

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904992

利用测深侧扫数据和明暗恢复形状方法实现地形修正*

程亚楠^{1,2,3}, 刘晓东^{1,3,4}, 张东升^{1,3,4}, 曹金亮^{1,3}, 王晏宾^{1,3}

(1. 中国科学院声学研究所 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100049; 3. 北京市海洋声学装备工程技术研究中心 北京 100190; 4. 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要:一般的测深侧扫声纳应用中,单独利用回波数据的幅度信息或相位信息获取侧扫图或测深图以展示海底细节特征。为提取侧扫数据中的微地貌信息,实现更高精度的海底地形探测,提出了两步循环迭代算法:首先利用原始测深侧扫结果数据对散射模型进行最优拟合,其次,引入亮度误差修正因子,改进从明暗恢复形状算法并迭代地形,保证其快速稳定的收敛,最终通过循环迭代获取了海底底质参数和精度更高、与真实地形起伏相关性更强的地形深度值。同时,利用 Jackson 海底散射模型,模拟测深侧扫声纳信号的发射接收过程,并利用其回波数据,验证本迭代算法的正确性和有效性。结果表明:该方法可以有效地修正地形,且接收信噪比越高,地形修正效果越好;在信噪比为 20 dB 时,相比于原始测深结果,修正后地形起伏相关系数提升 52.4%,地形误差绝对值降低 37%。最后,将该算法应用于测深侧扫声纳数据,通过修正前后地形图的对比分析,验证了本算法的可行性和有效性。

关键词:测深侧扫声纳;从明暗恢复形状;Jackson 海底散射模型;地形修正。

中图分类号: P229.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.50

Realization of terrain correction utilizing bathymetric sidescan data and shape from shading methods

Cheng Yanan^{1,2,3}, Liu Xiaodong^{1,3,4}, Zhang Dongsheng^{1,3,4}, Cao Jinliang^{1,3}, Wang Yanbin^{1,3}

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Engineering Technology Research Center of Ocean Acoustic Equipment, Beijing 100190, China; 4. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: In the general application of bathymetric sidescan sonar, the amplitude information or phase information of the echo data is used alone to obtain a sidescan map or bathymetric map to show the sea-floor detailed features. In order to extract the micro-geomorphic information inside the sidescan data and realize a higher-precision sea-floor terrain detection, a two-step loop iterative algorithm is proposed. Firstly, the primeval bathymetric data and sidescan data are used to optimally fit the scattering model. Secondly, the brightness error correction factor is introduced to the improved shape from shading method and iterate the terrain, which ensures fast and stable convergence in terrain iteration. Finally, through loop iteration, the sea-floor sediment parameters and the terrain depth value that has higher precision and stronger correlation coefficient with the real terrain relief are obtained. Meanwhile, the Jackson sea-floor scattering model is used to simulate the signal transmission and reception processes of the bathymetric sidescan sonar, and the echo data are used to verify the correctness and effectiveness of the iterative algorithm described in this paper. The results show that the proposed method can effectively correct the terrain, and the higher the received signal-to-noise ratio is, the better the terrain correction effect will be. When the signal-to-noise ratio is to 20 dB, compared with the original bathymetric result, the corrected correlative coefficient of terrain relief is elevated by 52.4% and the absolute value of the terrain error is reduced by 37%. At last, the algorithm is applied to the bathymetric sidescan sonar data. The comparison and analysis of the terrain maps before and after correction verifies the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: bathymetric sidescan sonar; shape from shading; Jackson bottom backscatter model; terrain correction

0 引言

基于相干原理的测深侧扫声纳(bathymetric sidescan sonar, BSSS)系统相对简单,适合安装于水下载体,获得了较快的发展^[1]。BSSS 利用多个换能器接收回波的振幅和时间获取海底二维声像图;利用多个换能器接收回波的相位差和时间获取海底三维立体图、等深线图^[2]。

近年来三维形状恢复(3D shape recovery)飞速发展,计算机视觉中的从明暗恢复形状(shape from shadin, SFS)算法为物体的三维重构^[3]奠定了基础;Horn^[4]通过添加物体表面的光滑性约束和可积性约束,将病态的SFS问题转化为泛函极值问题并通过变分法求得极小解;Zheng等^[5]添加图像梯度约束,借助线性化的模型近似,提出在无光滑性约束条件下最小化SFS的泛函求解思想;Lee等^[6]采用有限元方法,利用离散面元逼近物体表面,添加对于离散面元顶点的亮度约束和光滑性约束,通过最优化控制进行了离散化极值问题的求解。针对传统的非朗伯表面SFS算法存在运行时间长、精度不高的问题,王国辉等^[7]提出了一种粘性意义下的明暗恢复形状快速算法。针对未知三维物体自动重建问题,何炳蔚等^[8]提出一种利用改进的Tsai-SFS算法恢复物体表面粗糙轮廓获取未知物体的最大尺寸信息。声学探测中,利用SFS算法,也实现了特定条件下海底地形恢复:早期由Li等^[9]通过亮度约束和光滑性约束构成的能量最小化函数,利用最优化控制求解,实现了侧扫声纳图像的三维重构;Hebert等^[10]通过增添可积性约束,保证了重构地形表面函数的连续可积性;Coiras等^[11-13]将多分辨率分层计算技术与SFS算法结合,利用期望最大法,实现了地形的三维重构;赵建虎等^[14]利用稀疏的测深值作为初始输入和约束条件,基于侧扫图像的明暗变化恢复相对海底地形,并融合由频谱分离得到的初始输入的高低频部分,恢复海底的绝对地形;赵建虎等^[15]还提出了一种将海底反射模型线性化,并以初始稀疏高度值作为约束反演绝对地形的线性化算法;王爱学等^[16]利用单波束测深的数据和侧扫图像明暗变化反演的相对地形,通过小波变化,分别提取高低频信息,以获取海底的绝对地形起伏。上述研究中均利用单参量的朗伯体散射模型作为求解问题中的亮度模型,且需要额外的单波束或多波束测深声纳测得的稀疏地形值作为初始条件。

SFS算法为声学探测中获取精度更高的海底地形和底质参数提供了思路。对于BSSS来说,其回波数据中的测深侧扫信息是紧密的耦合在一起的,但传统的测深结果仅利用回波数据中的相位信息,侧扫结果仅利用回波数据中的幅度信息。据此,本文提出了一种测深侧扫数据互为约束的地形修正方法,在Jackson海底散射模型模

拟海底环境的基础上,使用传统算法测得的测深值和侧扫值来估计底质参数,并将其作为改进后SFS算法反演的初值,多次循环迭代底质参数估计算法和改进后的SFS算法,最终获取了海底底质参数和精度更高、起伏变化相关系数更大的地形值。

1 理论分析

1.1 海底散射模型的建立

Jackson模型是一种应用了复合粗糙度模型的高频海底声散射模型^[17],并将海底散射分为由粗糙界面引起的界面散射和由沉积物引起的体积散射。声波在海水层和沉积层交界面处的反射规律与掠射角 θ 和海底底质参数有关,其反向散射强度 $S_b(\theta)$ 一般用反向散射截面的分贝形式表示:

$$S_b(\theta) = 10\log_{10}(\sigma_r(\theta) + \sigma_v(\theta)) \quad (1)$$

其中界面散射截面积 σ_r 为基尔霍夫散射截面积:

$$\sigma_{kr} = \frac{bq_c |R(90^\circ)|^2}{\{8\pi[\cos^4(\theta) + aq_c^2 \sin^4(\theta)]^{\frac{1+\alpha}{2\alpha}}\}} \quad (2)$$

和复合粗糙度散射截面积:

$$\sigma_{pr} = 4k^2 \sin^4(\theta) |Y(\theta)|^2 W(K_\theta) \quad (3)$$

二者的组合形式,可表示为:

$$\sigma_r = F(\sigma_{kr}, \sigma_{pr}) \quad (4)$$

体积散射截面积为:

$$\sigma_v = \frac{5\delta\sigma_2 |1 - R(\theta)|^2 \sin^2(\theta)}{v \ln 10 |P(\theta)|^2 \text{Im}[P(\theta)]} \quad (5)$$

参数的定义及使用参见文献[18-20],此处仅讨论与本文相关的复合粗糙度相关理论。

复合粗糙度近似将海底粗糙度划分为大尺度和小尺度两部分,如图1所示。

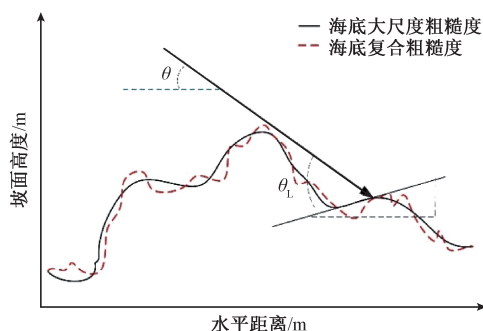


图1 复合粗糙度近似示意图^[21]

Fig.1 Approximate schematic diagram of composite roughness^[21]

结合海底粗糙度谱来说,由光滑的波状曲线表示的大尺度粗糙度(由地形均方根斜率表征)仅是简单地使海底发生倾斜,使得入射波掠射角发生变化,小尺度粗糙

度(由地形均方根粗糙度表征)则是影响海底起伏和海底散射的根本原因;大、小尺度粗糙度之和即复合粗糙度则可由不规则起伏的快变曲线表示。复合粗糙度模型对海底大尺度均方根斜率叠加小尺度微扰修正项,使得海底散射截面更准确的反映海底回波强度和海底地形掠射角的关系。

1.2 海底回波数据的预处理

通过模拟 Jackson 海底散射模型下的声学探测过程,获取有效的海底回波序列 $ADdata(Ping, channel, N)$, 其中 $Ping$ 表示接收数据的帧数, $channel$ 表示接收阵列的通道数, N 表示采样序列长度。借助传统的测深侧扫算法,以第 i 帧数据为例,单次选取一定时间片内的单通道回波数据,取其幅值信息经平滑处理后得到一个散射点的侧扫能量结果:

$$E(i, j) = \frac{1}{L} \sum_{n=j+1}^{j+L} ADdata(i, 1, n) ADdata^H(i, 1, n) \quad (6)$$

式中: $[\cdot]^H$ 表示取共轭。单次选取一定快拍的多通道回波数据,利用其相位差信息获取空间来波角度 θ :

$$\theta(i, j) = DOA(ADdata(i, channel, n)), \quad (7)$$

$$channel = 1, \dots, Channel, n = j + 1, \dots, j + M$$

结合快拍数据的采样时间计算一个散射点的三维空间坐标,包括其水平位置 X 、 Y 和垂直高度 H (设定载体航迹方向为 y 轴正方向,垂直航迹指向载体右舷为 x 轴正方向,满足右手法则方位为 z 轴正方向):

$$X(i, j) = \cos\theta(i, j) \cdot \frac{j}{f_s}$$

$$H(i, j) = \sin\theta(i, j) \cdot \frac{j}{f_s}$$

$$Y(i, j) = g(velocity, interval) \quad (8)$$

式中: $DOA(\cdot)$ 表示高分辨率子空间算法; f_s 表示采样频率; $g(\cdot)$ 表示由船速 $velocity$ 和发射脉冲间隔 $interval$ 共同决定的沿航迹方向坐标。为便于后续算法的反演,此处选取 $L = M$, 以获测深结果和侧扫结果的准确对应。工程上的探测数据,应在去除指向性和传播衰减等因素对接收数据的影响后进行归一处理,并剔除其中噪点或跳点数据。

1.3 估计模型的反演参数

将 1.2 节中获得的离散测深结果进行局域化拟合 $\hat{fit}(\cdot)$, 以获取该探测区域的地形曲线 $\mathbf{H} = \hat{fit}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$, 结合换能器位置 (x_0, y_0, z_0) 、估算实际测深点对应的初始斜率 k_0 和初始掠射角 θ_0 :

$$k_x(i, j) = \frac{\hat{fit}(x(i, j) + \Delta x, y(i, j)) - \hat{fit}(x(i, j), y(i, j))}{\Delta x}$$

$$k_y(i, j) =$$

$$\frac{\hat{fit}(x(i, j), y(i, j) + \Delta y) - \hat{fit}(x(i, j), y(i, j))}{\Delta y}$$

$$k_0(i, j) = k_x(i, j) \cdot \vec{i} + k_y(i, j) \cdot \vec{j} \quad (9)$$

由该散射点斜率可计算得其所在平面法向量为:

$$\mathbf{n}_0(i, j) = (-k_x, -k_y, 1) / \sqrt{(k_x^2 + k_y^2 + 1)} \quad (10)$$

由该散射点至换能器连线确定的散射回波与平面法向量可计算该散射点的入射声线掠射角为:

$$\mathbf{n}(i, j) = (x(i, j), y(i, j), H(i, j)) - (x_0, y_0, z_0) \quad (11)$$

$$\theta_0(i, j) = \sin^{-1} \frac{\mathbf{n}(i, j) \cdot \mathbf{n}_0(i, j)}{|\mathbf{n}(i, j)|} \quad (12)$$

将初始掠射角 θ_0 和原始侧扫结果 $\mathbf{E}_0$, 通过全局最小二乘(least squares), 得到该范围地形的初始反演模型的最佳参数表示:

$$\mathbf{M}_0 = \arg \min_{\mathbf{M} \in \Omega_M} \|\mathbf{E}_0 - \text{model}(\mathbf{M}, \theta_0)\|^2 \quad (13)$$

本文选择 Jackson 海底散射模型进行反演,故模型参数 $\mathbf{M}$ 中包含了反映海底底质的参量如声波在沉积层与海水层的密度比 ρ 、声速比 ν , 声波在沉积层中的体积散射常数 σ_2 、海底表面不平整性空间谱的谱强度 ω 和谱指数 γ , 还包含描述模型中底质参数关系的比例参量和常数参量等; Ω_M 为参数 $\mathbf{M}$ 的合理取值范围。

1.4 改进后的 SFS 算法

经典的最小值 SFS 算法^[4], 利用光学图像中物体表面的明暗变化来恢复表面各点的相对高度和法向量等参数值。通过附加第二项光滑性约束条件和第三项可积性约束条件, 将仅由亮度模型所确定的 SFS 问题转化为表面形状约束下的 SFS 正则化模型的泛函极值求解:

$$\min \iint \{ [\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \mathbf{R}(\mathbf{p}, \mathbf{q})]^2 + \lambda (\mathbf{p}_x^2 + \mathbf{p}_y^2 + \mathbf{q}_x^2 + \mathbf{q}_y^2) + \mu [(\mathbf{H}_x - \mathbf{p})^2 + (\mathbf{H}_y - \mathbf{q})^2] \} dxdy \quad (14)$$

式中: $\mathbf{R}$ 表示海底散射模型; $\mathbf{p}, \mathbf{q}$ 表示表面梯度; $\mathbf{H} = \hat{fit}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 表示物体表面高度; $\mathbf{p}_x, \mathbf{p}_y, \mathbf{q}_x, \mathbf{q}_y$ 分别表示函数 $\mathbf{p}, \mathbf{q}$ 关于 x, y 的偏导数; $\mathbf{H}_x, \mathbf{H}_y$ 分别表示函数 $\hat{fit}$ 关于 x, y 的偏导数; λ, μ 均表示拉格朗日常数(经典算法在迭代求解过程中, 为保证结果的收敛, 利用拉格朗日常数替代拉格朗日乘子)。利用变分法中的欧拉方程, 可得到上述极值存在的必要条件为下式的二阶偏微分方程组成立:

$$\begin{cases} \lambda \Delta \mathbf{p} = -(\mathbf{E} - \mathbf{R})\mathbf{R}_p - \mu(\mathbf{H}_x - \mathbf{p}) \\ \lambda \Delta \mathbf{q} = -(\mathbf{E} - \mathbf{R})\mathbf{R}_q - \mu(\mathbf{H}_y - \mathbf{q}) \\ \Delta \mathbf{H} = \mathbf{p}_x + \mathbf{q}_y \end{cases} \quad (15)$$

式中: Δ 表示拉普拉斯算子; $\mathbf{R}_p, \mathbf{R}_q$ 分别是函数 $\mathbf{R}$ 关于 $\mathbf{p}, \mathbf{q}$ 的偏导数。利用拉普拉斯算子的离散渐进形式:

$$\{\Delta f\}_{kl} \approx \frac{\kappa}{\varepsilon^2} (\bar{f}_{kl} - f_{kl}) \quad (16)$$

可得上式的离散表示为:

$$\begin{aligned}
p_{kl} &= \frac{(\kappa \lambda' \bar{p}_{kl} + \mu H_x) + (E - R) R_p}{(\kappa \lambda' + \mu)} \\
q_{kl} &= \frac{(\kappa \lambda' \bar{q}_{kl} + \mu H_y) + (E - R) R_q}{(\kappa \lambda' + \mu)} \\
\frac{\kappa}{\varepsilon^2} H_{kl} &= \frac{\kappa}{\varepsilon^2} \bar{H}_{kl} - (p_x + q_y)
\end{aligned} \quad (17)$$

式中: E, R, R_p, R_q 表示其在离散像素点 (k, l) 的取值; $\lambda' = \lambda / \varepsilon^2$; 参数 ε, κ 表示离散拉普拉斯渐进法引入的模板参量; H_x, H_y, p_x, p_y 分别为 $\mathbf{H}, \mathbf{p}, \mathbf{q}$ 在该离散点处的渐进偏微分。利用式(17)进行迭代,可最终求得表面梯度和表面高度的离散值。

经典 SFS 算法中添加的光滑性约束项,保证了迭代结果的收敛性和算法的稳定性。由于光滑性约束条件认为地形表面高度函数连续,该项约束可能使得重建后的地形更加平坦,即使存在真实地形作为初始约束输入,仍可能导致整体地形的畸变,并且减慢收敛速度;同时拉格朗日乘子的选择条件较为苛刻,偏大或者偏小都会影响最小值问题的求解^[4]。考虑到海底地形恢复情况比较复杂,模型参量的不完全匹配可能导致模型误差函数的巨大变化,影响 SFS 迭代的收敛速度和稳定性,由此本文对经典 SFS 算法进行如下改进。

1) 对于由海底散射模型(亮度模型)确定的 SFS 问题添加可积性约束条件,新的正则化模型可表示为:

$$\begin{aligned}
&\min \iint \{ [E(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - R(\mathbf{p}, \mathbf{q})]^2 + \\
&\mu [(\mathbf{H}_x - \mathbf{p})^2 + (\mathbf{H}_y - \mathbf{q})^2] \} d\mathbf{x} d\mathbf{y}
\end{aligned} \quad (18)$$

式(18)为 $\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{q}$ 的常规积分形式,利用微分求极值方法可得:

$$\begin{aligned}
\mathbf{p} &= \mathbf{H}_x + \frac{1}{\mu} (E - R) R_p \\
\mathbf{q} &= \mathbf{H}_y + \frac{1}{\mu} (E - R) R_q
\end{aligned} \quad (19)$$

联合式(19)和(20):

$$\Delta \mathbf{H} = \mathbf{p}_x + \mathbf{q}_y \quad (20)$$

可得该种情况下的迭代更新方程表示为:

$$\begin{aligned}
p_{kl}^{(n+1)} &= \{H_x\}_{kl}^{(n)} + \frac{1}{\mu} (E - R) R_p \\
q_{kl}^{(n+1)} &= \{H_y\}_{kl}^{(n)} + \frac{1}{\mu} (E - R) R_q \\
H_{kl}^{(n+1)} &= \bar{H}_{kl}^{(n)} - \frac{\varepsilon^2}{\kappa} (\{p_x\}_{kl}^{(n+1)} + \{q_y\}_{kl}^{(n+1)})
\end{aligned} \quad (21)$$

用误差修正因子: $\xi = \text{surrogate}(E(|E - R|))$ 替换拉格朗日常数 μ , 其中 $E(\cdot)$ 表示求均值运算, $\text{surrogate}(x) = \frac{1}{a + \exp(1 - b \cdot x)}$ 函数中 a, b 为常数, 新的迭代方程可表示为:

$$\begin{aligned}
p_{kl}^{(n+1)} &= \{H_x\}_{kl}^{(n)} + \xi (E - R) R_p \\
q_{kl}^{(n+1)} &= \{H_y\}_{kl}^{(n)} + \xi (E - R) R_q \\
H_{kl}^{(n+1)} &= \bar{H}_{kl}^{(n)} - \frac{\varepsilon^2}{\kappa} (\{p_x\}_{kl}^{(n+1)} + \{q_y\}_{kl}^{(n+1)})
\end{aligned} \quad (22)$$

利用误差修正因子替代拉格朗日常数,取代经典 SFS 的光滑性约束条件,保证了迭代过程的快速收敛:

误差修正因子与原拉格朗日常数同号,决定了斜率迭代总是朝着正则化模型的最优解的方向变化;

以模型误差为自变量的误差修正因子决定迭代步长的变化。如图2所示,当整体的亮度误差较大时,误差修正因子也相应较大,迭代步长即 $\mathbf{p}^{(n+1)} - \mathbf{p}^{(n)}, \mathbf{q}^{(n+1)} - \mathbf{q}^{(n)}$ 、较大,促使 $\mathbf{p}^{(n)}, \mathbf{q}^{(n)}$ 和 $\mathbf{H}^{(n)}$ 快速地收敛到最优解 $\mathbf{p}^*, \mathbf{q}^*$ 和 $\mathbf{H}^*$; 当 $\mathbf{p}^{(n)}, \mathbf{q}^{(n)}$ 靠近最优解 $\mathbf{p}^*, \mathbf{q}^*$ 时,误差修正因子相应较小甚至渐进趋于0,保证不会因迭代步长过大而跨过最优解导致的迭代发散。

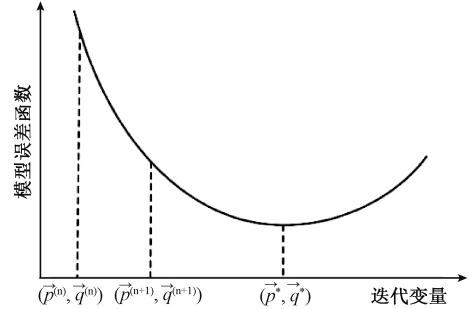


图2 某维度迭代变量和模型函数关系

Fig.2 The relationship between the iterative variable in a dimension and model function

2) 在地形迭代过程中,保持边界值恒定。

$$\begin{cases} H_{kl}^{(n+1)} = H_0(k, l), & k, l \text{ 为边界点} \\ H_{kl}^{(n+1)} = \bar{H}_{kl}^{(n)} - \frac{\varepsilon^2}{\kappa} (\{p_x\}_{kl}^{(n+1)} + \{q_y\}_{kl}^{(n+1)}), & \text{其他点} \end{cases} \quad (23)$$

考虑到侧扫值存在一定的误差,且不能保证所有离散点测深值的表面方向和凹凸性无误;由此在迭代过程中,保持边界地形信息恒定使得地形整体趋势不变,避免因迭代方向变化导致的迭代结果发散。

1.5 反演模型和测深结果的迭代更新

重复 1.3 和 1.4 节直至相邻两次的地形变化量和迭代模型误差满足预设的精度要求 ξ_0 , 即:

$$\begin{aligned}
\xi_{\text{model}}^{(n)} &= E(|E - R^{(n)}|) < \xi_0 \\
\xi_p^{(n)} &= E(|\mathbf{p}^{(n)} - \mathbf{p}^{(n-1)}|) < \xi_0 \\
\xi_q^{(n)} &= E(|\mathbf{q}^{(n)} - \mathbf{q}^{(n-1)}|) < \xi_0 \\
\xi_H^{(n)} &= E(|\mathbf{H}^{(n)} - \mathbf{H}^{(n-1)}|) < \xi_0
\end{aligned} \quad (24)$$

迭代后的地形输入,使得模型误差更小,周而复始,最终

循环迭代保证了地形迭代收敛的同时模型参数值收敛。

1.6 迭代结果评估

1) 计算原始测深地形、迭代收敛后地形与理论模型地形的起伏变化的相关系数 r_{original} 、 r_{final}

$$r_{\text{original}} = \frac{(k_0 * k_{\text{model}})}{\sqrt{(\max(k_0 * k_0) \cdot \max(k_{\text{model}} * k_{\text{model}}))}}$$

$$r_{\text{final}} = \frac{(k_{\text{final}} * k_{\text{model}})}{\sqrt{(\max(k_{\text{final}} * k_{\text{final}}) \cdot \max(k_{\text{model}} * k_{\text{model}}))}}$$

(25)

式中: $*$ 表示卷积运算符; k_{final} 表示理论模型中地形起伏。若存在 $\max(r_{\text{original}}) < \max(r_{\text{final}})$, 则表明融合侧扫幅值信息后的地形起伏与真实地形更相似。

2) 对比原始测深地形、迭代收敛后地形与理论模型的偏差频率直方图, 通过其统计特性验证迭代修正后地形误差(高度误差绝对值)是否更小。

2 仿真实验分析

为验证上述算法的可行性, 此处基于 MATLAB 平台, 采用 Jackson 海底散射模型, 以测深侧扫声纳^[1] 数据处理方法为基础, 进行了仿真实验, 部分仿真条件如下。

1) 采用简单脉冲信号, 中心频率为 150 kHz, 脉宽为 0.1 ms;

2) Jackson 海底散射模型中参数选取如下: 声波在沉积层与海水层的密度比 $\rho = 1.8047$ 、声速比 $\nu = 1.1139$, 声波在沉积层中的体积散射常数 $\sigma_2 = 4 \times 10^{-3}$ 、海底表面不平整性空间谱的谱强度 $\omega = 2.07 \times 10^{-11}$ 和谱指数 $Y = 0.625$;

3) 基于中科院声学所研制的 HRBSSS, 建立声纳仿真模型; 利用波束形成和 ESPRIT 算法, 获取测深侧扫的结果数据;

4) 无特殊说明时, 设定信噪比为 20 dB, 迭代误差精度要求 $\xi_0 = 1 \times 10^{-6}$;

5) 仿真中假定海底仅分为海水层和沉积层, 且沉积层介质为均匀、各向同性的流体; 海底表面不平整性是均匀的、各向同性的, 不平整度服从高斯分布, 水平空间谱密度服从指数分布^[17]。

根据海底声学特性参数, 由海底表面的不平整性和分形几何中的结构函数^[18-20] 共同建立的海底随机地形如图 3 所示, 并将其设定为本次运算中的海底真实地形; 通过建立海底真实地形的 Jackson 海底散射模型, 计算海底表面及沉积层的散射截面、海底表面及沉积层各散射单元的散射回波, 最终获取各个接收阵元的接收回波序列; 由测深侧扫声纳数据处理方法获取原始测深地形如图 4 所示。由图 3、4 可知, 测深地形是原真实地形的近似表

示, 可准确的表现真实地形中起伏的缓变趋势, 即真实地形中的大尺度起伏。

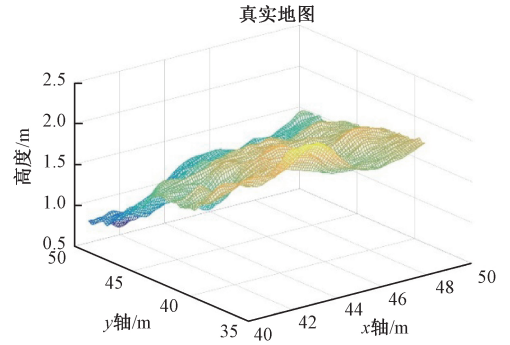


图 3 海底真实模型地形

Fig.3 Real model terrain of sea-floor

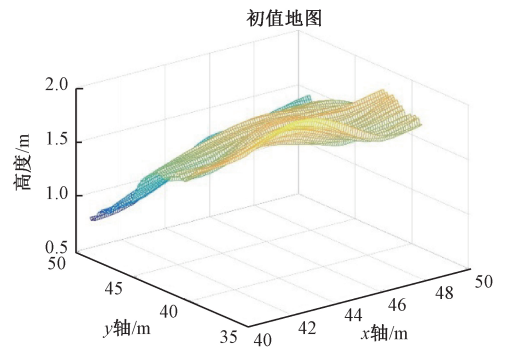


图 4 原始测深估计地形

Fig.4 Original bathymetric estimated terrain

以上述测深地形和侧扫结果为初值, 利用本文提出的地形修正算法, 进行了 500 次迭代运算, 迭代后的终止地形结果如图 5 所示。相比于原始测深结果, 融合侧扫能量信息后的终止地形不仅可以反映真实地形大尺度的变化趋势, 还可以较为真实的反映部分小尺度的起伏。

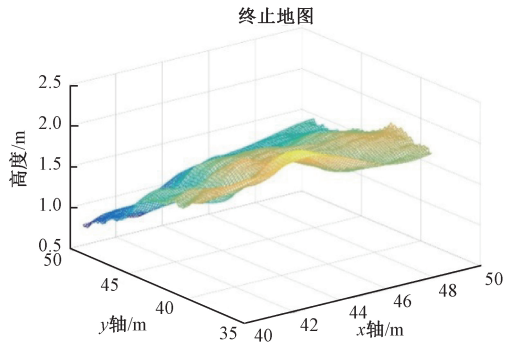


图 5 本文算法迭代后地形

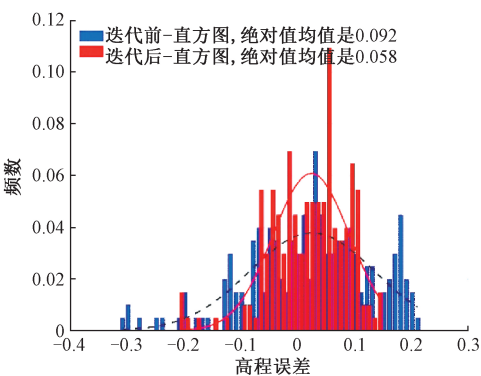
Fig.5 The iterated terrain for the proposed algorithm

地形迭代结束后,可获取符合精度要求的模型参数为:声波在沉积层与海水层的密度比 $\rho_{\text{model}}=1.791$ 、声速比 $\nu_{\text{model}}=1.163$ 、声波在沉积层中的体积散射常数 $\sigma_{2_{\text{model}}}=3.279\times 10^{-3}$ 、海底表面不平整性空间谱的谱强度 $\omega_{\text{model}}=3.28\times 10^{-11}$ 、和谱指数 $Y_{\text{model}}=0.8888$ 。由于在迭代时选取地形范围较大,迭代得模型参数与真实参数存有误差。为更直观的展现地形迭代效果,以下分析中,均仅展示单 ping 回波信息或单 ping 中部分区域的运算结果。

2.1 信噪比的影响分析

BSSS 一般发射高频声信号,发射信号的信噪比,直接影响接收回波的检测并最终影响测深侧扫数据的精准性。以下分别进行了不同信噪比下的地形反演。

如图 6 所示,相比于原始测深地形结果,迭代后地形起伏相关系数增大且地形误差绝对值减小。结合表 1~2 所示的不同信噪比下地形修正结果,进一步表明,信噪比越大^[22],回波的侧扫能量数据中包含的地形信息更为准确,迭代算法性能越佳。单 ping 迭代结束获取的模型拟合参数如下:声波在沉积层与海水层的密度比 $\rho_{\text{model}}=1.802$ 、声速比 $\nu_{\text{model}}=1.114$ 、声波在沉积层中的体积散射常数 $\sigma_{2_{\text{model}}}=3.9885\times 10^{-3}$ 、海底表面不平整性空间谱的谱强度 $\omega_{\text{model}}=2.066\times 10^{-11}$ 和谱指数 $Y_{\text{model}}=0.6245$ 。



(c) 迭代前后深度误差分布
(c) The depth error distribution before and after iteration

图 6 信噪比 20 dB 迭代结果对比

Fig.6 The iteration result comparison for the signal to noise ratio of 20 dB

表 1 不同信噪比下迭代修正前后相关系数对比

Table 1 Comparison of the correlation coefficients before and after iteration under different SNRs

信噪比/dB	原始地形起伏 相关系数	迭代后地形起伏 相关系数	相关度提升/ %
5	0.63	0.89	41.3
10	0.63	0.93	47.6
15	0.63	0.95	50.8
20	0.63	0.96	52.4
25	0.63	0.96	52.4
30	0.63	0.96	52.4

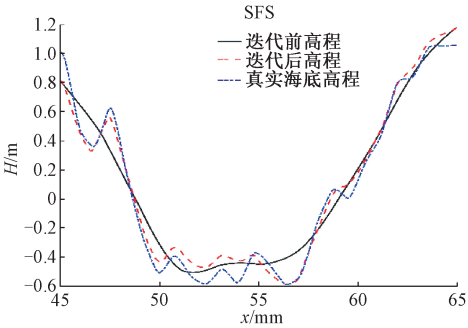
表 2 不同信噪比下迭代修正前后深度误差对比

Table 2 Comparison of the depth errors before and after iteration under different SNRs

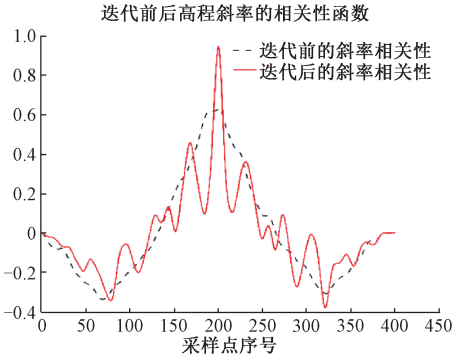
信噪比/dB	原始深度误差 绝对值均值/m	迭代后误差 绝对值均值/m	深度误差减小/ %
5	0.094	0.085	9.6
10	0.090	0.067	25.6
15	0.094	0.060	36.2
20	0.092	0.058	37.0
25	0.090	0.057	36.7
30	0.089	0.056	37.1

2.2 收敛速度对比

图 7(a)和(b)所示分别为采用经典算法和本文修正算法, ξ_{model} 、 ξ_H 和 ξ_k 随迭代次数的收敛曲线。迭代次数为1 000时,经本文算法迭代后的地形深度变化、地形起伏变化均已小于预设精度;经典算法迭代中,地形起伏变化量呈缓慢减小的趋势,地形深度变化量基本恒定,增大迭代次数不能保证地形深度的收敛。



(a) 迭代前后深度对比
(a) The comparison of the depths before and after iteration



(b) 迭代前后相关系数对比
(b) The comparison of the correlation coefficients before and after iteration

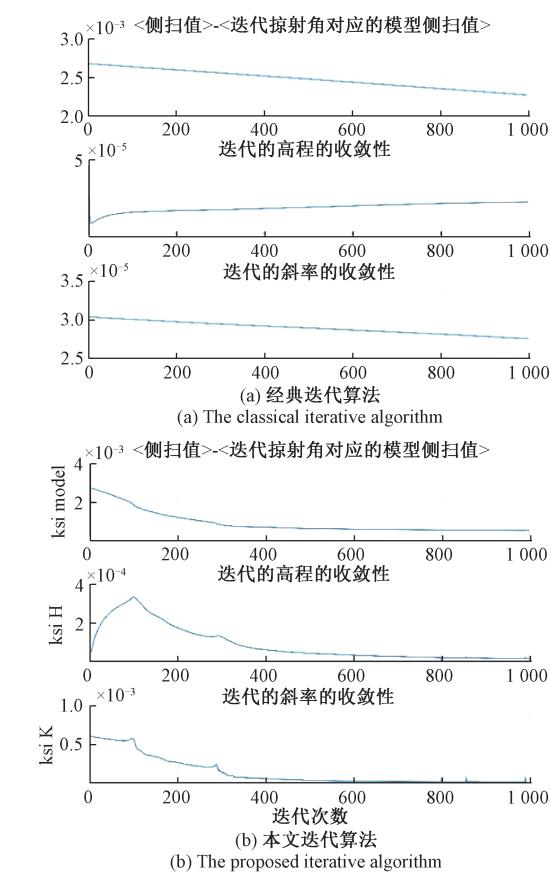


图 7 不同算法迭代速度对比

Fig.7 Iteration speed comparison for different algorithms

2.3 改进算法的适用性分析

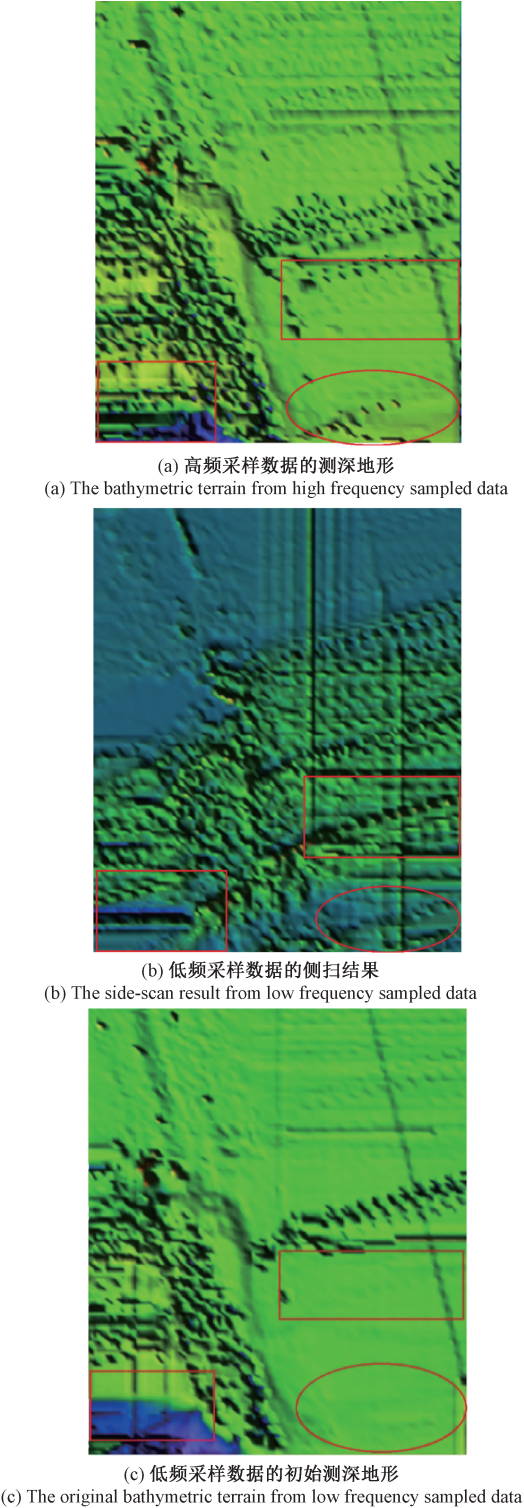
由于基尔霍夫近似模型适用于表面大尺度起伏变化占主导地位的缓变波形粗糙度地形,复合粗糙度近似模型不适合大尺度均方根斜率过大的地形修正^[21],导致 Jackson 海底散射模型更适用于描述大尺度均方根斜率较小的海底地形;因此,本文算法在该模型的适用范围内,有较好的地形修正效果,且本文中结论更适用于与该模型匹配的海底散射情况。实际应用中,复合粗糙度模型中截止波数的选择无统一标准,随机产生的不同的截止波数会导致差别巨大的大尺度均方根斜率,截止波数的选择也会影响地形的修正效果。

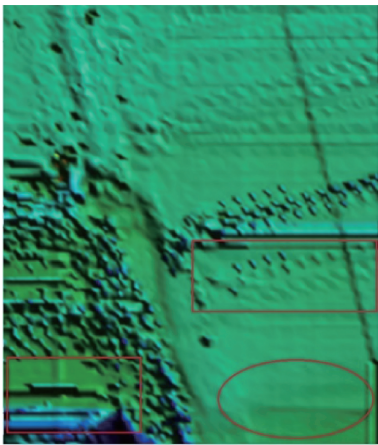
3 实测数据验证

为了进一步验证本文地形修正算法的实际效果,对某水域的部分实验数据进行处理,实验平台为中国科学院声学研究所研制的高分辨率测深侧扫声纳 HRBSSS。

其中高频采样(采样率为 64 102 Hz)经测深侧扫算法处理后,得到测深地形数据,如图 8(a)所示;低频采样

(采样率为 16 025 Hz)经测深侧扫算法处理,得到的侧扫结果数据如图 8(b)所示,测深地形数据如图 8(c)所示;以低频采样数据做为迭代的初值,经改进的 SFS 算法处理,融合侧扫数据进行地形修正,迭代计算得到修正后的测深地形数据,如图 8(d)所示。图 8 为 38 ping 左舷数据经软件 Surfer 处理后绘制。





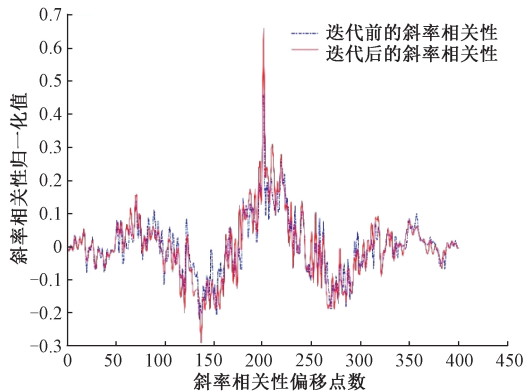
(d) 低频频率数据经修正后的测深地形
(d) The corrected bathymetric terrain from low frequency sampled data

图 8 侧扫结果及测深地形对比

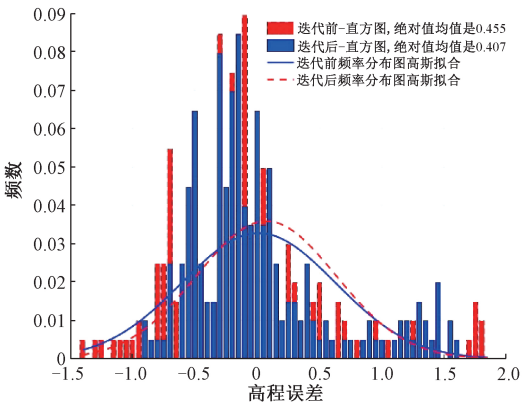
Fig.8 Comparison of side-scan result and bathymetric terrain

图 8 中方形标记处,与高频采样的测深地形图进行对比,部分纹理特征在低频的初值测深地形图中并未展现,但经过改进的 SFS 算法处理,迭代后的测深地形图融合了侧扫信息,表现出更多的微地貌细节特征,与高频采样的测深地形图纹理细节一致;另一方面,图 8 中椭圆形标记处,由于初值测深地形中缺乏纹理特征,相应位置的侧扫数据信息未能融合到迭代后的测深地形中。从测深地形迭代前后的纹理特征对比来看,侧扫信息和初值测深地形均是影响地形修正效果的主要因素。

将高频采样的测深地形分别与改进算法迭代前后的测深地形进行斜率相关性和高度误差绝对值的对比,其中单 ping 结果如图 9 所示,其余部分迭代结果如表 3 所示,可以看出,迭代后的测深地形数据与高频采样的测深地形数据的斜率相关性更大,且地形误差深度绝对值更小。



(a) 迭代前后相关系数对比
(a) Comparison of the correlation coefficients before and after iteration



(b) 迭代前后深度误差分布结果
(b)The depth error distribution result before and after iteration

图 9 迭代前后的地形数据的斜率相关系数和深度误差绝对值对比

Fig.9 Comparison of the slope correlated coefficients and depth error absolute values of the terrain data before and after iteration

表 3 迭代修正前后相关系数对比

Table 3 Comparison of the correlation coefficients before and after iteration correction

ping 号	原始地形起伏 相关系数	迭代后地形起伏 相关系数	相关度提升/ %
8	0.57	0.86	51
9	0.68	0.85	25
10	0.47	0.71	50
11	0.46	0.66	43
12	0.68	0.85	26
13	0.62	0.77	24

表 4 迭代修正前后深度误差对比

Table 4 Comparison of the depth errors before and after iteration correction

ping 号	原始深度误差 绝对值均值/m	迭代后误差 绝对值均值/m	深度误差减小/ %
8	0.34	0.29	14
9	0.79	0.38	52
10	0.39	0.37	6
11	0.44	0.40	10
12	0.32	0.19	40
13	0.51	0.46	10

上述实验结果和分析验证了利用测深侧扫数据和改进的 SFS 算法实现地形修正的有效性。修正后的测深地形数据包含更丰富的微地貌信息,对于水下目标识别、海

底测绘等均有一定的实践意义。

4 结 论

本文从海底散射模型和海底地形出发,将海底反向散射强度与海底地形起伏变化相关联,通过改进后的SFS算法,对包含回波强度的侧扫信息与测深地形进行融合,获得了与真实地形起伏相关性更强、精度更高的地形数据,实现了海底地形的有效修正。相比于经典SFS算法,本文使用的两步循环迭代法中,海底散射模型的迭代获取了海底底质参数,而地形迭代中的亮度误差修正因子保证了其快速稳定收敛。原理性的仿真研究验证了算法的正确性和可行性,进一步的分析表明:原始采样数据信噪比越高,地形修正效果越佳。同时,实测数据也验证了该算法的有效性。本文算法为测深侧扫数据融合提供了新途径,对于水下目标识别、地形分类、底质检测等诸多领域都有一定的指导意义;大尺度均方根斜率较大的海底地形修正研究是下一步的工作重点。

参考文献

- [1] 刘晓东,王舒文,张东升,等. 高分辨率测深侧扫声纳系统测深精度评估方法[J]. 海洋测绘, 2016, 36(5): 28-31.
- LIU X D, WANG SH W, ZHANG D SH, et al. Sounding accuracy assessment method of high-resolution bathymetric side-scan sonar system [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(5): 28-31.
- [2] 关致和. 干涉声纳系统[J]. 海洋测绘, 2003, 23(2): 59-60.
- GUAN ZH H. Introduction to interferometric side-scan sonar system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(2): 59-60.
- [3] 刘志浩,陈振华,陈果. 基于线阵列超声相控阵三维成像的实现研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 400-406.
- LIU ZH H, CHEN ZH H, CHEN G. Research on 3D imaging based on linear ultrasonic phased array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 400-406.
- [4] HORN B K P. Height and gradient from shading[J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 5(1): 37-75.
- [5] ZHENG Q, CHELLAPA R. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1991, 13(7): 680-702.
- [6] LEE K M, KUO C C J. Shape from shading with a linear triangular element surface model[J]. Pattern Analysis &

- Machine Intelligence IEEE Transactions on, 1993, 15(8): 815-822.
- [7] 王国琿,宋玉贵. 一种非朗伯表面SFS的快速粘性解算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1577-1583.
- WANG G H, SONG Y G. A fast viscosity solution algorithm of shape from shading for non-Lambertian surfaces [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7): 1577-1583.
- [8] 何炳蔚,陈志鹏,林东艺. 融合SFS和主动视觉技术的未知物体重建方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 727-736.
- HE B W, CHEN ZH P, LIN D Y. Research on reconstruction method for unknown objects through incorporating SFS algorithm and active vision technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4): 727-736.
- [9] LI R X, PAI S. Improvement of bathymetric data bases by shape from shading technique using side-scan sonar images [C]. Oceans. IEEE, Hawaii, 1991: 320-324.
- [10] HEBERT A E J M. Seafloor map generation for autonomous underwater vehicle navigation [J]. Autonomous Robots, 1996, 3(2-3): 145-168.
- [11] COIRAS E, PETILLOT Y, LANE D M. Multiresolution 3-D reconstruction from side-scan sonar images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 382-390.
- [12] COIRAS E, PETILLOT Y, LANE D M. An expectation-maximization framework for the estimation of bathymetry from side-scan sonar images [J]. Oceans 2005-Europe, 2005(1): 261-264.
- [13] COIRAS E, GROEN J. Simulation and 3-D reconstruction of side-looking sonar images [M]. Advances in Sonar Technology. InTech, 2009.
- [14] 赵建虎,尚晓东,张红梅. 水深数据约束下的声呐图像海底地形恢复方法[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 443-448.
- ZHAO J H, SHANG X D, ZHANG H M. Recovering seabed topography from sonar image with constraint of sounding data [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2): 443-448.
- [15] 赵建虎,尚晓东,张红梅. 侧扫声呐图像反演海底地形的一种线性算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(5): 80-86.
- ZHANG J H, SHANG X D, ZHANG H M. Obtaining high-resolution seafloor topography from side scan sonar image using a linear algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(5): 80-86.
- [16] 王爱学,赵建虎,尚晓东,等. 单波束水深约束的侧扫声

- 呐图像三维微地形反演[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(5): 739-745.
- WANG AI X, ZHAO J H, SHANG X D, et al. Recovery of seabed 3D micro-topography from side-scan sonar image constrained by single-beam soundings[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(5): 739-745.
- [17] 肖军, 费志刚, 孟华. 海底三维散射模型仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(6): 93-96.
- XIAO J, FEI ZH G, MEGN H. Simulation of three-dimensional seafloor scattering model[J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(6): 93-96.
- [18] JACKSON D R, WINEBRENNER D P, ISHIMARU A. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 79(5): 1410-1422.
- [19] JACKSON D R, BAIRD A M, CRISP J J, et al. High-frequency bottom backscatter measurements in shallow water[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1986, 80(4): 1188-1199.
- [20] JACKSON D R, KEVIN B. High-frequency bottom backscattering: Roughness versus sediment volume scattering[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 92(2): 962-967.
- [21] DARRELL R J, MICHAEL D R. 高频海底声学[M]. 刘保华, 译. 北京: 海洋出版社, 2014: 302-314.
- Darrell R J, Michael D R. High-frequency seafloor acoustics[M]. LIU B H, trans. Beijing: China Ocean Press, 2014: 302-314.
- [22] 李鹏, 叶方跃, 李剑乔, 等. 基于小波子带模型匹配的同水域下目标探测[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1860-1868.

LI P, YE F Y, LI J Q, et al. Target detection in the same water area based on wavelet sub-band model matching [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1860-1868.

作者简介



程亚楠, 2015 年于电子科技大学获得学士学位, 现为中科院声学所博士研究生, 主要研究方向为水声信号与信息处理。

E-mail: chengyn0806@163.com

Cheng Yanan received B. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2015; and now, she is a doctoral student in Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. She is mainly engaged in the research of underwater acoustic signal and information processing.



刘晓东, 1998 年于北京交通大学获得学士学位, 分别在 2001 年和 2004 年于中国科学院声学研究所获得硕士学位和博士学位, 现为中国科学院声学研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为海洋声学技术与声信号处理、高分辨率水下声成像。

E-mail: liuxd@mail.ioa.ac.cn

Liu Xiaodong received his B. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 1998, and received M. Sc. and Ph. D. degrees both from Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences in 2001 and 2004, respectively. Now, he is a research fellow and Ph. D. supervisor in Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest includes marine acoustic technology and acoustic signal processing, high resolution underwater acoustic imaging