

双基地海底散射建模与仿真分析

侯 朋, 许文海, 李 瑛

(大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁大连 116026)

摘要: 海底的声散射是产生浅海混响的主要原因之一。采用小斜率近似方法研究了粗糙液-液分界面的海底散射问题, 通过一个统一的方法实现微扰近似和 Kirchhoff 近似的无缝衔接且不受表面高度均方根条件限制。类比 APL-UW 模型, 利用最低阶小斜率近似求解粗糙海底界面散射截面, 并结合 Jackson 等人的海底沉积层体积散射截面表达式, 建立了一个计算双基地海底散射强度的“小斜率-体积”模型。针对几种典型的海底类型进行了数值仿真与性能分析, 并将数值预报结果与 APL-UW 模型进行了对比。结果表明, 小斜率-体积模型在整个角度范围内较为准确, 并且与 APL-UW 模型的预报结果吻合程度较高, 两者散射强度差值小于 2 dB。

关键词: 双基地海底散射; 小斜率近似; 粗糙海底界面; APL-UW 模型

中图分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-02-0117-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.02.002

Modeling and simulation analysis of bistatic seafloor scattering

HOU Peng, XU Wen-hai, LI Ying

(Department of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: Scattering of sound due to seafloor sediment is the main source of shallow water reverberation. Seafloor scattering from the rough liquid-liquid interface is investigated by using the small-slope approximation (SSA). The SSA employs a unified method that seamlessly connects the small-roughness perturbation approximation and Kirchhoff approximation without any restriction on the RMS height of surface. Analogous to well-known APL-UW model, a “SSA-Volume” model is provided for calculating the bistatic scattering strength, which combines roughness-scattering cross section predicted with the lowest-order SSA and volume-scattering cross section formulated by Jackson et al. Numerical simulation and performance analysis are conducted on several typical types of seafloor, and the predictions are compared with the APL-UW model. It is found that the SSA-Volume model is more accurate in the whole range of angle and the numerical results also show good agreement between the predictions of SSA-Volume model and APL-UW model, with slight differences of scattering strength less than 2 dB.

Key words: bistatic seafloor scattering; small-slope approximation; roughness seafloor interface; APL-UW model

0 引言

海底混响是影响双基地声纳工作性能的主要因素之一, 尤其是在浅海工作环境。海底混响主要是由粗糙海底界面散射和海底沉积层体积散射引起。根据这两种散射机制, 国内外学者已建立了很多高频双基地海底散射模型^[1-5], 其中最典型的是 Jackson 等人^[1]提出的 APL-UW 模型。该模型将双基地海底散射视为粗糙海底界面散射和海底沉积层体积散射之和。APL-UW 模型得到了大量的实验验证, 并为高频声波海底散射的物理过程提供了一个比较合理的描述, 模型适用的频率范围为 10~100 kHz。

Choi 等人^[6]的实验结果表明, 粗糙海底界面散射常常是高频海底散射的主要贡献。APL-UW 模型中利用插值函数将 Kirchhoff 近似和微扰近似连接在一起求解粗糙海底界面散射截面的方法相对来说比较笨拙, 并且上述方法对声波的频率有较强的依赖性^[3]。利用小斜率近似求解粗糙界面散射问题具有不受表面高度均方根条件限制等优点, 因而近几年发展较快^[7-10]。小斜率近似方法实际上是一种复合粗糙度模型, 主要特点包括^[7]: (1) 在其推导过程中包含了微扰方法和 Kirchhoff 近似, 不需要选择截止波数; (2) 使用了级数来进行散射幅度的描述, 可以通过保留传递矩阵当中的更多项来得到更高的精度; (3) 当传递矩阵由斜率的二阶形式建立时, 它将蜕化为射线声学近似方法; (4) 该方法在每一阶上都是互易的, 并且在低阶时很容易计算处理散射截面。

收稿日期: 2009-11-25; 收稿日期: 2010-03-03

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAG18B103)

作者简介: 侯朋(1982-), 男, 辽宁海城人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理、水下探测技术及嵌入式系统开发。

通讯作者: 许文海, E-mail: whxu@newmail.dlmu.edu.cn

在上述理论基础上,本文采用小斜率近似研究粗糙液-液分界面的海底散射问题,提出了“小斜率-体积”模型。类比 APL-UW 模型,本文利用最低阶小斜率近似求解粗糙海底界面散射截面,并结合 Jackson 等人^[2]的海底沉积层体积散射截面表达式,给出了双基地海底散射强度的计算公式。

1 双基地海底散射模型

1.1 模型的定义和假设

图 1 给出了双基地海底散射问题的几何模型。声源和接收机放置在海水中,相隔一定的距离。从声源 S 发出的球面波经海底散射面 A 散射后传播至接收机 R 。图中, θ_i 、 θ_s 与 φ_s 分别指为入射掠射角、散射掠射角与双基地角, φ_s 为 θ_s 和 θ_i 在 x - y 平面的投影方位角度差,各角度的取值范围为: $0^\circ < \theta_i \leq 90^\circ$, $0^\circ < \theta_s < 180^\circ$, $-180^\circ \leq \varphi_s \leq 180^\circ$ 。 \mathbf{k}_i 和 \mathbf{k}_s 分别指入射波矢量和散射波矢量,可表示为:

$$\mathbf{k}_i = k_w(\mathbf{e}_x \cos \theta_i - \mathbf{e}_z \sin \theta_i) \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_s = k_w(\mathbf{e}_x \cos \theta_s \cos \varphi_s + \mathbf{e}_y \cos \theta_s \sin \varphi_s + \mathbf{e}_z \sin \theta_s) \quad (2)$$

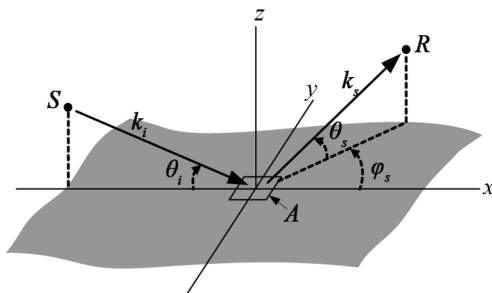


图 1 散射模型几何示意图

Fig.1 Schematic of bistatic scattering geometry

在推导双基地海底散射强度之前,需要对模型做一些假设。首先,本文只考虑单散射问题。另外一些有关模型的假设如下:

(1) 声波在海底的透射是轻微的,因此,沉积层的体积散射过程可以描述为一个表面过程,并可用横切面的有效界面散射定律描述。

(2) 海底沉积物为无损的流体,不考虑其弹性和粘滞性的影响,且沉积物性质均匀,无分层和任何形式的梯度,沉积物性质可以用密度、声速和声吸收系数来描述。

(3) 海底界面起伏为各向同性、二维的高斯随机过程,完全可利用二维高度谱密度描述,表示为:

$$W(K) = \frac{w_2}{(h_0 K)^{\gamma_2}} \quad (3)$$

式中, K 为二维矢量波数, w_2 和 γ_2 分别为二维海底

界面起伏的谱强度和谱指数,谱指数的取值范围为: $2.4 \leq \gamma_2 \leq 3.9$, h_0 为参考长度,取 $h_0 = 1\text{cm}$ 。

(4) 海底沉积层中体积的不均匀性用三维、各向同性的谱密度描述,表示为:

$$W_{\rho\rho}(k) = \frac{w_3}{(h_0 k)^{\gamma_3}} \quad (4)$$

可压缩性谱密度为:

$$W_{KK} = \mu^2 W_{\rho\rho} \quad (5)$$

密度不均匀性和可压缩性的互谱为:

$$W_{\rho K} = \mu W_{\rho\rho} \quad (6)$$

式中, μ 为沉积物中密度扰动的压缩比, w_3 和 γ_3 分别为海底沉积物不均匀性谱强度和谱指数。

为后续计算方便,定义如下几何参数:

$$\Delta K = k_w [(\cos \theta_i)^2 - 2 \cos \theta_i \cos \theta_s \cos \varphi_s + (\cos \theta_s)^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$\Delta k_z = k_w (\sin \theta_i + \sin \theta_s) \quad (8)$$

$$\Delta k^2 = \Delta K^2 + \Delta k_z^2 \quad (9)$$

式中, k_w 为水中的声波数。

海底散射主要是由海底表面粗糙引起的界面散射和海底沉积层非均匀引起的体积散射两部分组成,故双基地海底散射强度可表示为:

$$S_b(\theta_i, \theta_s, \varphi_s) = 10 \lg [\sigma_r(\theta_i, \theta_s, \varphi_s) + \sigma_v(\theta_i, \theta_s, \varphi_s)] \quad (10)$$

式中, $\sigma_r(\theta_i, \theta_s, \varphi_s)$ 和 $\sigma_v(\theta_i, \theta_s, \varphi_s)$ 分别为由粗糙海底界面散射和海底沉积层体积散射引起的单位面积单位立体角对应的无量纲的散射截面。

1.2 模型的输入参数

双基地海底散射模型的输入参数如表 1 所示。在模型中,用 v 表示沉积层的平均声速与海水中的声速之比, ρ 表示沉积层密度和海水密度之比, δ 为损失参数,描述为沉积层中声波虚波数和实波数之比,它可以借助沉积物的吸声系数 α_b 来获得:

$$\delta = \frac{\alpha_b v c \ln 10}{40 \pi f} \quad (11)$$

在这些参数的基础上定义下列复向量:

$$\kappa = \frac{1 + i\delta}{v} \quad (12)$$

表 1 双基地海底散射模型的输入参数

Table 1 Bottom parameters used as inputs to the bistatic model

符号	定义
ρ	沉积物密度和海水密度比
v	沉积物中声速和海水声速比
δ	沉积物中虚波数和实波数的比率
γ_2	海底界面起伏谱指数
w_2	海底界面起伏谱强度(cm^4)
γ_3	海底沉积物不均匀性谱指数
w_3	海底沉积物不均匀性谱强度(cm^3)
μ	海底沉积物中密度扰动的压缩比

$$P(\theta) = \sqrt{\kappa^2 - \cos^2 \theta} \quad (13)$$

$$R(\theta) = \frac{\rho \sin \theta - P(\theta)}{\rho \sin \theta + P(\theta)} \quad (14)$$

式中, i 为虚数单位, κ 为沉积层中的声波复波数与海水中声波实波数之比, $R(\theta)$ 为平坦界面 Rayleigh 反射系数。

1.3 粗糙海底界面散射

参考 Jackson 和 Richardson 关于高频粗糙海底界面散射模型的相关理论^[11], 本文采用最低阶小斜率近似求解粗糙海底界面散射截面, 表示为:

$$\sigma_r(\theta_i, \theta_s, \phi_s) = \frac{k_w^4 |A_{ww}(\theta_i, \theta_s, \phi_s)|^2}{2\pi \Delta K^2 \Delta k_z^2} \cdot I_K \quad (15)$$

其中,

$$I_K = \frac{\Delta K^2}{2\pi} \int e^{-i\Delta \mathbf{K} \cdot \mathbf{R}} [e^{-\frac{1}{2}\Delta k_z^2 S(\mathbf{R})} - e^{-\Delta k_z^2 h^2}] d^2 \mathbf{R} \quad (16)$$

式(15)中, $A_{ww}(\theta_i, \theta_s, \phi_s)$ 的确定依赖于声波理论的选择, 而 Kirchhoff 积分 I_K 不依赖于声波理论的选择。采用最低阶小斜率近似求解散射截面十分容易, 并且同样具备了微扰近似和 Kirchhoff 近似的全部优良特性, 通过一个单一的近似实现了全角度覆盖而不损失精度^[10]。式(16)中, $S(\mathbf{R})$ 为结构函数, 定义为:

$$S(\mathbf{R}) = C_h^2 R^{2\alpha} \quad (17)$$

其中,

$$C_h^2 = \frac{2\pi w_2 \Gamma(2-\alpha) 2^{-2\alpha}}{h_0^2 \alpha(1-\alpha) \Gamma(1+\alpha)} \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{\gamma_2}{2} - 1 \quad (19)$$

式中, Γ 为伽玛函数。

Moe 和 Jackson^[12]给出了流体模型 $A_{ww}(\theta_i, \theta_s, \phi_s)$ 的计算方法, 表示为:

$$A_{ww}(\theta_i, \theta_s, \phi_s) = \frac{1}{2} [1 + R(\theta_i)] [1 + R(\theta_s)] G \quad (20)$$

其中:

$$G = \left(\frac{1}{\rho} - 1\right) \left[\cos \theta_i \cos \theta_s \cos \phi_s - \frac{P(\theta_i)P(\theta_s)}{\rho}\right] + 1 - \frac{\kappa^2}{\rho} \quad (21)$$

根据模型的假设(3), Kirchhoff 积分 I_K 可简化为:

$$I_K = \int_0^\infty J_0(u) e^{-qu^{2\alpha}} u du \quad (22)$$

其中,

$$q = \frac{1}{2} C_h^2 \Delta k_z^2 \Delta K^{-2\alpha} \quad (23)$$

式中, $J_0(u)$ 为第一类 0 阶贝塞尔函数。式(22)涉及到非初等函数的积分求解问题, 文献[4]和[10]中给出了求解该积分问题的有效的数值计算方法。

1.4 海底沉积层体积散射

沉积层体积散射是由于沉积层中声速和密度的随机起伏引起的。在沉积层中, 声压满足 Helmholtz 方程, 根据 Born 近似求其远场解, 得出海底沉积层体积散射截面的表达式为^[2]:

$$\sigma_v(\theta_i, \theta_s, \phi_s) = \frac{|1 + R(\theta_i)|^2 |1 + R(\theta_s)|^2 \sigma_{pv}}{2k_w \rho^2 \text{Im}[P(\theta_i) + P(\theta_s)]} \quad (24)$$

其中,

$$\sigma_{pv} = \frac{\pi}{2} k_w^4 |\mu \kappa^2 + \cos(\theta_i) \cos(\theta_s) \cos(\phi_s) - P(\theta_i)P(\theta_s)|^2 W_{pp}(\Delta k') \quad (25)$$

$$\Delta k' = \sqrt{\Delta K^2 + k_w^2 \{\text{Re}[P(\theta_i) + P(\theta_s)]\}^2} \quad (26)$$

式中, Im 和 Re 分别为取复数的实部和虚部。

将式(15)和(24)代入式(10)可得出利用小斜率-体积模型求解双基地海底散射强度的最终表达式。

2 数值仿真与性能分析

针对本文提出的小斜率-体积模型, 本节将通过数值仿真考察该模型的性能。在仿真过程中, 选择了几种典型的海底类型进行分析, 并将数值预报结果与 APL-UW 模型进行了对比。仿真输入的环境声学参数如表 2 所示^[3]。Jackson 等人^[1]将海底沉积物类型与海底环境声学参数间建立联系, 给出了海底沉积物类型、平均粒径以及对应的海底环境声学参数取值, 本文将参考这些取值进行数值仿真工作。每一个分析中均取多组参数值进行仿真, 由于图形具有相似性, 因此仅取一组代表性的图形进行说明。

2.1 平面内海底散射

考虑声源和接收机在同一平面内的双基地海底散射情况, 即 $\phi_s = 0^\circ$ 。

(1) 选取声波频率 $f=30$ kHz, 海水声速 $c=1500$ m/s, 海底底质为粗砂进行仿真分析。图 2 给出了

表 2 不同海底类型的环境声学参数

Table 2 Environmental acoustic parameters for different seafloors				
环境参数	海底沉积物类型			
	粗砂	中砂	细砂	中粉砂
ρ	2.231	1.845	1.451	1.149
ν	1.2503	1.1782	1.1072	0.9873
δ	0.01638	0.01624	0.01602	0.00386
γ_2	3.25	3.25	3.25	3.25
w_2	0.00022	0.000141	0.000086	0.0000164
μ	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
γ_3	3.0	3.0	3.0	3.0
w_3	0.00036	0.00036	0.000354	0.000043

入射掠射角 θ_i 分别为 10° 和 45° 时的海底散射强度随散射掠射角 θ_s 的变化曲线, APL-UW 模型所预报的结果也在图中给出。

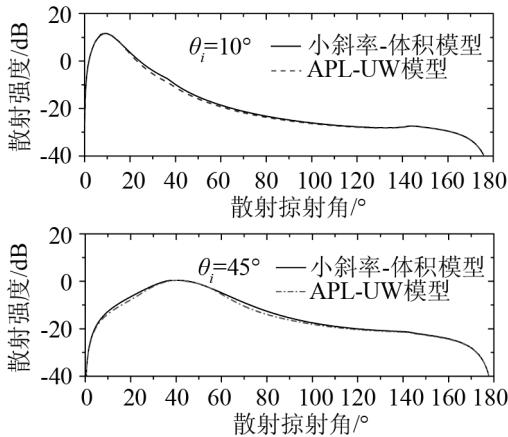


图2 不同入射掠射角下散射强度随散射掠射角变化关系
Fig.2 Scattering strength as a function of θ_s

从图2可见,小斜率-体积模型与 APL-UW 模型的预报结果吻合程度较高。对于入射掠射角 $\theta_i=45^\circ$ 的情况,散射强度的细微差别仅出现在 20° 和 80° 散射掠射角附近,并且差值小于 1 dB。此外,在镜面反射方向,散射强度明显出现极值,并且对于不同的入射掠射角,散射强度的极值也不同,其原因为声信号的传播、反射及散射过程均与入射波和散射波的角度配置密切相关。

(2) 取声波频率 $f=30\text{ kHz}$, 海水声速 $c=1500\text{ m/s}$, 海底底质分别为粗砂和中粉砂进行仿真,并考察不同海底类型中界面散射效应和体积散射效应对整个散射过程的贡献。图3给出了在入射掠射角 $\theta_i=10^\circ$ 情况下不同海底底质的散射强度随散射掠射角的变化曲线。

从图3可以看出,对于如中粉砂这类“软海底”,在较大的角度范围内,沉积层体积散射效应大于粗

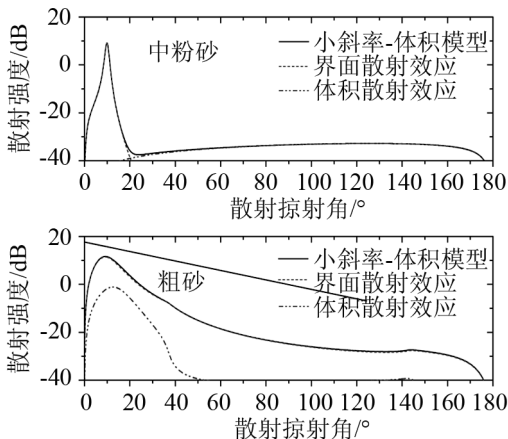


图3 界面散射和体积散射效应随散射掠射角变化关系
Fig.3 Effects of roughness and volume scattering as a function of θ_s

糙界面散射效应;而对于粗砂这类的“硬海底”,在较大的角度范围内,粗糙界面散射效应将大于沉积层体积散射效应。从图3的数值预报结果还可以得出,在镜面反射方向附近,粗糙界面散射起主导作用。

(3) 分别选取声波频率为 10 kHz 和 100 kHz,海底底质为中砂进行仿真分析。这两个频率为 APL-UW 模型适用频率范围的边界值,由此可以数值考察小斜率-体积模型在上述边界频率的性能,并将预报结果与 APL-UW 模型进行了对比。图4给出了入射掠射角为 30° 边界频率情况下的散射强度随散射掠射角的变化曲线。

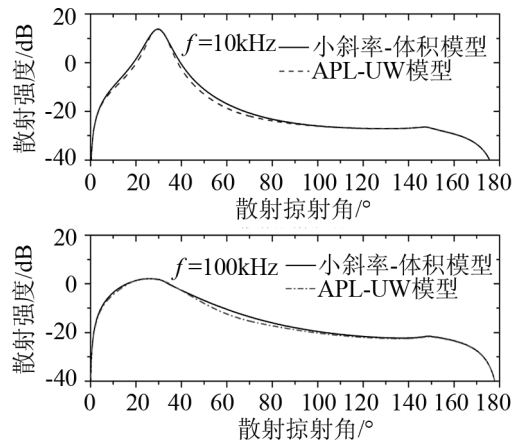


图4 边界频率下散射强度随散射掠射角变化关系
Fig.4 Scattering strength as a function of θ_s for boundary frequencies

从图4可以看出,小斜率-体积模型与 APL-UW 模型的预报结果基本一致。对于 $f=10\text{ kHz}$ 的情况,散射强度的细微差别出现在 20° 和 60° 散射掠射角附近;而对于 $f=100\text{ kHz}$ 的情况,散射强度的细微差别出现在 10° 和 70° 散射掠射角附近。总体上来看,散射强度的差值范围介于 1~2 dB 之间。在镜面反射方向附近,小斜率-体积模型与 APL-UW 模型预报结果展现出略微差别,其原因为 APL-UW 模型中应用插值算法实现 Kirchhoff 近似和微扰近似的平滑衔接所致。

2.2 非平面内海底散射

考虑声源和接收机不在同一平面内的双基地海底散射情况,即 $\varphi_s \neq 0^\circ$ 。

(1) 仿真选用参数为: 声波频率 $f=40\text{ kHz}$, 海水声速 $c=1500\text{ m/s}$, 海底底质为细砂,入射掠射角 $\theta_i=30^\circ$, 双基地角 φ_s 分别为 45° 和 135° 。数值考察不同双基地角下散射强度随散射掠射角 θ_s 的变化曲线,仿真结果如图5所示。

由图5可见,小斜率-体积模型与 APL-UW 模

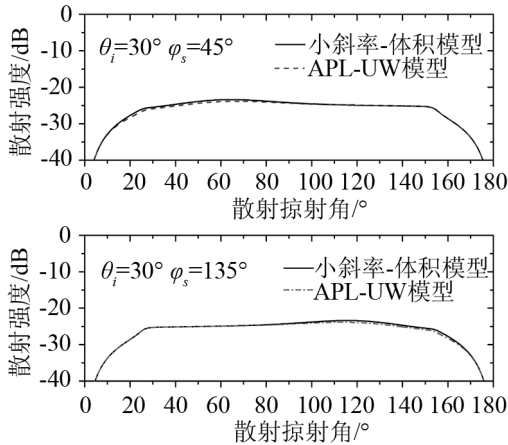


图 5 不同双基地角下散射强度随散射掠射角变化关系
Fig.5 Scattering strength as a function of θ_s

型的预报结果吻合度极高。对于非平面内散射，散射强度在整个角度范围内未出现明显的极值，双基地角取 ϕ_s 和 $180^\circ - \phi_s$ 的图形是关于 $\theta_s = 0^\circ$ 轴对称的。

(2) 选取声波频率 $f=40\text{ kHz}$ ，海水声速 $c=1500\text{ m/s}$ ，海底底质分别为中砂和中粉砂，掠射角 $\theta_i = \theta_s = 30^\circ$ 进行仿真。数值考察不同海底底质下散射强度随双基地角 ϕ_s 的变化曲线，仿真结果如图 6 所示。

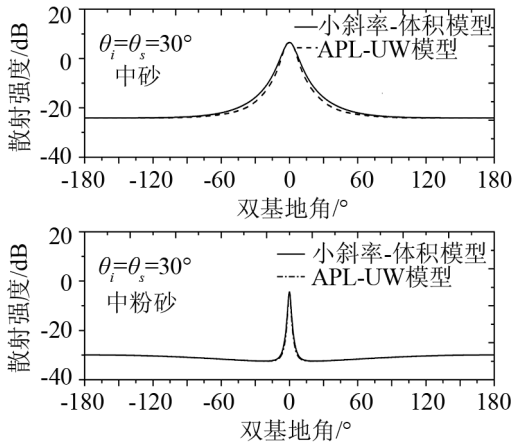


图 6 不同海底底质下散射强度随双基地角变化关系
Fig.6 Scattering strength as a function of ϕ_s for different types of seafloor

从图 6 可以看出，小斜率-体积模型与 APL-UW 模型的预报结果吻合程度仍然较高。对于中砂海底，散射强度的细微差别出现在 -30° 和 30° 双基地角附近，散射强度的差值小于 2 dB 。当 $\phi_s = 0^\circ$ 时，即在镜面反射方向上，散射强度出现极值，并且散射强度曲线是关于 $\phi_s = 0^\circ$ 轴对称的。

(3) 分别选取声波频率为 20 kHz 和 200 kHz ，海水声速 $c=1500\text{ m/s}$ ，海底底质为细砂，掠射角 $\theta_i = \theta_s = 45^\circ$ 进行仿真，数值考察体积散射效应与频率的关系。图 7 给出了不同频率下散射强度随双基地角 ϕ_s 的变化曲线，体积散射贡献也在图中给出。

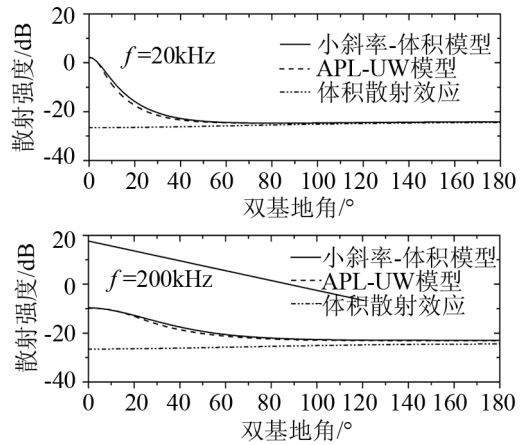


图 7 不同频率下散射强度随双基地角变化关系
Fig.7 Scattering strength as a function of ϕ_s for different frequencies

从图 7 可以看出，在镜面反射方向上，频率为 20 kHz 的海底散射强度大于频率为 200 kHz 的情况，其原因为频率越高，相对来说海底就越粗糙，镜面反射方向的能量也就越低。此外，从图 7 可以看出，随着频率的增加，体积散射的贡献也将越来越小。与高频声波相比，频率较低声波将有更多的能量透射到海底。因此，高频平面波的海底散射过程受体积散射的影响较小。

3 结论

本文利用最低阶小斜率近似求解粗糙海底界面散射截面，并类比 APL-UW 模型，提出了小斜率-体积模型。通过数值仿真分析，我们可以得出：小斜率-体积模型与 APL-UW 模型的数值预报结果基本一致，在 APL-UW 模型的适用频率范围内，散射强度差值小于 2 dB ；小斜率近似作为一个统一的方法，避免了 APL-UW 模型中求解界面散射成分所必需的插值算法，实现了 Kirchhoff 近似和微扰近似的无缝衔接；采用小斜率近似进行预报不受角度的限制，在整个掠射角度范围内均可以使用，其预报结果比较准确；在 APL-UW 模型中，采用微扰近似预报非镜面散射方向的界面散射强度，但需要限定海底界面类型为小粗糙度表面，而小斜率近似不受此条件约束；小斜率-体积模型可以应用于更高频率海底散射强度的预报。此外，小斜率-体积模型还可以进一步扩展到海底界面起伏为各向异性的情况，而该方面的研究还有待于深入展开。

参 考 文 献

[1] Jackson D R. APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook[R]. APL-UW TR 9407, 1994.

- [2] Williams K L, Jackson D R. Bistatic bottom scattering: model, experiments, and model/data comparison[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, **103**(1): 169-181.
- [3] Jackson D R. High-Frequency Bistatic Scattering Model for Elastic Seafloors[R]. APL-UW TM 2-00, 2000.
- [4] R. C. Gauss, R. F. Gragg, D. Wurmser, and J. M. Fialkowski. Broadband models for predicting bistatic bottom, surface, and volume scattering strengths[R]. NRL/FR/7100-02-10-042, 2002.
- [5] Peng Z H, Zhou J X, Zhang R H. In-plane bistatic backward scattering from seabottom with randomly inhomogeneous sediment and rough interface[J]. *Sci. Chin. G*, 2004, **47**(6): 702-716.
- [6] Choi J W, Na J, Seong W. 240-kHz bistatic bottom scattering measurements in shallow water[J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2001, **26**(1): 54-62.
- [7] Thorsos E I, Broschat S L. An investigation of the small slope approximation for scattering from roughness surface: Part I. Theory[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, **97**(4): 2082-2093.
- [8] Yang T, Broschat S L. Acoustic scattering from a fluid-elastic-solid interface using the small slope approximation[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994, **96**(3): 1796-1908.
- [9] Broschat S L, Thorsos E I. An investigation of the small slope approximation for scattering from roughness surface: Part II. Numerical studies[J]. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1997, **101**(5): 2615-2625.
- [10] Gragg R F, Wurmser D, Gauss R C. Small-slope scattering from rough elastic ocean floors: General theory and computational algorithm[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001, **110**(6): 2878-2901.
- [11] Jackson D R, Richardson M D. High-Frequency Seafloor Acoustics[M]. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007.
- [12] Moe J E, Jackson D R. First order perturbation solution for rough surface scattering cross section including the effects of gradients[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994, **96**(3): 1748-1754.