

◇ 研究报告 ◇

## 浅海海底界面混响平均强度特性仿真\*

侯倩男<sup>1,2,3†</sup> 吴金荣<sup>2,3</sup> 张建兰<sup>2,3</sup> 马力<sup>2,3</sup>

(1 中国科学院大学 北京 100049)

(2 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(3 中国科学院水声环境特性重点实验室 北京 100190)

**摘要** 海底粗糙界面是产生混响的主要因素之一。本文通过理论分析和数值仿真的方法,根据浅海全波动混响模型对不同海底粗糙界面所引起浅海混响平均强度特性进行研究,主要考虑 Goff-Jordan 谱、Gauss 谱和指数谱三种不同粗糙界面条件下的海底反向散射强度和混响平均强度特性。计算结果表明:海底粗糙界面会引起海底反向散射强度的频率特性的差异,进而导致海底平均混响强度的频率特性的差异,但随入射角度的变化不大。即使界面起伏的方差和相关长度相同,不同的粗糙度谱也会引起平均混响强度的差异。

**关键词** 浅海混响, Goff-Jordan 谱, Gaussian 谱, 指数分布谱

中图分类号: O427.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2016)03-0272-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.03.013

## Simulations of the average reverberation intensity due to different rough bottom interfaces in shallow-water waveguide

HOU Qiannan<sup>1,2,3</sup> WU Jinrong<sup>2,3</sup> ZHANG Jianlan<sup>2,3</sup> MA Li<sup>2,3</sup>

(1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Institute of Acoustics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(3 Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** The rough bottom interface is one of the main factors which cause reverberation in shallow-water waveguide. The numerical simulations and theoretical analyses of the average reverberation intensity due to interface roughnesses have been performed based on the full wave reverberation theory. The roughness spectrum is used to describe rough bottom-surface. Three common roughness spectrums have been considered in the simulation, which are the Goff-Jordan spectrum, the Exponential spectrum and the Gaussian spectrum. The characteristics of bottom backscattering strength and the average reverberation intensity due to different bottom roughness spectrums have been calculated. The result shows that different bottom rough surfaces can cause the frequency dependency and angular dependency of bottom backscattering strength different. Furthermore, it can cause the frequency dependency of the average reverberation intensity changing. Different roughness spectrums with the same root mean square (RMS) and correlation length can cause the change in the average reverberation intensity.

**Key words** Reverberation in shallow water, Goff-Jordan spectrum, Gaussian spectrum, Exponential spectrum

2015-08-15 收稿; 2015-10-05 定稿

\*国家自然科学基金项目 (11374323)

作者简介: 侯倩男 (1989-), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向: 水声物理。

† 通讯作者 E-mail: houqiannan13@mails.ucas.ac.cn

## 1 引言

近年来,多种浅海低频混响模型得到发展,比如简正波理论<sup>[1]</sup>、能流理论<sup>[2]</sup>、全波动理论<sup>[3]</sup>等。在20世纪80年代,高天赋引入基于Bass微扰理论<sup>[4]</sup>的全波动理论,用于研究浅海波导中的混响。它是建立在小瑞利参数的基础上的浅海混响模型。随后,唐大筠<sup>[5]</sup>和尚尔昌<sup>[6]</sup>将其进行了扩展。尚尔昌等根据John A. Goff和Thomas H. Jordan<sup>[7]</sup>在1989年提出的海底形态的统计模型得出能满足Goff-Jordan谱的浅海低频混响模型。Joseph F. Lingeitch<sup>[8]</sup>利用抛物方程的混响模型,对一维Gaussian谱和指数谱的海底界面进行了数值仿真,得到对于相同区域,两种类型的粗糙界面条件下的多途反射混响具有相同的结果。本文将根据全波动理论讨论海底粗糙界面引起的浅海低频混响,一般在100 Hz–1500 Hz的范围内,通过理论分析和数值仿真得到海底界面反向散射强度和浅海界面混响平均强度的频率关系和角度关系。另外,当海底粗糙度的方差和相关长度相同时,不同的粗糙度谱引起的平均混响强度不同。

为了方便计算分析,使用柱坐标系进行理论推导,并取竖直向下为 $z$ 轴的正方向,坐标原点位于海面。海底环境的结构示意图如图1所示。海水为深 $H$ 的等声速介质,其速度、密度和衰减系数分别为 $c_0, \rho_0, a_0$ ,海底为半无限空间海底,其速度、密度和衰减系数分别为 $c_b, \rho_b, a_b$ ,海底界面相对平均高度的起伏为 $\eta(r)$ ,其均值为0。本文中我们考虑声源和接收点在同一位置。

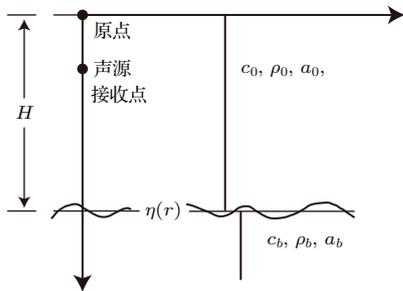


图1 海洋环境示意图

Fig. 1 The geometry of shallow water waveguide

## 2 理论分析

假设声源强度为 $E$ ,则海底粗糙界面引起的浅海低频远程混响强度<sup>[3,6]</sup>为

$$I_R = \frac{4\pi^3 c_0 E}{k_0^2 r_c} \sum_m^M \sum_n^M \varphi_m^2(z_0) \varphi_n^2(z) \times e^{-2(\beta_m + \beta_n) r_c} \Theta_{mn}^R, \quad (1)$$

$$\Theta_{mn}^R = \sigma_\eta^2 P^\eta(2k_0) [S_{mn}^R]^2, \quad (2)$$

$$S_{mn}^R = \varphi_m(H) C_{mn}^R \varphi_n(H), \quad (3)$$

$$C_{mn}^R = k_0^2 - \frac{k_b^2}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) k_m k_n + \frac{(1-\alpha)}{\alpha^2} \gamma_m \gamma_n, \quad (4)$$

$$\gamma_m = \sqrt{k_m^2 - k_b^2}, \quad k_b = 2\pi f / c_b, \quad k_0 = 2\pi f / c_0,$$

$$\alpha = \rho_0 / \rho_b, \quad k_m = k_0 \cos \theta_m, \quad (5)$$

其中, $r_c$ 是散射区域中心距声源位置的水平距离; $\varphi_n(z)$ 是第 $n$ 阶简正波函数的垂直分量在深度 $z$ 处的值<sup>[9]</sup>; $k_m, \beta_m$ 分别是第 $m$ 阶水平波数的实部和虚部; $\Theta_{mn}^R$ 被称为反向散射函数,表征反向散射强度; $S_{mn}^R$ 表征第 $m, n$ 阶模态间的耦合。 $\sigma_\eta^2$ 和 $P^\eta(2k_0)$ 分别是海底起伏 $\eta$ 的方差和粗糙度谱。这里考虑三种粗糙度谱: Goff-Jordan谱<sup>[7]</sup>  $P_{G-J}^\eta$ , Gaussian谱<sup>[8]</sup>  $P_{\text{Gauss}}^\eta(k_0)$ , 指数谱<sup>[8]</sup>  $P_{\text{exp}}^\eta(k_0)$ 。

$$P_{G-J}^\eta(k_0) = \frac{\pi L}{[1 + (k_0 L)^2]^{3/2}},$$

$$P_{\text{Gauss}}^\eta(k_0) = \frac{\sigma^2}{L\pi(L^{-2} + k_0^2)},$$

$$P_{\text{exp}}^\eta(k_0) = \frac{8\sigma^4}{L\pi(4L^{-2} + k_0^2)}. \quad (6)$$

### 2.1 混响平均强度的频率特性

对于远场情况,我们假设所有的模态均以水平方向传播,即 $k_m \rightarrow k_0, \theta_m \rightarrow 0$ 。那么(4)式可以近似写成

$$C_{mn}^R \approx k_0^2 \left[ 1 - \frac{k_b^2}{\alpha k_0^2} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{(1-\alpha)}{\alpha^2} \frac{k_0^2 - k_b^2}{k_0^2} \right] = k_0^2 \left[ 2 - \frac{2}{\alpha} + \frac{1}{\alpha^2} - \frac{c_b^2}{\alpha^2 c_0^2} \right], \quad (7)$$

令 $C = 2 - \frac{2}{\alpha} + \frac{1}{\alpha^2} - \frac{c_b^2}{\alpha^2 c_0^2}$ ,对于相同的海底参数, $C$ 为常数。则(7)式只与声源的波数(也就是频率)有关。

远场条件下,海底起伏的相关长度大约在10 m–20 m之间,当频率大于100 Hz时,根据(6)式,三种粗糙度谱分别近似成

$$P_{G-J}^\eta(k_0) \approx \frac{\pi}{L^2 k_0^3},$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Gauss}}^\eta(k_0) &\approx \frac{\sigma_\eta^2}{\pi L k_0^2}, \\
 P_{\text{exp}}^\eta(k_0) &\approx \frac{8\sigma_\eta^4}{\pi L k_0^2},
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

将(7)式、(8)式代入到(2)式中得到

$$\begin{aligned}
 \Theta_{\text{G-J}} &\propto k_0 \propto f, \\
 \Theta_{\text{Gauss}} &\propto k_0^2 \propto f^2, \\
 \Theta_{\text{exp}} &\propto k_0^2 \propto f^2.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

不同粗糙度谱会造成反向散射函数的差异,从而导致了浅海低频混响平均强度的频率特性发生变化。

### 2.2 混响平均强度的角度特性

远场条件下,根据(1)式,(3)式,(7)式,(9)式可以得出不同海底粗糙度谱不会引起浅海远程低频混响平均强度随角度的变化。因为在远场条件下,相同的海底参数会得到  $C_{mn}^R$  是一个与声源的波数有关的常数。 $\sigma_\eta^2$  和  $P^\eta(2k_0)$  由海洋环境决定,与入射角度无关。由(2)式可以得到  $\Theta_{mn}^R$  与角度有关的量是  $\varphi_m(H)\varphi_n(H)$ 。简正模态只与海洋环境和声源有关,与海底的粗糙度谱无关。所以,在远场条件下,反向散射函数的角度特性不受粗糙度谱的变化影响,进而得到浅海远程低频界面混响的平均强度的角度特征对海底的粗糙度谱不敏感。

### 3 数值仿真

数值仿真参数如下:水深  $H = 100$  m, 其声速密度和声吸收系数分别为  $c_0 = 1500$  m/s、 $\rho_0 = 1$  g/cm<sup>3</sup> 和  $a_0 = 0$ 。海底为半无限大第五类海底<sup>[10]</sup>。其速度  $c_b = 1664$  m/s, 密度为  $\rho_b = 1.79$  g/cm<sup>3</sup>, 声吸收系数为  $a_b = 0.756 \times f$  (dB/m), 要求  $f$  的单位是 kHz。海底界面相对于平均高度的起伏由海底的粗糙度谱来描述,其均值为0, 方差为  $\sigma_\eta^2 = 1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>, 相关长度为  $L = 10$  m。声源和接收点在同一位置,其深度为  $D = 50$  m。单位点声源的频率为 100 Hz, 声源级为 0 dB。

海底的粗糙界面以 Goff-Jordan 谱为例,进行浅海低频远程混响平均强度的仿真。仿真结果如图2所示,横轴为水平传播距离,纵轴为混响平均强度的分贝值。从图2中可以看出:不同距离处,混响强度的频率关系不同。当散射区域的水平传播距离小于 2 km 时,混响强度随频率的增大而增大,如图2(a);当水平传播距离在 3-5 km 时,混响强度则

呈现不规则的强度-频率关系,如图2(b);当水平传播距离大于 10 km 时,混响强度则随频率的增大而增大,如图2(c)所示。这是由频率和声波的传播损失决定的。在近场条件下,频率越大简正波的号数越大,同时传播损失很小,所以在该区域主要是高号简正波的作用使得频率越大混响平均强度越大;随后,由于部分高号简正波衰减很弱,传播损失相对之前的区域减弱,这就使得混响随频率出现不规则变化;最后,高号简正波已衰减很弱,只剩下相同的低号简正波,所以主要是由传播衰减的作用使得频率越高混响平均强度越弱。

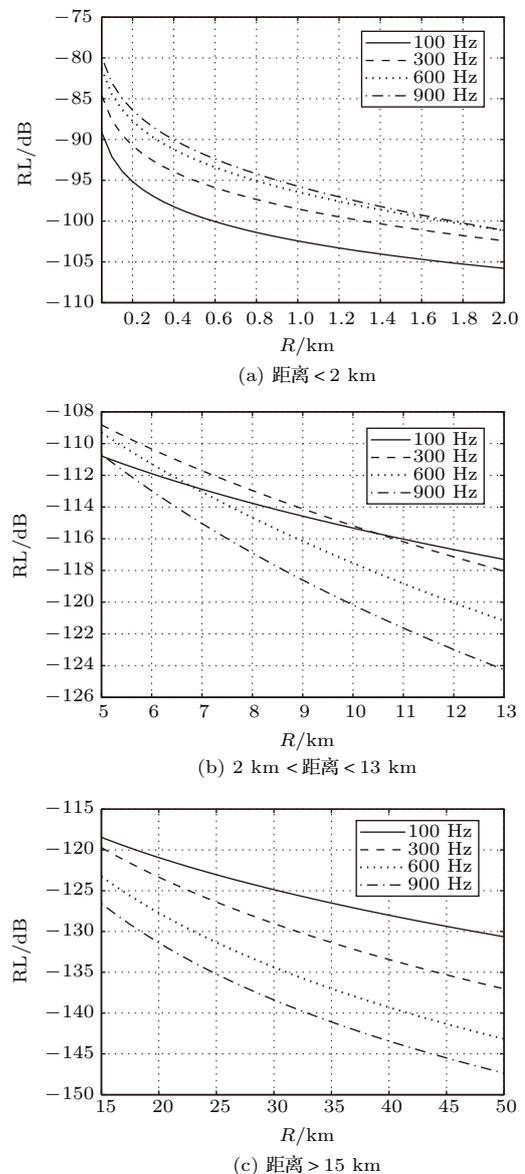


图2 Goff-Jordan 谱引起的混响平均强度随水平距离的变化

Fig. 2 The average reverberation intensity due to the Goff-Jordan spectrum curves vary with range

如图3所示为三种粗糙度谱的界面混响强度进行比较结果。首先,从图3中可以看出,Gaussian谱的混响强度要大于指数分布谱的混响强度。这是由于相同频率条件下,混响平均强度的差异仅与粗糙度谱有关。根据(8)式得到相同方差和相关长度条件下,频率相同时,不同谱之间满足

$$P_{G-J} > P_{Gauss} > P_{exp}, \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式得到 $\theta_{G-J} > \theta_{Gauss} > \theta_{exp}$ ,根据(1)式得到

$$I_{G-J} > I_{Gauss} > I_{exp}. \quad (11)$$

即Goff-Jordan谱的混响平均强度最高,Gaussian谱的混响平均强度次之,指数谱的平均强度最小。其次,图(3)中的仿真结果表明,远场情况下相同的频率间隔内,相同传播距离处,Goff-Jordan谱的混响强度大小变化最大,其余两种粗糙度谱的混响强度的变化相近,而且它们之间的差值始终是相等的。这一现象可以从(9)式中得到解释。远场情况下,Gaussian谱与指数谱的混响平均强度的频率关系相同,即 $\theta_{G-J} \propto f$ , $\theta_{Gauss} \propto f^2$ , $\theta_{exp} \propto f^2$ ,且 $\theta_{Gauss} \sim 8\sigma_{\eta}^2 \theta_{exp}$ 。

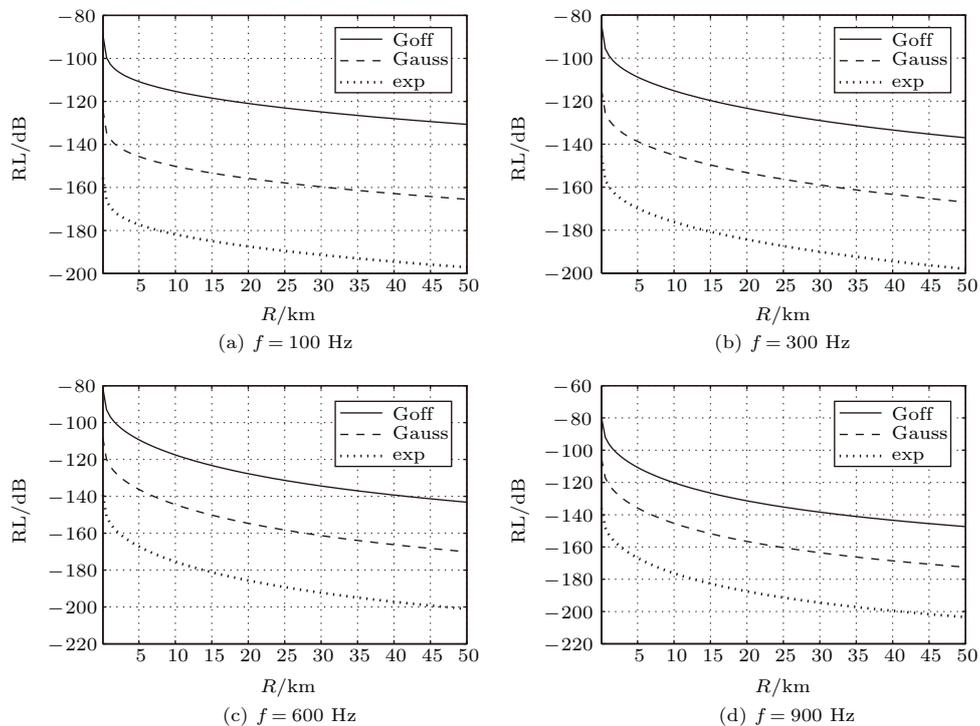


图3 四组不同频率下的海底界面混响平均强度随水平距离的变化关系

Fig. 3 The average reverberation intensity in shallow water for the three kinds of spectrum

## 4 讨论

本文对浅海波导中的低频混响的研究,对于主动探测过程中海洋环境的判断具有一定的指导意义。但由于在本文中,海底界面的起伏所满足的分布是一种假设,尚还没有经过相应的实际数据的验证。

## 5 结论

本文根据全波动理论的浅海低频远程界面混响平均强度的理论分析和数值仿真讨论了混响平

均强度的频率特性和角度特性。通过理论分析可以得出海底反向散射强度与频率的关系如(9)式所示, $\theta_{G-J} \propto f$ , $\theta_{Gauss} \propto f^2$ , $\theta_{exp} \propto f^2$ ,进而浅海低频界面混响平均强度的频率特性对粗糙度谱存在差异。同时根据(2)式和(9)式得到在远场情况下,反向散射强度和界面混响平均强度的角度特性对粗糙度谱的不敏感。

**致谢** 衷心感谢吴金荣、彭大勇、张建兰老师对我的悉心指导。同时感谢中国科学院水声环境特性重点实验室里的其他老师和同学给我的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] ELLIS D D. A shallow-water normal-mode reverberation model[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, 97(5): 2804–2814.
- [2] HOLLAND C W. Fitting data, but poor predictions: Reverberation prediction uncertainty when seabed parameters are derived from reverberation measurements[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, 123(5): 2553–2562.
- [3] 高天赋. 粗糙界面的波导散射和非波导散射之间的关系[J]. *声学学报*, 1989, 14(2): 126–132.  
GAO Tianfu. Relation between waveguide and non-waveguide scattering from a rough interface[J]. *Acta Acust.*, 1989, 14(2): 126–132.
- [4] BASS F G, FUKS I M. *Wave scattering from statistically rough surfaces*[M]. New York: Pergamon, 1979: 72–102.
- [5] TANG D J. *Acoustic wave scattering from a random ocean bottom*[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 1991.
- [6] SHANG E C, GAO T F, WU J R. A shallow-water reverberation model based on perturbation theory[J]. *IEEE J. Oceanic. Eng.*, 2008, 33(4): 451–461.
- [7] GOFF J A, JORDAN T H. Stochastic modeling of seafloor morphology inversion of sea beam data for second-order statistics[J]. *J. Geophysical Research*, 1988, 93(B11): 13589–13608.
- [8] LINGEVITCH J F, LEPAGE K D. Parabolic equation simulations of reverberation statistics from non-Gaussian-distributed bottom roughness[J]. *IEEE J. Oceanic. Eng.*, 2010, 35(2): 199–208.
- [9] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. *Computational ocean acoustics*[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2011.
- [10] 汪德昭, 尚尔昌. *水声学* [M]. 北京: 科学出版社, 2013.