering, 2009: 550-553.
- [4] Ellis D D, Deveau T J. Volume reverberation and target echo calculations using normal modes[C]// Ocean'97 MTS/ IEEE Conference Proceedings, 6-9 Oct. 1997.
- [5] Harrison C H. Closed-form expressions for ocean reverberation and signal excess with mode stripping and Lambert's Law[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2003, **114**(5): 2744-2756.
- [6] Makris N C, Raitil P. A unified model for reverberation and submerged object scattering in a stratified ocean waveguide[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2001, **109**(3): 909-941.
- [7] 李风华, 金国亮, 张仁和. 浅海相干混响理论与混响强度的振荡现象[J]. 中国科学, A 辑, 2000, **30**(6): 560-566.  
LI Fenghua, JIN Guoliang, ZHANG Renhe. Coherent reverberation theory and intensity fluctuation in shallow water[J]. China Science, Part A, 2000, **30**(6): 560-566.
- [8] 李风华, 金国亮, 张仁和. 浅海低频混响的振荡现象及其物理解释[J]. 中国科学, G 辑, 2005, **35**(2): 140-148.  
LI Fenghua, JIN Guoliang, ZHANG Renhe. Low frequency reverberation fluctuation phenomenon in shallow water and physical interpretation[J]. China Science, Part G, 2005, **35**(2): 140-148.