

## 非平坦地形双基地海底混响的快速计算方法改进\*

关承宇,周泽民,曾新吾

(国防科技大学气象海洋学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**针对传统双基地海底混响的计算量问题,对该类海底混响的理论计算模型进行了改进,利用基于 Lambert 散射法则的闭型表达式和基于曲线拟合的数值计算方法,实现了对任意地形双基地海底混响的快速计算。基于该方法,对不同变化规则的非平坦海底双基地混响进行了仿真分析,并讨论了周期和非周期的非平坦海底环境下,地形拟合步长对信混比计算精度的影响。仿真结果表明:该方法能够快速计算得到复杂海底地形的信混比空间分布。相比经典单元散射混响模型,所提出的双基地海底混响计算改进方法可以大幅提高计算效率,同时在合理的海底地形拟合步长前提下兼顾计算结果的精度。

**关键词:**双基地海底混响;信混比;曲线拟合;Lambert 法则;非平坦地形

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)06-175-09

## Improved fast calculation of non-flat bistatic bottom reverberation

GUAN Chengyu, ZHOU Zemin, ZENG Xinwu

(College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The calculation model for bottom reverberation was improved with the closed-form formulas based on Lambert's law and the numerical computation method of curve fitting, in order to solve the problem of traditional bistatic bottom reverberation. Different forms of non-flat bottom were designed and their bistatic reverberation were researched. The influence of fitting steps on the computational accuracy of signal-to-reverberation-ratio was also discussed in the situation of periodic or aperiodic non-flat bottom. The simulation showed that the proposed method can quickly get the signal-to-reverberation-ratio of complex bottom terrain when the fitting step is appropriate. Compared with the classical elemental scattering model, the developed model can improve the computational efficiency greatly, while simultaneously keeping the accuracy.

**Keywords:** bistatic bottom reverberation; signal-to-reverberation-ratio; curve fitting; Lambert's law; non-flat

在浅海环境中,由海底散射体散射引起的混响一直是主动声呐目标探测的主要干扰之一。在信混比(Signal-to-Reverberation Ratio, SRR)较低的区域,目标回波信号极易被混响掩盖,导致声呐的虚警率上升。因此,预先获取混响空间分布,尤其是信混比分布,对提升主动声呐探测性能具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。由于在真实海洋环境中测量混响需要付出高昂实验成本<sup>[3-5]</sup>,因此混响的仿真计算作为一种替代手段,对评估主动声呐性能具有重要价值。

主动声呐方程可以估计声呐在混响背景下的探测性能<sup>[6]</sup>,而准确获取混响值是其中的关键环节。近年来,双基地主动声呐是声呐技术的发展热点。因此,双基地海底混响建模对于该声呐的设计和性能评估具有重要意义<sup>[7]</sup>。虽然,经典的点散射或者单元散射混响模型<sup>[8-11]</sup>可以用于计

算双基地海底混响的空间分布,但在复杂地形环境下为保证精度,计算通常需要耗费较多时间。由于上述混响模型的计算实时性和精确性之间的平衡是一个难以解决的问题,为了提高计算精度,研究者提出了基于不同理论模型的混响计算方法。这其中,主要有扰动近似(Perturbation Approximation, PA)模型和基尔霍夫近似(Kirchhoff Approximation, KA)模型,用于计算海底粗糙面散射或大尺度粗糙边界散射<sup>[12-13]</sup>,基于简正波模型和 Lambert 散射法则的浅海混响计算模型<sup>[14]</sup>,以及利用小倾斜角近似(Small Slope Approximation, SSA)构建的粗糙海底界面混响模型<sup>[15]</sup>。上述文献的研究结果对海底混响的形成和传播机制进行了解释,但是所考虑的海底环境均为平坦海底地形。有研究者提出了针对非平坦海底地形混响空间分布的快速计算模型<sup>[16-17]</sup>,可

\* 收稿日期:2019-03-05

基金项目:国防科研基金资助项目(3101287);国防科技大学科研计划资助项目(JC15-11-01)

作者简介:关承宇(1991—),男,江苏徐州人,博士研究生,E-mail:guan\_nudt@nudt.edu.cn;

曾新吾(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:xinwuzeng@nudt.edu.cn

以对一些单调变化的海底地形混响进行计算,但是这些模型均没有涉及真实的复杂海底地形环境。文献[18]利用实验方法,将复杂测绘技术得到的真实海底地形与高分辨力声呐波形获得的混响空间分布建立联系,从而实现预测混响的目的。但是该研究只针对某一特定海底区域进行了实验,而且不具备实时预测的能力。

为了进一步研究真实海底环境下的双基地混响特性,本文对基于闭型表达式的海底混响计算模型进行了改进,通过曲线拟合,能够对任意地形海底混响进行快速计算。在此基础上,仿真分析了双基地声呐在两种典型非平坦地形环境下的海底混响空间特性,并与经典单元散射模型的计算结果进行了比较。针对海底地形拟合精度问题,讨论了地形拟合步长、地形参数与典型的非平坦地形海底混响计算误差之间的关系,用于指导该方法的实际应用。

### 1 混响快速计算模型

单元散射模型是混响计算的经典模型之一,对于双基地海底混响,接收阵接收到的混响信号是所有散射单元的散射回波信号的叠加。在观测时刻  $t$ ,双基地声呐海底混响强度<sup>[19]</sup>为:

$$I(t) = I_0 \iint \left[ \frac{\sigma_{br} b_s b_r}{(r_s r_r)^2} 10^{-\frac{\alpha_w(r_s+r_r)}{10}} \right] dx dy \quad (1)$$

式中: $I_0$  表示发射声强; $\sigma_{br}(\theta_s, \theta_r, \varphi)$  表示不平整海底散射截面, $\theta_s, \theta_r, \varphi$  分别表示入射角、散射角和双基地角; $\alpha_w$  是水中声衰减系数; $b_s, b_r$  分别是发射阵和接收阵的波束宽度; $r_s, r_r$  分别表示发射阵和接收阵到海底散射单元的距离。

图 1 为双基地海底混响单元散射模型示意图。

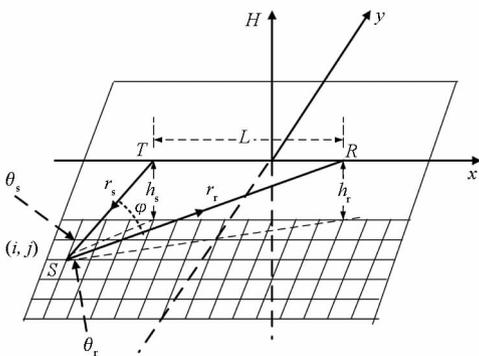


图 1 双基地海底混响单元散射模型示意图  
Fig. 1 Diagram of bistatic bottom reverberation elemental scattering model

从式(1)可以看出,若根据单元散射模型计算海底混响,需要在三维空间中计算发射阵、接收阵和每个散射单元之间的空间距离及空间夹角。

当散射单元数量很多时,计算量较大。对于非平坦海底地形,散射单元的深度不同,因此无法通过合并相似单元简化计算。为了提高混响计算效率,文献[16]将空间参数前期计算过程简化为二维模式,提出海底混响快速计算模型。

在早期关于非平坦地形海底散射损失计算的文献中,研究者做出了如下假设<sup>[20]</sup>:

- 1) 忽略声线到达海面后的二次散射,只考虑从发射阵直接到达海底散射体的传播路径;
- 2) 根据模态消除区域理论,在给定临界角  $\theta_c$  以内,散射传播损失随掠射角线性变化;
- 3) 计算区域的水平尺度远大于垂直海深。

在上述假设前提下,如图 2 所示,双基地海底混响散射强度可以表示为:

$$I_R = P(r_s)P(r_r)\mu f(\varphi)\delta A \quad (2)$$

式中: $r$  表示散射体到收发阵的距离; $P(r)$  表示入射和散射传播项; $\varphi, \mu$  分别表示双基地角和垂直散射系数; $f(\varphi)$  是与  $\varphi$  有关的双基地散射强度; $\delta A$  为散射截面。

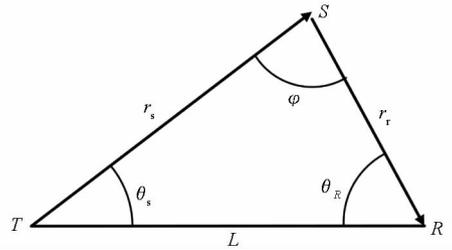


图 2 双基地海底混响快速计算模型示意图  
Fig. 2 Diagram of fast bistatic bottom reverberation model

根据 Lambert 散射法则, $P(r)$  可以表示为:

$$P(r) = \alpha^{-1} r^{-2} [1 - \exp(-A \cdot r)] \quad (3)$$

式中, $A$  为环境参数 ( $A = \alpha \theta_c^2 / (2H)$ ),  $\alpha, \theta_c, H$  分别表示散射损失系数、临界掠射角和平坦海底深度。

将式(3)代入式(2),得到平坦地形双基地海底混响强度的快速计算模型表达式:

$$I_R(\theta_R, t) = [1 - \exp(-A \cdot r_s)] [1 - \exp(-A \cdot r_r)] \times \frac{4c\mu f(\varphi)\delta t\delta\varphi(ct - L\cos\theta_R)}{\alpha^2 [(ct)^2 + L^2 - 2Lct\cos\theta_R] [(ct)^2 - L^2]} \quad (4)$$

式中, $c$  为水下声速, $L$  为图 1 与图 2 所示的发射阵和接收阵之间的基线长度。

根据 Weston 提出的声线不变理论<sup>[17,20]</sup>,式(4)同样适用于非平坦地形海底混响的计算。此时海底深度可以看作一条随水平距离  $r$  不断变化的二维曲线,即  $H_b = H(r)$ 。这里引入有效海深的概念,其具体表达式为:

$$H_{\text{eff}} = \frac{H_s^2 H_b^2}{R} \int_0^R \frac{1}{H_b^3(r)} dr \quad (5)$$

用发射阵和接收阵深度  $H_s, H_r$  与  $H_{\text{eff}}$  的比值代替式(3)中的固定深度  $H$ ,对式(4)进行改进,得到适用于非平坦海底地形的混响强度闭型表达式:

$$I_R(\theta_R, t) = [1 - \exp(-A_s \cdot r_s)] [1 - \exp(-A_r \cdot r_r)] \times \frac{4c\mu f(\varphi) \delta t \delta \varphi H_s H_r (ct - L \cos \theta_R)}{\alpha^2 H_{\text{eff},s} H_{\text{eff},r} [(ct)^2 + L^2 - 2Lct \cos \theta_R] [(ct)^2 - L^2]} \quad (6)$$

式中,环境参数和变化的海底深度有关,即

$$A_{s,r} = \frac{\theta_c^2 H_{c,s,r}^2 \alpha r_{s,r} H_{\text{eff},s,r}}{2H_{\text{scat}}^2 H_s^2} \quad (7)$$

式中,  $H_{c,s,r}$  是和收发阵深度有关的临界深度,表示达到临界角  $\theta_c$  的最陡声线对应的海底深度。

同理,目标散射强度可以参照式(6)表示为:

$$I_T = P(r_s) P(r_r) S_T \quad (8)$$

式中,  $S_T$  为目标强度。

根据上述推导方法,可以得到类似式(6)的闭型表达式。结合式(6)和式(8),可以得到信混比。

## 2 非平坦地形海底混响计算方法改进

### 2.1 改进的快速计算方法

计算式(6)和式(8)的关键是有效海深  $H_{\text{eff}}$  的求解,文献[17]列举了13种海底地形剖面  $H_b(r)$  和相应的  $H_{\text{eff}}$  表达式。对于这些地形均可根据式(5)积分直接求出  $H_{\text{eff}}$  表达式。但在实际海洋环境中,文献中列举的地形剖面属于极少数情况,绝大部分海底地形剖面对式(5)而言是不可积分的,无法得到定量表达式。对于这些不可积地形的海底混响计算,考虑利用数值方法进行改进,使计算模型更加合理,具有更好适用性。

具体来说,针对更复杂的非平坦海底地形,本文通过对已获取的离散数据点进行数值拟合,得到海底地形剖面曲线  $H_b(r)$ ,根据拟合曲线可以求出剖面中任意位置的海底深度值,再利用数值积分求出相应的  $H_{\text{eff}}$  值,代入式(6)、式(8)计算,得到混响强度和目标散射强度的空间分布。图3所示是求解  $H_{\text{eff}}$  的主要过程。曲线拟合采用三次样条插值法,在灵活性和计算速度之间取得合理折中。与高次样条相比,三次插值样条只需要更少的计算存储空间,而且精度比较稳定;与二次插值样条相比,三次样条在模拟任意复杂形状时更为灵活。对于所要研究的海底地形而言,其拟合精度和效率都比较合适。

根据本节提出的快速计算模型改进方法,可以得到比文献[17]更复杂地形的海底混响空间分布结果。为了验证所提改进方法的可行性,将

构造两种没有  $H_{\text{eff}}$  定量表达式的典型海底地形,仿真计算这些地形环境下的混响特性,并与单元散射模型混响计算结果进行比较,证明改进方法的有效性。仿真实验构造的海底环境均为  $100 \text{ km}^2$  的正方形区域,双基地声呐南北方向布设,基线长  $2 \text{ km}$ ,如图4所示,接收阵位于海底地形剖面图中的  $(-1000 \text{ m}, 100 \text{ m})$  处(矩形块),发射阵位于  $(1000 \text{ m}, 120 \text{ m})$  处(圆点)。实验用到的海底散射参数有如下设置:声源级  $SL = 0 \text{ dB}$ ,目标回波强度  $S_T = 10 \text{ dB}$ ,散射损失系数  $\alpha = 2 \text{ dB/rad}$ ,临界掠射角  $\theta_c = 28^\circ$  [16]。

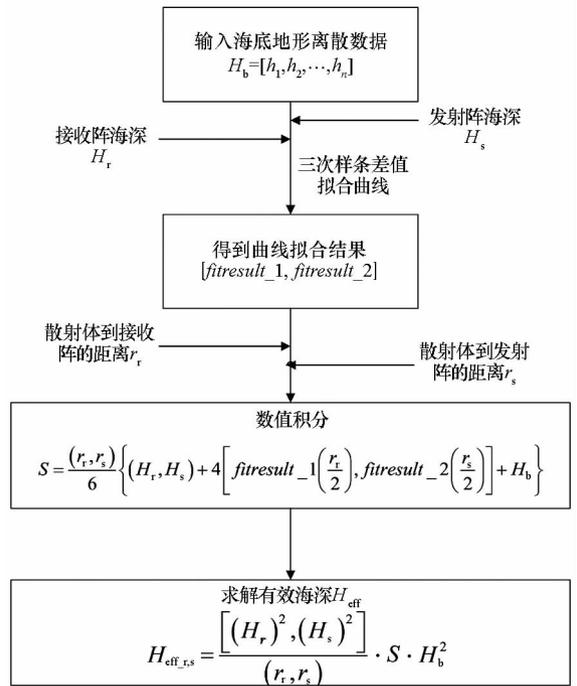


图3 求解  $H_{\text{eff}}$  流程图

Fig. 3 Flow chart for solving  $H_{\text{eff}}$

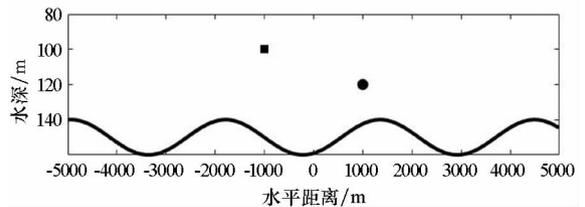


图4 周期非平坦海底地形剖面示意图

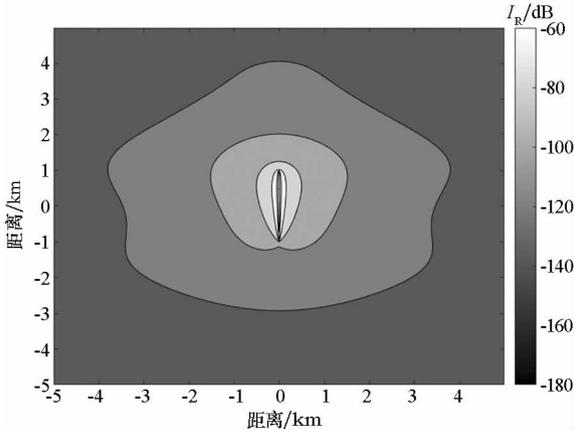
Fig. 4 Periodic non-flat bottom profile

### 2.2 周期非平坦海底地形的混响计算

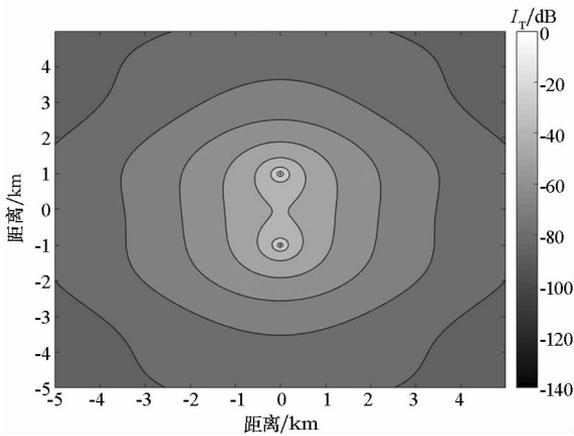
本节构造的周期非平坦海底地形剖面如图4所示,其表达式为  $H_b = 150 + a \sin(\omega R)$ ,其中系数  $a = 10, \omega = 0.002$ 。

图5所示是根据改进的快速计算方法得到的周期起伏地形的海底混响空间分布。在图5中,混响和目标散射强度的等值线出现了和地形起伏类似的弯曲变化。通过改变地形参数还

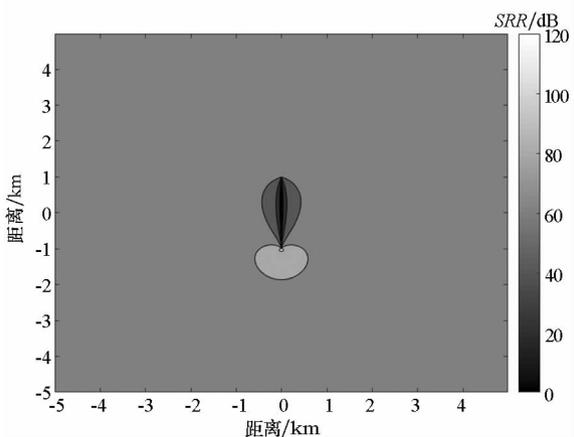
发现,等值线变化规律和地形起伏保持一致。具体来说,起伏周期  $T$  增大会导致等值线变化更频繁;起伏幅值  $a$  增大会导致等值线变化幅度更剧烈。



(a) 混响强度空间分布  
(a) Spatial distribution of  $I_R$



(b) 目标散射强度空间分布  
(b) Spatial distribution of  $I_T$



(c) 信混比强度空间分布  
(c) Spatial distribution of SRR

图 5 周期非平坦海底地形的混响空间分布  
Fig. 5 Spatial distributions of periodic non-flat bottom reverberation

### 2.3 山脊海底地形的混响计算

山脊海底地形剖面如图 6 所示,山脊位于收发阵之间。在收发阵基线中点处有一条东西走向的山脊,顶端坐标为  $(-3000 \text{ m}, 150 \text{ m})$ ,山峰高度为  $100 \text{ m}$ 。构成山脊地形的曲面形式  $H_b = 200 + a \sin(\omega R)$ ,式中系数  $a = 50, \omega = 0.002$ 。

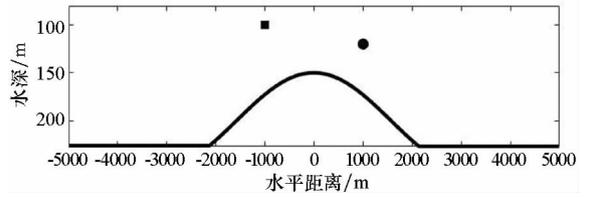
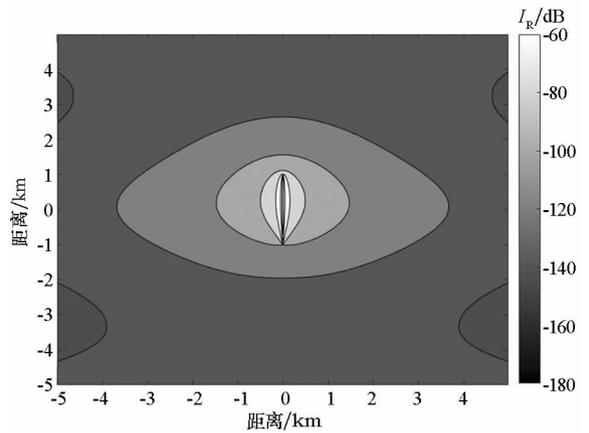
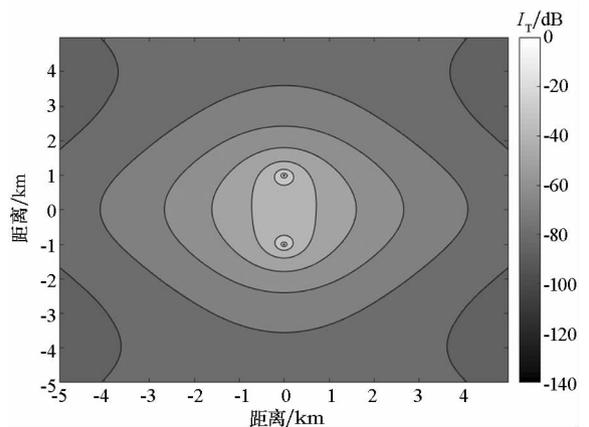


图 6 山脊海底地形剖面示意图  
Fig. 6 Ridge bottom profile

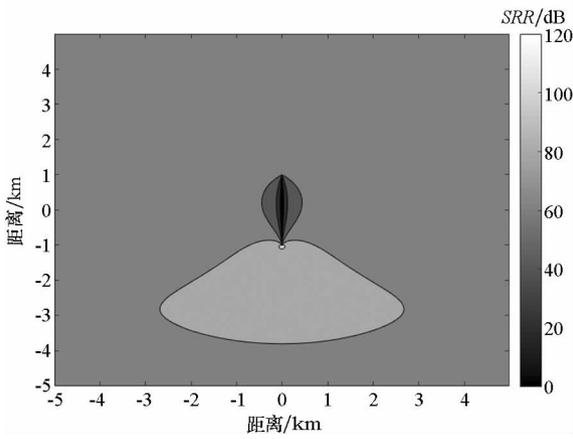
山脊海底地形的混响空间分布如图 7 所示。在图 7(a)、图 7(b)所示的  $I_R, I_T$  分布图中,由于山脊位置改变,等值线围成的区域形状也随之改变。分析图 7(c)的信混比结果可以发现,此时镜面反射区域面积最大,这主要是由于该片海域附近的海底混响强度降低导致的。



(a) 混响强度空间分布  
(a) Spatial distribution of  $I_R$



(b) 目标散射强度空间分布  
(b) Spatial distribution of  $I_T$



(c) 信混比强度空间分布

(c) Spatial distribution of SRR

图7 山脊海底地形的混响空间分布

Fig.7 Spatial distributions of ridge bottom reverberation

### 3 改进模型的计算性能分析

#### 3.1 与经典单元散射模型比较

本节利用改进的快速计算模型和单元散射模型,分别计算非平坦地形的海底混响信混比强度分布,并统计两种模型在不同计算环境下的计算耗时和计算差异。所有仿真实验均在配备3.50 GHz i7-3770K CPU和4 GB RAM的计算机上完成,仿真软件为MATLAB 2017。

##### 3.1.1 计算时间比较

对于单元散射模型,在计算时可以采用两种不同的散射单元构造规则:一是散射单元数量固定,将仿真区域均匀划分成 $1000 \times 1000$ 个散射单元;二是散射单元大小固定,将仿真区域里每个散射单元设置成 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的正方形。利用上述两种不同的构造规则建立单元散射模型,分别计算 $4 \text{ km}^2$ ,  $25 \text{ km}^2$ 和 $100 \text{ km}^2$ 的非平坦地形海底混响,每种模型重复计算100次,并将平均计算耗时与文献[16]中提出的快速计算模型以及本文提出的改进快速计算模型进行比较,得到如表1所示的结果。两种模型所计算的复杂海底地形均为2.2节构造的周期起伏海底地形。

表1 两种模型的平均计算时间

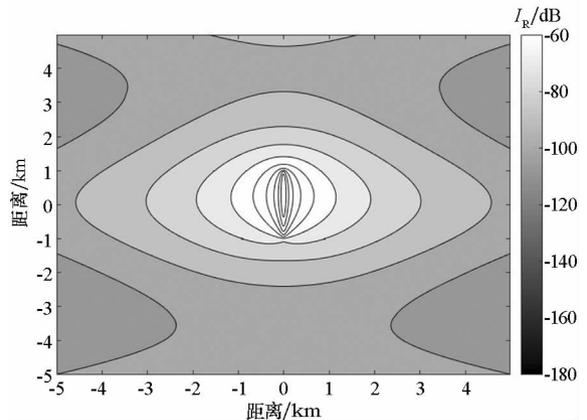
Tab.1 Average computing time of two models s

计算区域面积	单元散射模型		快速计算模型	
	散射单元数量固定	散射单元大小固定	改进前	改进后
$4 \text{ km}^2$	107.991	107.991	2.037	2.560
$25 \text{ km}^2$	108.262	659.254	3.922	4.378
$100 \text{ km}^2$	108.330	2704.313	7.518	8.291

从表1可以看出,在所计算的海底区域面积( $S = n^2$ )相同的情况下,所提模型计算效率明显高于单元散射模型,平均计算时间仅为单元数量固定时散射模型的2%~7%。当散射单元数量固定时,单元散射模型的计算时间不随面积增大而增大;当散射单元大小固定时,单元散射模型平均计算耗时与面积 $n^2$ 成正比;而模型的平均计算耗时与边长 $n$ 成正比。这就意味着计算区域面积越大,快速计算模型的计算效率高的优势越明显。另外,改进方法的仿真计算耗时和原有快速计算模型的耗时在同一数量级水平,但改进方法极大增强了对海底地形的适应性,能够更有效解决复杂地形剖面的海底混响计算问题。

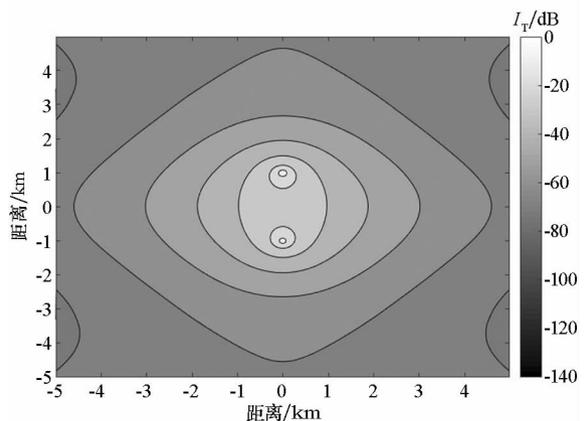
##### 3.1.2 计算精度比较

在环境参数不变的条件下,利用单元散射模型进行仿真实验,对2.3节构造的山脊海底地形环境下的双基地混响进行计算,将得到的分布结果(如图8所示)与2.3节的结果进行比较。比较图8与图6可以看出,两种模型计算得到的混响空间分布的等值线形状吻合较好。单元散射模型在相同区域面积中计算得到的等值线数量明显



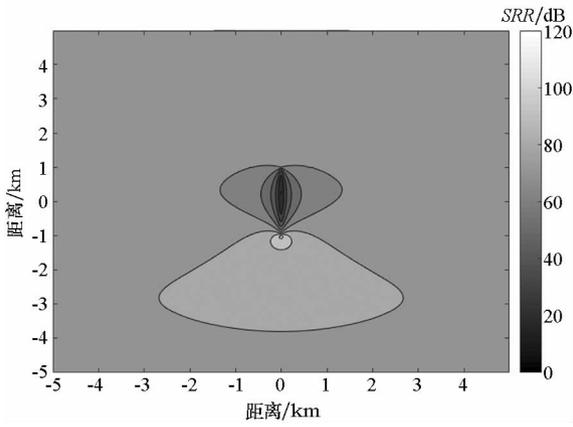
(a) 混响强度空间分布

(a) Spatial distribution of  $I_R$



(b) 目标散射强度空间分布

(b) Spatial distribution of  $I_T$



(c) 信混比强度空间分布  
(c) Spatial distribution of SRR

图 8 山脊海底地形的混响空间分布  
(单元散射模型计算结果)

Fig. 8 Spatial distributions of ridge bottom reverberation  
(calculated by elemental scattering model)

多于快速计算模型,这是由于按照散射单元分别计算时,模型的精细程度更高。另外通过比较可以发现,单元散射模型计算得到的  $I_R$  和  $I_T$  平均强度要高于 2.3 节使用所提方法得到的结果。

两种模型的信混比差异统计分布情况如图 9 所示。从图 9 可以看出,两种模型在 2.3 节地形环境下得到的信混比差异很小,98% 的数据点差异在 0.01 dB 以内。这说明所提方法在大幅提高计算效率的同时,保证了计算精度。

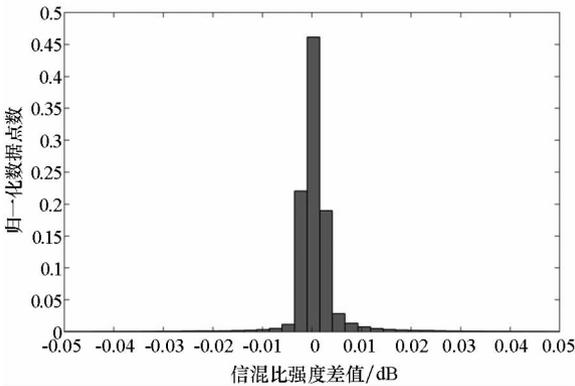


图 9 两种模型的信混比差异统计分布  
Fig. 9 Statistical discrepancy between the SRR of two models

### 3.2 曲线拟合步长对计算精度的影响

在实际工作环境中,主动声呐对海底地形测量得到的一般是离散的水深数据点,而非第 2 节构造的光滑连续地形剖面。当海底地形相对复杂、起伏变化十分剧烈时,步长选取是否合理决定了改进快速计算方法能否同时兼顾精确性和实时性。因此希望选取合理的曲线拟合步长,使模型

在不同地形下的计算性能达到最优。本节定义了两个地形评价量,用于对海底地形的复杂度进行评估。讨论在两种具有代表性的非平坦地形环境下,地形评价量对拟合步长选取的影响,以及拟合步长对信混比计算误差的影响。

#### 3.2.1 周期非平坦海底地形

本节构造了一个以三角函数  $H_b = 150 + a \sin(\omega R)$  为基础的周期性非平坦海底地形剖面,其中,初始系数  $a = 5$ ,  $\omega = 0.005$ ,初始拟合步长与第 2 节一致,为区域长度(10 km)的 0.1%。由于此时选取的数据点个数足够多,与所要构建的海底地形环境基本吻合,因此可以将这一计算步长下构建的海底地形等效为真实的连续海底地形。使步长扩大到区域长度的 1% 和 2.5%,分别得到如图 10 所示地形拟合曲线。从三种步长的拟合效果来看,在图 10 的地形环境下,三种步长的拟合效果差异不大。

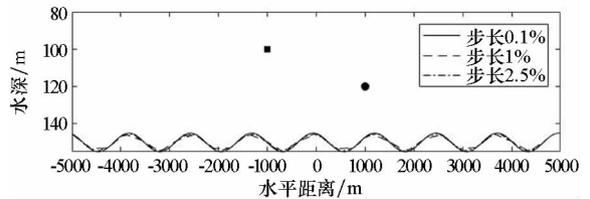


图 10 不同步长周期非平坦海底地形剖面示意图  
Fig. 10 Periodic non-flat bottom profile with different step length

对于周期变化的海底地形,地形变化特点可以用平均曲率  $k$  来评价,如图 11 所示。平均曲率为一段弧的切线转角  $\Delta\alpha$  与弧长  $\Delta l$  之比的绝对值,记为  $k = \left| \frac{\Delta\alpha}{\Delta l} \right|$ 。对于图 10 所示的海底地形,弧长  $\Delta l$  可以表示为:

$$\Delta l = \int_0^{\pi/\omega} \sqrt{1 + (a\omega)^2 \cos^2(\omega R)} dR \quad (9)$$

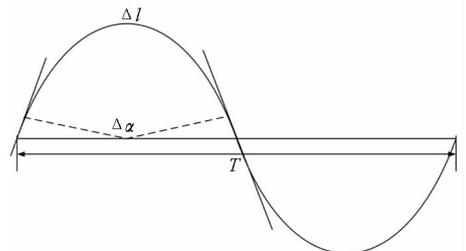
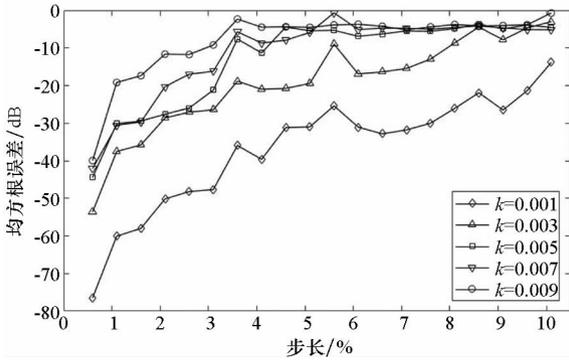


图 11 周期非平坦海底地形剖面平均曲率  $k$   
Fig. 11 Mean curvature  $k$  of periodic bottom

图 10 所示地形的平均曲率为 0.005。  $k$  越大意味着周期非平坦海底地形的变化越剧烈。

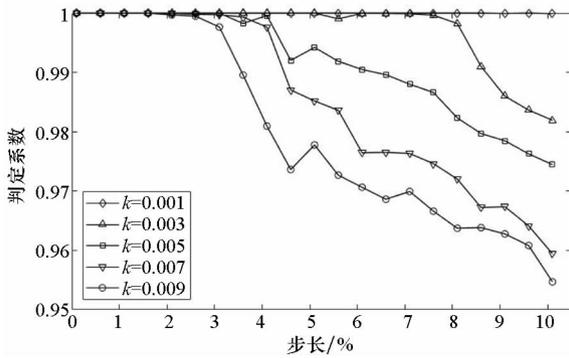
在 0.1% ~ 10% 的范围内调节步长并改变  $a$  和  $\omega$  的值,分别计算五种曲率的地形环境下不同

拟合步长的信混比结果,然后以 0.1% 步长取值时的信混比作为样本数据,比较各个步长取值下的拟合优度。对于拟合优度检验问题,可以采用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和判定系数  $R^2$  来检验数据对样本的拟合效果。图 12 所示是两个拟合优度参数随拟合步长的变化曲线。



(a) RMSE 随拟合步长的变化曲线

(a) Variation of RMSE with fitting steps



(b)  $R^2$  随拟合步长的变化曲线

(b) Variation of  $R^2$  with fitting steps

图 12 周期非平坦海底地形下拟合优度参数随拟合步长的变化曲线

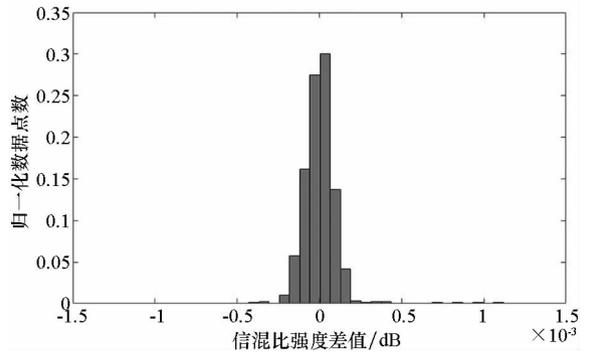
Fig. 12 Variation of goodness parameters of fit with fitting steps under the periodic non-flat bottom profile

从图 12(a) 可以看出,随着拟合步长的增大,五种地形的均方根误差都呈增大趋势。而且地形曲率的增大会导致 RMSE 平均水平增大。尤其对于曲率较大 ( $k = 0.005, 0.007, 0.009$ ) 的三种地形, RMSE 平均水平较高。当拟合步长超过 3.6%, 这三种地形的 RMSE 趋于上界, 说明此后的地形拟合效果都比较差, 而且拟合误差对步长变化不敏感。因此在仿真条件下, 对于高曲率地形环境, 拟合步长的选取要避免超过 3.6%。

定义判定系数  $R^2$  为数据回归平方和与总平方和的比值, 因而其取值范围是  $(0, 1]$ 。  $R^2$  越趋近于 1, 说明数据拟合差异越小。从图 12(b) 中可以看出, 曲率较小 ( $k = 0.001, 0.003$ ) 的地形,

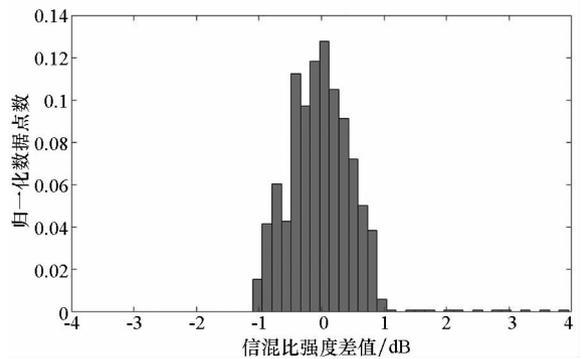
判定系数在拟合步长小于 8% 时都趋近于 1, 拟合差异很小。当拟合步长超过 3.6%, 三个曲率较大地形的  $R^2$  开始快速下降, 说明拟合效果开始变差。这一现象同样证明了对于高曲率的周期非平坦地形, 拟合步长不宜超过 3.6%。

图 13 是以 0.6% 和 3.6% 的步长对  $k = 0.009$  的高曲率地形进行拟合后与样本数据的信混比差异统计图。从图中可以看到: 步长为 0.6% 时, 信混比强度与样本数据的差异均小于  $10^{-3}$  dB; 步长达到 3.6% 时, 差异水平明显增大, 差异小于 0.5 dB 的数据点只占总数的 76%。所以对于所提计算模型, 3.6% 的拟合步长作为可容忍精度阈值是合适的。拟合步长低于这一阈值水平时, 模型在提高计算效率的同时, 保证了计算精度。



(a) 0.6%, 0.1% 拟合步长的信混比差异统计分布

(a) Statistical discrepancy between 0.6% fitting step and 0.1% fitting step



(b) 3.6%, 0.1% 拟合步长的信混比差异统计分布

(b) Statistical discrepancy between 3.6% fitting step and 0.1% fitting step

图 13 周期非平坦海底地形下不同拟合步长信混比差异统计分布

Fig. 13 Statistical discrepancy between different fitting steps under the periodic non-flat bottom profile

### 3.2.2 非周期非平坦海底地形

海洋环境中普遍存在的是非周期非平坦地形, 其特征是海底水深变化不具有周期性, 因此在仿真研究时不适合以曲率来表征地形复杂程度。

本节构造累积高度差  $\Delta h$  来描述一个非周期非平坦地形剖面的变化特点。 $\Delta h$  的定义为一个地形剖面相邻数据点水深差的绝对值之和与该剖面水平距离的比值,具体表达式为:

$$\Delta h = \frac{\sum_{i=1}^N |H(x_{i+1}) - H(x_i)|}{L_H} \quad (10)$$

累积高度差  $\Delta h$  越大,海底地形起伏变化越剧烈。这种非周期非平坦地形的仿真方法为:构造一个(0,1)之间的随机数序列  $a$ ,序列长度等于地形数据点个数。令  $\tilde{a} = (a - \bar{a})h$ ,这里  $\bar{a}$  表示  $a$  的均值, $h$  为地形变化幅值。此时  $\tilde{a} \in \left(-\frac{1}{2}h, \frac{1}{2}h\right)$ ,再利用低通滤波器滤除地形起伏中的局部“毛刺”,使  $\tilde{a}$  更符合真实海底地形特征。海底深度可以表示为  $H_b = H_0 + \tilde{a}$ 。利用蒙特卡洛方法重复迭代 100 次,取海深  $H_b$  的平均值,作为此时构造的海底地形,最后求出对应的  $\Delta h$ 。图 14 所示是利用上述方法构造的海底地形剖面,此时  $\Delta h = 0.03$ 。

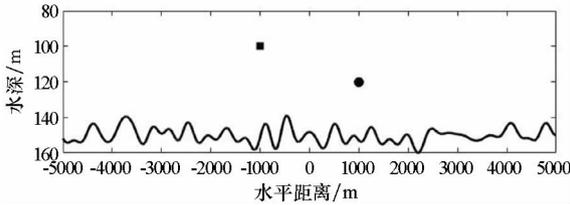
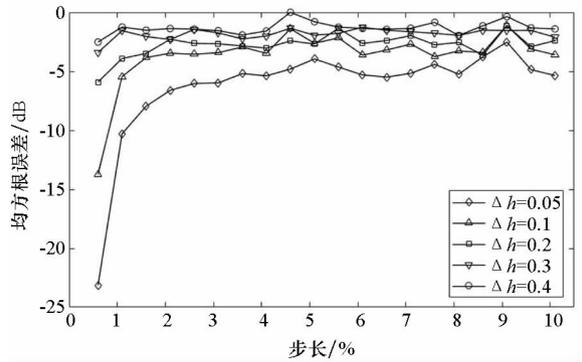


图 14 非周期非平坦海底地形剖面示意图  
Fig. 14 Aperiodic non-flat bottom profile

和 3.1 节研究方法类似,图 15 给出了两个拟合优度参数随步长的变化曲线。从图 15(a)可以看出, $\Delta h = 0.05, 0.1$  时,步长取值在 1% 附近会导致误差快速增大。对于  $\Delta h > 0.1$  的三种地形, RMSE 随步长的变化趋势不明显。这说明当地形复杂度很高时,拟合误差较大,而且误差水平对步长的选取不敏感。

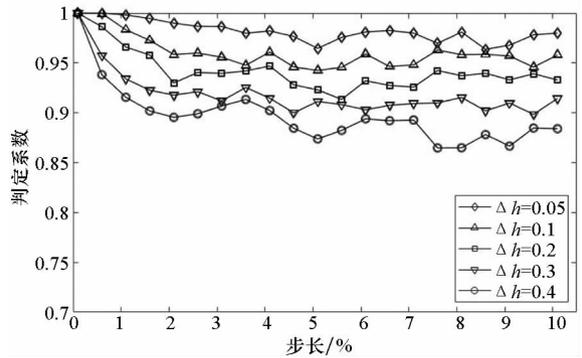
从图 15(b)可以看出,  $R^2$  平均水平略低于 3.1 节图 12(b) 的结果,这说明对非周期地形的拟合效果比周期地形略差。但是随步长变化时五种地形的  $R^2$  水平逐渐降低,对于  $\Delta h = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$  的四种地形,对应的  $R^2$  都在 0.9 以上,只有  $\Delta h = 0.4$  的地形,当步长达到 1.6% 之后,  $R^2$  会下降到 0.9 以下。由此可见,如果以  $R^2 = 0.9$  作为拟合优度的阈值,对于变化剧烈的非周期地形,其拟合步长不宜超过 1.6%。

图 16 是以 0.6%、1.6% 的步长对  $\Delta h = 0.1$  的地形进行拟合后与样本数据的信混比差异统计图。从分布统计结果可以看出:步长为 0.6% 时,



(a) RMSE 随拟合步长的变化曲线

(a) Variation of RMSE with fitting steps



(b)  $R^2$  随拟合步长的变化曲线

(b) Variation of  $R^2$  with fitting steps

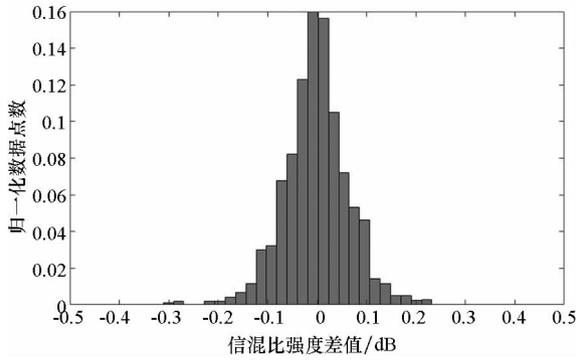
图 15 非周期非平坦地形下拟合优度参数随拟合步长的变化曲线

Fig. 15 Variation of goodness parameters of fit with fitting steps under the aperiodic non-flat bottom profile

信混比强度与样本数据的差异小于 0.1 dB 的数据点占总数的 85%;步长增至 1.6% 时,差异小于 0.1 dB 的数据点降至总数的 12%,这种差异的巨大变化验证了图 15(a) 得到的结论。

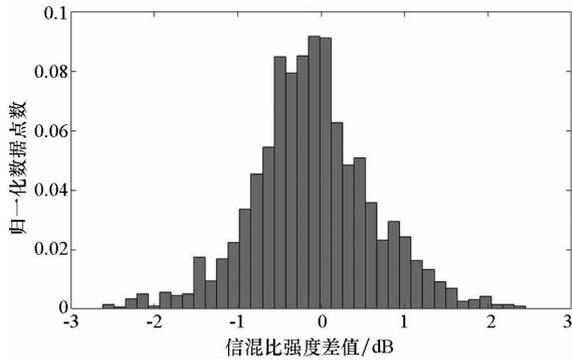
### 4 结论

针对经典混响模型计算效率较低以及现有快速计算模型无法计算较复杂地形的海底混响问题,本文改进了混响快速计算方法,并对复杂地形的双基地海底混响进行建模,通过曲线拟合得到非平坦海底地形剖面,进而快速计算得到海底混响的空间分布。研究分析了不同地形环境下海底混响的分布特性,并提出曲率和累积高度差两个参数用于表征不同非平坦地形的复杂度。在此基础上,讨论了不同地形环境下拟合步长与信混比计算误差的关系。得到的结论对改进方法在真实海洋环境下的计算步长选取具有一定参考价值。相比经典单元散射混响模型,所提模型大幅降低了计算耗时。在相同仿真环境下,改进模型的计算时间仅为单元散射模型的 2%~7%,有效提高



(a) 0.6% 与 0.1% 拟合步长的信混比差异统计分布

(a) Statistical discrepancy between 0.6% fitting step and 0.1% fitting step



(b) 1.6% 与 0.1% 拟合步长的信混比差异统计分布

(b) Statistical discrepancy between 1.6% fitting step and 0.1% fitting step

图 16 非周期非平坦地形下不同拟合步长信混比差异统计分布

Fig. 16 Statistical discrepancy between different fitting steps under the aperiodic non-flat bottom profile

了混响计算的实时性。而且随着计算区域面积的增大,本文方法相比单元散射模型具有更明显的优势。

## 参考文献 (References)

[1] Ellis D D. Shallow water reverberation: normal-mode model predictions compared with bistatic towed-array measurements[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(4): 474-482.

[2] Lepage K D. Bistatic reverberation modeling for range dependent waveguides[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(5): 2253-2254.

[3] Holland C W, Hollett R, Troiano L. Measurement technique for bottom scattering in shallow water[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(3): 997.

[4] Stanic S, Goodman R R, Briggs K B, et al. Shallow-water bottom reverberation measurements[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1998, 23(3): 203-210.

[5] 郭熙业, 苏绍璟, 王跃科. 海底混响统计建模与仿真方法研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(7): 940-944.

GUO Xiye, SU Shaojing, WANG Yueke. Research on the statistical modeling and simulation method for seafloor reverberation[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(7): 940-944. (in Chinese)

[6] 乌立克. 工程水声原理[M]. 洪申, 译. 北京: 国防工业出版社, 1972.

Urick R J. Principles of underwater sound[M]. Translated by HONG Shen. Beijing: National Defense Industry Press, 1972. (in Chinese)

[7] Ellis D D, Vance-Crowe D V. Bistatic reverberation calculations using a three-dimensional scattering function[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(5): 2207.

[8] Lepage K D. Statistics of broad band bottom reverberation predictions in shallow water waveguides[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 330-346.

[9] 郭熙业, 苏绍璟, 王跃科, 等. 收发合置情况下海底混响仿真[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(2): 141-145.

GUO Xiye, SU Shaojing, WANG Yueke, et al. Research on simulation seafloor reverberation in the case of monostatic[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(2): 141-145. (in Chinese)

[10] 郭熙业, 苏绍璟, 王跃科. 运动声呐海底混响建模及仿真研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(5): 92-96.

GUO Xiye, SU Shaojing, WANG Yueke. Research on modeling and simulating seafloor reverberation with the moving sonar[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(5): 92-96. (in Chinese)

[11] Keiffer R S. Locating strong acoustic scattering on the seafloor using wedge diffraction theory[C]// Proceedings of the Oceans MTS, 2016.

[12] Jackson D R, Winebrenner D P, Ishimaru A. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 79(5): 1410-1422.

[13] Xu L, Yang K, Guo X, et al. Bistatic bottom reverberation in deep ocean: modeling and data comparison[C]// Proceedings of the Oceans MTS, 2016.

[14] Ellis D D. A shallow-water normal-mode reverberation model[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97(5): 2804-2814.

[15] Voronovich A G. Wave scattering from rough surfaces[M]. Germany: Springer-Verlag, 1999.

[16] Harrison C H. Fast bistatic signal to reverberation ratio calculation[J]. Journal of Computational Acoustics, 2005, 13(2): 317-340.

[17] Weston D E. Propagation in water with uniform sound velocity but variable-depth lossy bottom[J]. Journal of Sound and Vibration, 1976, 47(4): 473-483.

[18] Makris N C, Avelino L Z, Menis R. Deterministic reverberation from ocean ridges[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97(6): 3547-3574.

[19] Williams K L, Jackson D R. Bistatic bottom scattering: model, experiments, and model / data comparison[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(1): 169-181.

[20] Weston D E. Intensity range relations in oceanographic acoustics[J]. Journal of Sound and Vibration, 1971, 18(2): 271-282.