基于多层水平变化浅海海底模型的低频反演方法*

康娟 1)2) 彭朝晖 1)† 何利 1)‡ 李晟昊 1) 于小涛 1)

1) (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)

2) (中国科学院大学物理学院, 北京 101407)

(2023 年 10 月 28 日收到; 2023 年 11 月 24 日收到修改稿)

准确获取海底声学参数对声场分析、声纳应用等具有重要意义. 反演是获取海底声学参数的重要手段之一. 为了避免反演中的多值问题, 地声反演往往尽量减少待反演参数, 多采用单层或双层水平不变地声模型, 反演后的声学参数仅能在有限频段应用, 难以同时应用于较宽频段. 本文以实验中浅地层剖面仪测量的海底沉积层分层结构为基础建立地声模型, 采用多物理量分步联合手段反演各沉积层声学参数, 并通过匹配场定位、后验概率分析、采样等手段对反演结果进行验证. 将反演结果与单层等效地声模型反演结果进行对比分析, 结果说明, 本文建立的多层水平变化海底声学参数更接近真实情况, 可以应用在较宽频段范围, 解释不同声学现象, 且精度更高.

关键词: 宽带地声反演, 多层水平变化海底, 简正波频散, 传播损失

PACS: 43.30.+m, 43.30.Pc **DOI:** 10.7498/aps.73.20231715

1 引 言

在浅海, 海底作为海洋信道的下边界, 其地声参数会对声波传播产生显著影响. 反演是一种有效获取浅海地声参数的方法, 可以快速和低成本地估计出一定范围内的海底沉积物声速、密度和衰减系数等声学参数, 受到水声学界的广泛关注. 国内外已经发展了多种反演方法, 包括匹配场反演法[1,2]、海底反射系数反演法[3]、简正波到达结构反演法[4]、传播损失反演法[5,6]、脉冲时间到达结构反演法[7]、声场频率-距离干涉结构反演法[8]等等. 采用单个物理量构成代价函数进行多个物理量反演时, 往往要面对反演结果的多值性问题, 因此有学者利用不同代价函数对海底参数敏感度不同, 提出了多个代价函数分步反演地声参数的方法. 2004 年, Li 和 Zhang[9] 提出的多种反演方法联合反演方案, 经多个海区进行实验验证, 一定程度上解决了反演中的多值性问题. 2019 年, 李梦竹等[10] 先利用海底反射损失得到层厚以减少待反演参数维度, 再利用匹配场反演其他参数, 有效地降低了反演结果的不确定性.

在对浅海海底参数反演时, 一般将海底等效为如图 1 所示三种水平不变海底模型[11]. 对于较窄频率范围的声学应用, 采用这三种模型通常可以达到比较好的效果. 但是实际应用时, 往往需要更接近实际的多层地声模型. 崔智强等[12] 利用传播损失作为代价函数, 仿真表明在假设三层沉积层的海底环境下, 能够提高地声参数的反演精度. 鹿力成等[13] 通过研究浅海海底模型对于声传播的影响, 发现较高频率声场主要受海底表层影响, 而影响低频声场的海底深度能够达到几十米. 此时, 要想同时满足较宽频段的声传播, 需要采用多层海底模型.

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFF0501200) 和国家自然科学基金 (批准号: 12204507) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pzh@mail.ioa.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: heli@mail.ioa.ac.cn

© 2024 中国物理学会 Chinese Physical Society

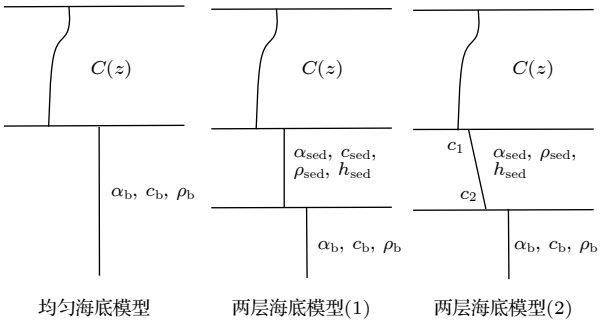

图 1 三种较为常见海底模型

Fig. 1. Three typical bottom models.

实际地声反演中, 除了要考虑海底分层结构外, 往往还需要考虑海底水平变化情况. 祝捍皓等[14]针对浅海水平变化波导下的低频声能量传输问题, 基于有限元方法, 讨论了三种不同海底变化下带来的声能量差异. 邱海宾和杨坤德[15]在利用拖线阵对海底参数进行反演时, 建立了水平变化海底模型, 在声源频率增多、拖线阵变长的情况下, 依旧得到了收敛性好的匹配场结果. Kim 等[16]考虑到海底地形在空间上的差异, 将反演区域分为几段进行反演, 反演结果很好地解释了实验场地随水平变化的声学现象. Bonnel 等[17]在利用啁啾声反射手段得到多层结构的基础上, 提出一种在模态号数未知情况下利用频散曲线反演随距离变化多层海底参数的方法, 成功得到沉积层的地声参数.

2022 年 8 月, 中国科学院声学研究所声场声信息实验室在我国南海北部某大陆架海区进行了一次海底声学反演实验. 实验中利用浅地层剖面仪对海底进行了测量, 如图 2 所示, 可见海底具有明显的分层结构及水平变化. 本文利用本次实验测量的浅地层剖面仪、海洋环境及声学数据, 开展水平变化分层海底地声参数反演方法研究, 建立起更接近真实海底并适用于较宽频带 (50—500 Hz) 声场计算的多层水平变化海底地声模型.

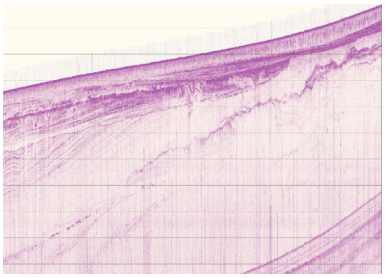

图 2 浅地层剖面仪获取的海底分层结构

Fig. 2. Seabed layering obtained from sub-bottom profiler.

2 海上实验及海底地声模型

海上实验选用没有多次气泡脉动干扰的气枪作为声源, 其标称深度为 7.5 m. 实验期间获取的气枪信号声源谱级曲线如图 3 所示. 使用潜标垂直接收阵接收记录声信号, 垂直阵共有 15 个阵元, 深度分布在 5—80 m 之间. 本文反演过程中将选用 10 km 范围内的气枪信号用于计算海底声速、密度和厚度, 20 km 范围内的气枪信号用于计算衰减系数.

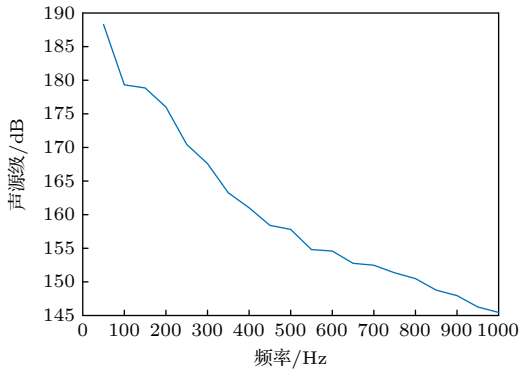

图 3 气枪信号声源谱级

Fig. 3. The frequency response curve of source level of air gun.

垂直阵不同深度处共绑扎了 16 个自容式温度压力计 (TD) 组成温度链, 实验期间获取的声速剖面如图 4 所示. 可见是典型的浅海夏季温跃层声速剖面, 存在线性内波, 但声速剖面起伏不大. 因此, 本文不考虑水文环境的水平变化, 声速剖面取信号发射期间的平均声速剖面, 如图 4 中黑线所示.

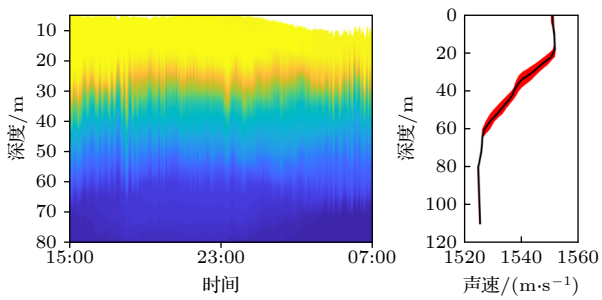

图 4 声速剖面

Fig. 4. Sound-speed profile.

实验期间通过浅地层剖面仪获取了海底沉积层结构, 如图 2 所示. 对该海底分层结构进行简化, 得到地声模型如图 5 所示. 图 5 中, 接收点位处为

0 km, 传播路径上的海底主要由 3 层沉积层和 1 层基底层组成. 假设各沉积层内的海底声速、密度及衰减系数不变, 则待确定的参数主要包括各层的厚度、海底声速、密度及衰减系数, 共 15 个参数.

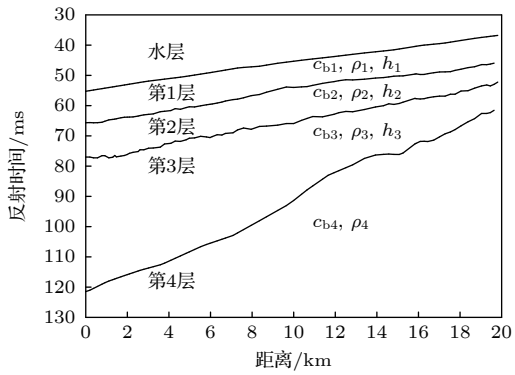

图 5 海底地声模型

Fig. 5. Seabed layering along the consider track.

反演前, 可根据先验信息减少待反演参数数量. 首先, 利用浅地层剖面仪得到的各沉积层声波传播时间, 将各沉积层的厚度变换为海底声速的函数:

$$h_m = \frac{t_{m+1} - t_m}{2} \cdot c_{bm}, \tag{1}$$

式中, $t_{m+1} - t_m$ 为 m 层两个边界的往返时间差; c_{bm} 为 m 层的海底声速.

其次, 考虑到海底密度敏感性远小于海底声速, 海底密度可以通过 Hamilton 经验公式由海底声速表示[18]:

$$c_{bm} = 2330.4 - 1257\rho_m + 487.7\rho_m^2 \ . \tag{2}$$

第三, 利用较近距离声信号反演海底声学参数, 一般代价函数对海底衰减系数不敏感. 反演时, 可以先将海底衰减系数设定为定值, 先对图 5 中各层声速 c_{b1}—c_{b4} 进行反演, 然后将反演后的各层声速作为已知条件, 利用不同距离和频率的声传播损失来反演海底衰减系数.

反演中, 需要选择合适的声场计算模型. 在对浅海低频声传播进行研究时通常采用简正波理论, 由于所考虑的海底水平变化较弱, 且将各层海底参数视为随距离不变, 因此在计算声场时不考虑简正波模态之间的耦合, 采用绝热简正波进行表示[19]:

$$p(r,z) \approx \frac{\mathrm{j}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi\, r}} \mathrm{e}^{-\mathrm{j}/4} \sum_m^{\infty} \varphi_m(z_s) \times \varphi_m(r,z) \frac{\exp\left(\mathrm{j}\int_0^r k_{rm}(r')\mathrm{d}r'\right)}{\sqrt{k_{rm}(r)}}, \tag{3}$$

其中 k_{rm} 为简正波特征值; φ_m 为特征函数.

3 反演方法及过程

3.1 反演流程

基于上述分析, 对分层海底地声模型的声学参数采取分步反演的方法, 反演流程如图 6 所示. 首先, 利用浅地层剖面仪获得海底分层结构, 选取简正波频散结构对各层声速进行反演. 再利用匹配场反演方法对表层声速进一步反演. 最后将利用实测的传播损失反演海底衰减系数. 在反演过程中采用多种方式对反演结果进行验证.

为避免待反演参数陷入局部最优, 采用并行多种群遗传算法[20] 进行优化搜索. 具体操作为: 编码采取 20 位二进制数; 种群数目选择为 3; 每个种群有 24 个个体; 多个种群交叉概率在 0.7—0.9 间随机产生; 多个种群变异概率在 0.001—0.05 间随机产生; 精英种群代价函数连续 20 代不再变化时停止搜索.

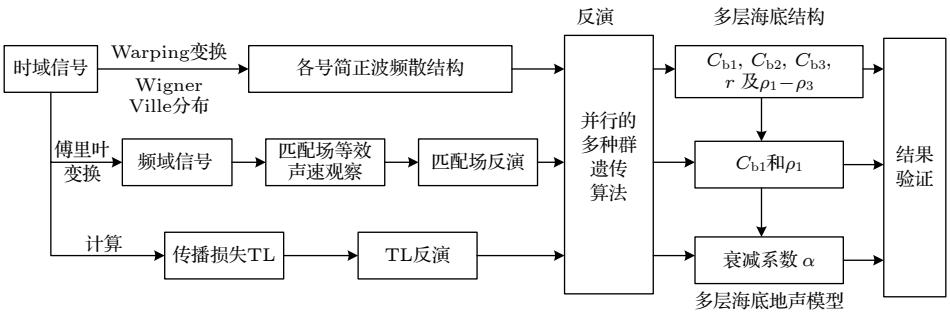

图 6 反演流程图

Fig. 6. Flowchart of inversion.

3.2 简正波频散结构反演各层声速

在浅海, 接收的声压信号 p 可以用一系列简正波的叠加来表示[21]:

$$p(t)=\sum_{n=1}^{N}A_n(t)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Phi_n(t)}, \tag{4}$$

式中, $A_n(t)$, $\Phi_n(t)$ 分别代表在 t 时刻、第 n 号简正波的幅度和相位.

利用简正波频散结构的反演海底声速, 其基本原理是: 由于简正波存在频散现象, 不同阶数不同频率的简正波群速度不同, 对一定距离外接收的脉冲声信号进行时频分析, 提取出来频散曲线与简正波群速度密切相关, 可用于海底声速反演, 采用如下代价函数[22]:

$$\begin{aligned}\mathrm{cost}(\boldsymbol{M})=&\sum_{n}\sum_{f}\left|\Delta T_n^{(\mathrm{e})}(f)-\Delta T_n^{(\mathrm{c})}(f,\boldsymbol{M})\right|\\&+\sum_{n,m(m\neq n)}\sum_{f}\left|\Delta T_{mn}^{(\mathrm{e})}(f)-\Delta T_{mn}^{(\mathrm{c})}(f,\boldsymbol{M})\right|,\end{aligned} \tag{5}$$

其中 $\boldsymbol{M}$ 为待反演的参数向量; $\Delta T_n(f)$ 为第 n 号简正波不同频率信号到达时间差; $\Delta T_{nm}(f)$ 为频率 f 下第 n 号简正波和第 m 号简正波信号到达时间差. 上标 e 代表实验提取数据, c 代表拷贝场数据, 这里通过简正波模型 KEAKENC[23] 计算拷贝场.

在距离为 r 的情况下, 不同频率同号简正波到达时间差 $\Delta T_n(f)$ 为

$$\Delta T_n(f)=\left[\frac{1}{V_{\mathrm{g}}^{(n)}(f,r)}-\frac{1}{V_{\mathrm{g}}^{(n)}(f_{\mathrm{H}},r)}\right]r, \tag{6}$$

式中, $V_{\mathrm{g}}^{(n)}(f,r)$ 为距离 r 处频率等于 f 时对应的第 n 号简正波的群速度; f_{H} 为参考频率, 且 $f_{\mathrm{H}}>f$.

同一频率不同号简正波信号到达时间差 $\Delta T_{nm}(f)$ 为

$$\Delta T_{nm}(f)=\left[\frac{1}{V_{\mathrm{g}}^{(m)}(f,r)}-\frac{1}{V_{\mathrm{g}}^{(n)}(f,r)}\right]r, \tag{7}$$

其中水平变化海底群速度近似为

$$V_{\mathrm{g}}^{(m)}(f,r)=\frac{r}{\displaystyle\int_0^r\frac{\mathrm{d}r'}{V_{\mathrm{g}}^{(m)}(f,r')}}. \tag{8}$$

利用简正波频散结构进行反演, 关键在于如何精确地提取出各号简正波的到达时间差 $\Delta T_n^{(\mathrm{e})}(f)$ 及 $\Delta T_{mn}^{(\mathrm{e})}(f)$. 本文采用 warping 变换结合 Wigner-Ville 分布的方法提取简正波频散结构并计算各号简正波到达时间差.

首先, 引入时域 warping 算子 $h(t)=\sqrt{t^2+{t_r}^2}$ 替换 (4) 式中的 t, 对其进行重新采样, 使得其相位 $\Phi_n(t)$ 随时间的非线性关系转变为线性关系, 即将信号变为一簇单频信号. 变换后得到时域信号解析式 $W_hp(t,r,z)$ 为[24]

$$W_hp(t,r,z)=\sum_{n=1}^{N}\sqrt{h'(t)}A_n[h(t)]\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{cn}t}, \tag{9}$$

其中 $t_r=r/c$, $f_{cn}=\dfrac{(2n-1)c}{4D}$ 为理论计算得到的截止频率, D 为理想波导的深度, c 为波导中的声速, $\sqrt{h'(t)}$ 用于保证变换前后能量守恒.

Warping 变换是一种可逆的变换, 可以通过逆变换算子 $h^{-1}(t)=\sqrt{t^2-{t_r}^2}$ 对 warping 变换后的信号采取时频域滤波再恢复的方式分离出各号简正波. 分离得到的各号简正波可以利用 Wigner-Ville 分布做时频分析, 提取出其频散结构, Wigner-Ville 分布的表达式为[25]

$$P_x(x,y)=\int_{-\infty}^{\infty}x\left(t+\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}w\tau}\mathrm{d}\tau, \tag{10}$$

式中, *代表复数共轭, 它是一种对信号瞬时自相关函数的傅里叶变换.

在实际反演过程中, 首先选取距接收点右侧约 6 km 处的气枪信号如图 7(a), 提取接收深度处于 75.93 m 的阵元接收信号的频散曲线. 如图 7(b) 和图 7(c) 为 warping 变换后的频域分布图和时频分布图, 其中第一阶简正波受噪声干扰程度较大且与第二阶简正波形成干涉现象, 故选取三到八阶简正波频散结构用于反演, 图 7(d) 为提取出的三到八阶简正波频散曲线.

采用后验概率分析方法可以评估反演方法的有效性[26]. 在遗传算法反演进化过程中, 保存所有的搜索值 $\boldsymbol{M}_k$ 以及对应的目标函数 $\mathrm{cost}(\boldsymbol{M}_k)$, 对反演结果在搜索空间 Ω 内进行概率统计, 将向量 $\boldsymbol{M}$ 按照其代价函数的大小进行排列, 按照 Boltzmann 分布进行加权, 得到反演结果的第 k 组向量后验概率分布:

$$\sigma(\boldsymbol{M}_k)=\frac{\exp\left[-\dfrac{\mathrm{cost}(\boldsymbol{M}_k)}{T}\right]}{\displaystyle\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{obs}}}\exp\left[-\dfrac{\mathrm{cost}(\boldsymbol{M}_k)}{T}\right]}, \tag{11}$$

其中 N_{obs} 是保存下来的模式向量的个数; T 是温度

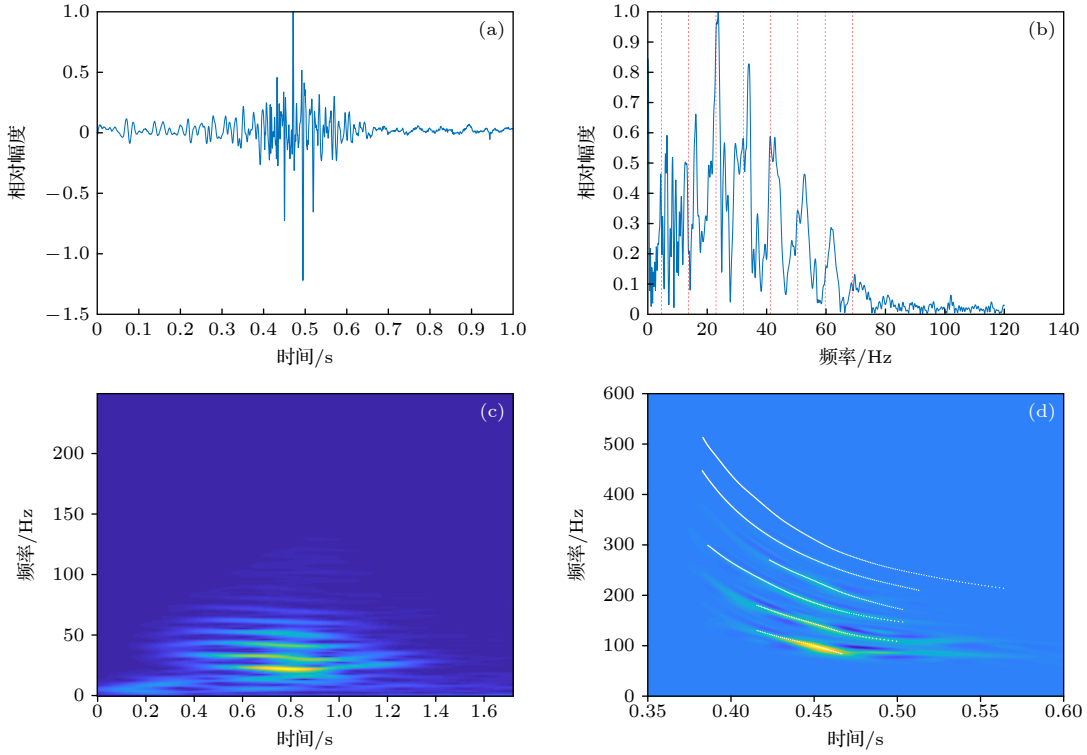

图 7 采用 warping 变换提取频散曲线 (a) 接收信号; (b) warping 变化后的频域信号 (图中红色虚线为各号简正波截止频率); (c) warping 变换后信号时频图; (d) 接收信号时频图 (图中白色虚线为提取出的频散曲线)

Fig. 7. Estimating dispersion curves using warping: (a) Received signal; (b) spectrum of the warped signal, and the cutoff frequency; (c) spectrogram of the warped signal; (d) spectrogram of the signal after warping and Wigner-Ville, and estimated dispersion curves.

控制参数, 一般取反演过程中的 50 个最佳代价函数的均值较为合适; 向量 $\boldsymbol{M}$ 中第 n 个参量值为 m 的边缘概率密度为

$$\sigma^n\left(\boldsymbol{M}^n=m\right)=\frac{\sum\limits_{k=1}^{N_{\rm obs}}\exp\left[-\frac{\operatorname{cost}\left(\boldsymbol{M}_k\right)}{T}\right]\delta\left(\boldsymbol{M}_k^n=m\right)}{\sum\limits_{k=1}^{N_{\rm obs}}\exp\left[-\frac{\operatorname{cost}\left(\boldsymbol{M}_k\right)}{T}\right]}. \tag{12}$$

针对频散曲线图 7(d) 进行反演时, 保留样本的边缘概率密度如图 8 所示, 其收敛程度依次为 $c_{\rm b2}$, $c_{\rm b3}$, r, $c_{\rm b1}$, $c_{\rm b4}$. 其中 $c_{\rm b4}$ 的收敛性最差, 且收敛于最高值 2000 m/s 处, 说明它对于代价函数敏感性较弱, 后续将 $c_{\rm b4}$ 固定为 2000 m/s, 不再对其进行反演. 而相比于收敛性较好、收敛结果近似为单值的 $c_{\rm b2}$ 和 $c_{\rm b3}$, $c_{\rm b1}$ 存在一定的离散性.

为了进一步检验反演方法的有效性, 将反演得到的各海底参数作为输入, 计算距离约为 6.2 km、深度处于 75.93 m 的阵元接收到的信号对应的简正波频散结构, 并与实验数据提取的频散曲线进行比较, 如图 9 所示, 红线为模型计算的频散曲线, 蓝线为实验提取的频散曲线, 可以看出两者符合较好. 再将反演的海底参数用于匹配场定位, 结果如图 10 所示, 图 10 中用红色圆圈标出匹配场定位的距离为 5.9 km、模糊深度中值为 7.75 m, 与实际气枪声源的距离 5.98 km、标定深度 7.5 m 相比, 误差较小.

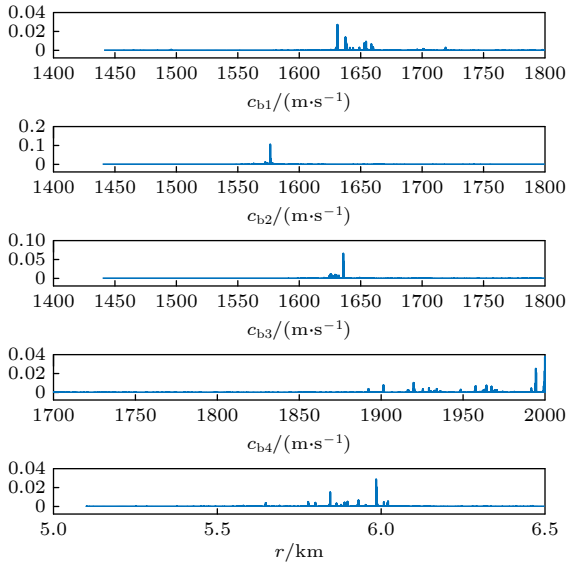

图 8 反演参数的边缘概率密度

Fig. 8. The marginal probability distribution of inversion parameters.

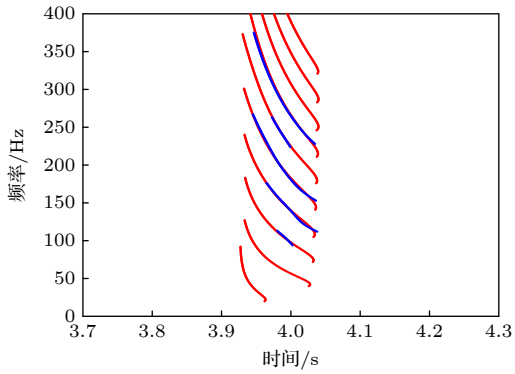

图 9 频散曲线拟合图

Fig. 9. Dispersion curves as estimated from the data with warping (blue) and predicted after inversion (red).

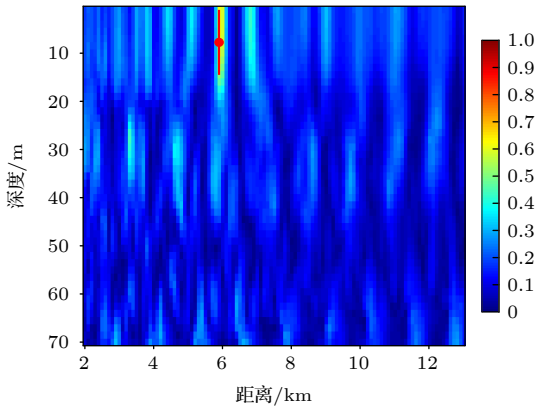

图 10 定位结果

Fig. 10. Localization result of Bartlett processor.

表 1 不同距离下海底参数反演结果

Table 1. Inversion results at different distances.

反演参数	符号	单位	样本1	样本2	样本3	样本4	样本5
收发距离	r	km	5.3	5.8	6	7.8	9.3
第一层海底声速	$c_{\mathrm{b}1}$	m/s	1640	1614	1631	1613	1600
第二层海底声速	$c_{\mathrm{b}2}$	m/s	1566	1576	1576	1570	1578
第三层海底声速	$c_{\mathrm{b}3}$	m/s	1610	1624	1636	1613	1603
第一层海底平均厚度	h_1	m	8.82	8.68	8.71	8.55	8.29
第一层海底密度	ρ_1	g/cm^3	1.79	1.73	1.76	1.73	1.69
第二层平均海底厚度	h_2	m	9.07	9.13	8.92	8.78	8.83
第二层海底密度	ρ_2	g/cm^3	1.60	1.63	1.62	1.61	1.63
第三层海底平均厚度	h_3	m	32.46	32.78	32.22	30.97	29.77
第三层海底密度	ρ_3	g/cm^3	1.72	1.75	1.78	1.72	1.70

进一步对不同距离多个气枪信号进行反演, 得到的结果如表 1 所列. 统计反演结果发现, $c_{\mathrm{b}1}$ 产生了 40 m/s 范围的浮动, $c_{\mathrm{b}2}$ 产生了 12 m/s 范围的浮动, $c_{\mathrm{b}3}$ 产生了 33 m/s 范围的浮动, 结合前面的收敛性分析, 也表明了利用简正波频散结构反演二三层声速较第一层更为准确, 因此需要利用其他方式完成对于第一层声速的进一步探究反演.

3.3 匹配场反演表层声速

以宽带相关 Bartlett 匹配场处理器作为代价函数:

$$\varphi(\boldsymbol{M}) = 1 - \frac{\left|\sum\limits_{a=1}^{N}\sum\limits_{b=a+1}^{N}\sum\limits_{i}^{B}\left(p_a^{\mathrm{e}}(f_i)\,p_b^{\mathrm{e}}(f_i)^*\right)\cdot\left(p_a^{\mathrm{c}}(f_i,\boldsymbol{M})^* p_b^{\mathrm{c}}(f_i,\boldsymbol{M})\right)\right|}{\sqrt{\left[\sum\limits_{a=1}^{N}\sum\limits_{b=a+1}^{N}\sum\limits_{i}^{B}\left|p_a^{\mathrm{e}}(f_i)\,p_b^{\mathrm{e}}(f_i)^*\right|\right]\cdot\left[\sum\limits_{a=1}^{N}\sum\limits_{b=a+1}^{N}\sum\limits_{i}^{B}\left|p_a^{\mathrm{c}}(f_i,\boldsymbol{M})\,p_b^{\mathrm{c}}(f_i,\boldsymbol{M})^*\right|\right]}}, \tag{13}$$

$\boldsymbol{M}$ 为待反演参数向量; N 为接收通道个数; $p_a(f_i)$ 为第 a 个垂直阵元接收到的复声压, e 代表实际数据; c 代表拷贝场数据; * 代表复数共轭. 该代价函数 φ 位于 0—1 之间, 越靠近零越接近于真实场.

匹配场反演之前, 考虑到不同频率声波在传播过程中作用于不同海底深度, 首先通过仿真分析匹配场在不同频率时对海底参数的敏感性, 以获得更适用于反演表层声速 $c_{\mathrm{b}1}$ 的方案.

假设真实的海底结构如图 5 所示, 共分四层, 各层声速 $c_{\mathrm{b}1}$—$c_{\mathrm{b}4}$ 分别为 1580, 1630, 1700, 1800 m/s. 与实验情况相同, 声源深度为 7.5 m, 接收器位于 5.9 km 处, 深度位于 5—80 m, 共 15 个水听器, 仿

表 2 仿真中不同频率下反演获取的单层等效声速

Table 2. Single-layer equivalent sound speeds at different frequencies.

频率/ Hz	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
声速/(m·s^{-1})	1725	1625	1605	1595	1590	1585	1585	1585	1580	1585
代价函数	0.36	0.57	0.54	0.30	0.31	0.21	0.14	0.10	0.12	0.15

真计算垂直阵接收的信号用于模拟实验获取的声信号, 计算频率为 50—500 Hz.

首先, 采用半无限大的单层海底, 在不同频段范围内 (50 Hz 带宽) 进行等效声速 c_{be} 的反演, 声速搜索范围为 1500—2000 m/s, 步长为 5 m/s, 结果如表 2 所列. 可以发现, 50 Hz 频率下反演得到的 c_{be} 为 1725 m/s, 位于真实海底结构中下层声速 c_{b3} 和 c_{b4} 之间, 随着频率增加, c_{be} 逐渐减小, 当频率大于 250 Hz 时, c_{be} 接近于真实海底的表层声速 1580 m/s, 说明较高频率下声波主要受表层作用, 此时匹配场反演对底层声速较不敏感, 因此在利用匹配场进行多层海底地声反演时, 应选取较低频率进行. 而在较低频率上下层海底共同产生影响时, 需要对各层声速进行敏感性分析, 分析时选取 100—150 Hz 频段.

下面, 利用 100—150 Hz 较低频段对各层声速进行敏感性分析, 通过改变其中一个声速, 保持其他声速不变的情况下, 来测试 $\varphi(\boldsymbol{M})$ 的敏感性, 结果如图 11 所示, 圆圈代表其真实值. 由图 11 可以看出, 待反演的参数中第一层声速 c_{b1} 敏感性远远大于 c_{b2} 和 c_{b3}. 因此, 可以利用高低频匹配场结合的方式对表层声速进行反演.

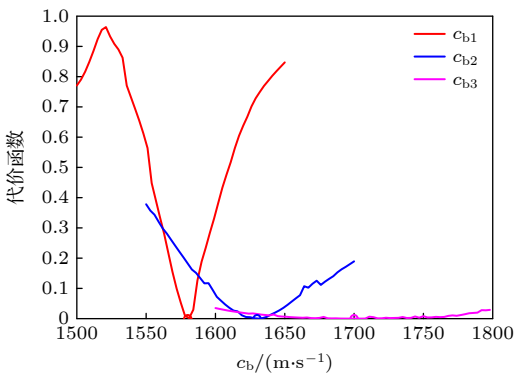

图 11 各层声速敏感性分析

Fig. 11. One-dimension cost function value of sound speeds in each layer.

接下来, 再利用实验数据进行分析. 首先将海底视为一个半无限大的单层海底, 利用匹配场方法反演不同频率下的单层等效声速 c_{be}, 结果如图 12 所示. 图 12 中, 红点代表各频段中代价函数最小值对应的 c_{be}. 图 12 中可以看出, 与上面的仿真结果类似, 频率低于 250 Hz 时反演得到的 c_{be} 应该受较深沉积层声速影响较大, 而频率大于 250 Hz 时反演的 c_{be} 应该只能反映表层声速 c_{b1} 的变化情况. 尽管图 12 中不同距离下得到的 c_{be} 随频率的变化关系存在一定的差异, 但仍然可以总结出如下规律: 250—300 Hz 的 c_{be} 在 1600—1630 m/s 之间, 与 3.2 节利用简正波频散结构反演得到的 c_{b1} 较为接近; 在 350 Hz 处 c_{be} 存在一个明显的声速跃变, 此频率下的 c_{be} 在 1560—1580 m/s 之间; 大于 350 Hz 后随着频率增加, c_{be} 逐渐减小. 因此可以根据随着频率增加, 声线可穿透的海底厚度减小, 猜想表层可能存在一个明显的分层, 该分层以上声速呈正梯度分布, 平均声速在 1560—1580 m/s 之间; 而该分层以下声速较大且较为稳定.

为此, 对浅地层剖面仪数据的表层分层结果进一步分析, 建立更细化的沉积层分层结构, 如图 13 所示. 设上表层存在 c_{b11}—c_{b12} 的正声速梯度, 平均厚度为 h_{11}, 下表层声速为 c_{b13}, 平均厚度为 h_{12}. 在反演过程中, 将简正波频散结构反演得到的二三层平均声速 (c_{b2} =1572 m/s, c_{b3} =1620 m/s) 作为已知, 利用 100—150 Hz 频带下的信号通过匹配场方式反演表层声速变化情况 (即 c_{b11}, c_{b12}, c_{b13}), 得到的结果如表 3, 其中 c_{ba} 为 c_{b11} 和 c_{b12} 的平均声速. 和图 12 进行对比, 可以看出表层情况同单层等效声速变化较为一致, 上表层声速呈正梯度分布, 平均声速在 1562.5—1585 m/s 之间, 与 350 Hz 下的 c_{be} 较为一致, 下表层声速较为稳定在 1670 m/s 附近, 且 h_{11} 和 h_{12} 的和近似于表 1 中 h_1 的结果.

实验期间进行了海底重力取样, 如表 4 为 5 km 位点处采样样品分析结果 (100 kHz 换能器测量). 由表 4 可以看出, 0—4 m 深度内整体采样趋势为随深度增加, 声速逐渐增大, 其中的平均声速为 1560 m/s, 另外, 0 km 处海底取样样品分析 0—2.35 m 深度内的平均声速为 1576 m/s, 10 km 处海底取样样品分析 0—4 m 深度内的平均声速为 1574 m/s. 均与本文反演得到的 c_{ba} 较为接近.

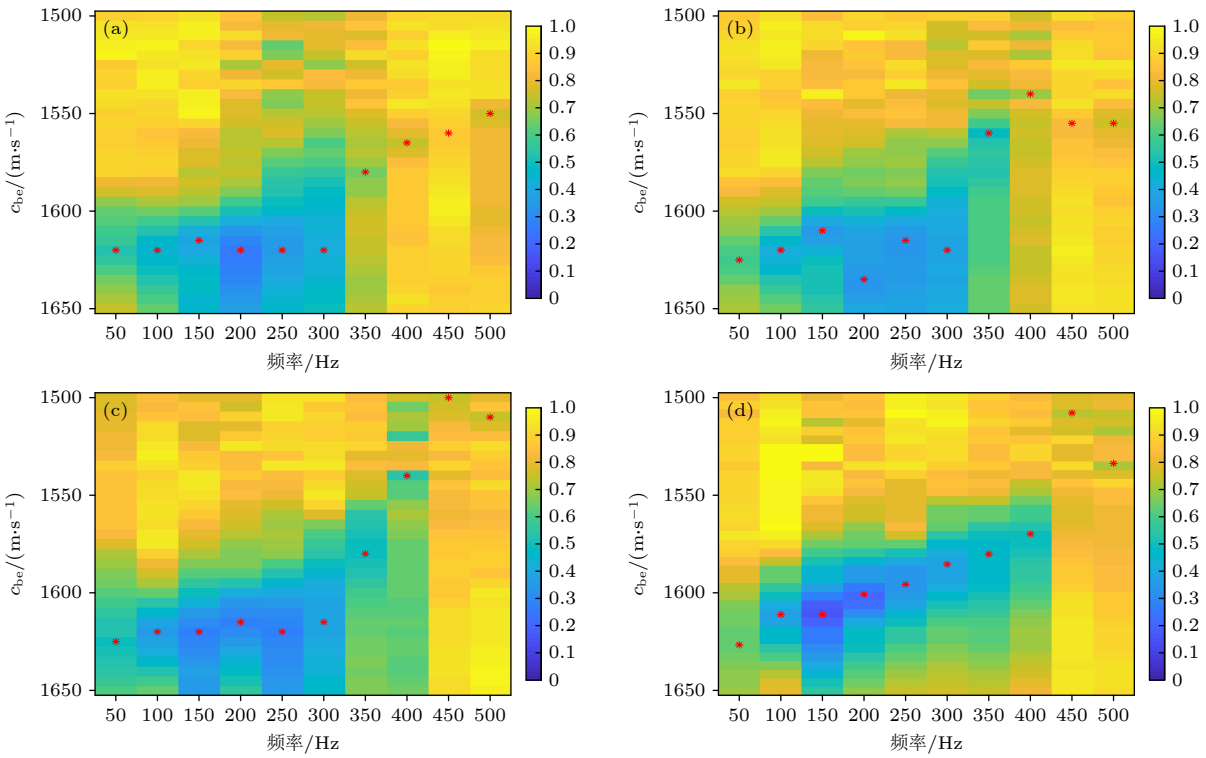

图 12 不同频率下的单层等效声速 (a) $r = 3.5$ km; (b) $r = 3.7$ km; (c) $r = 3.9$ km; (d) $r = 4.1$ km

Fig. 12. Single-layer equivalent sound speeds at different frequencies: (a) $r = 3.5$ km; (b) $r = 3.7$ km; (c) $r = 3.9$ km; (d) $r = 4.1$ km.

表 3 在 100—150 Hz 频段表层参数的反演结果

Table 3. Inversion results of the surface layer at 100—150 Hz.

距离/km	c_{b11}/(m·s^{-1})	c_{b12}/(m·s^{-1})	c_{ba}/(m·s^{-1})	h_{11}/m	c_{b13}/(m·s^{-1})	h_{12}/m
3.7	1540	1585	1562.5	4.18	1665	4.55
4.1	1535	1599	1567	4.24	1665	4.49
4.3	1566	1604	1585	4.28	1672	4.51
4.8	1568	1598	1583	4.31	1670	4.45
5.5	1568	1597	1582.5	4.33	1669	4.37
6	1565	1592	1578.5	4.32	1657	4.35

表 4 5 km 站位采样样品分析结果

Table 4. Sample results at 5 km site.

土样编号	层位 D/cm	温度 T/℃	水深 Z/m	声速 c/(m·s^{-1})	密度(湿) ρ/(g·cm^{-3})	名称
S63511-1	0—40	20.5	83	1542.93	1.66	粘土质粉砂
S63512-1	40—80	20.5	83	1558.55	1.66	粘土质粉砂
S63513-1	80—120	20.5	83	1528.57	1.69	粘土质粉砂
S63514-1	120—150	20.5	83	1539.44	1.75	砂质粉砂
S63521-1	150—190	21.0	83	1564.67	1.82	粘土质粉砂
S63522-1	190—230	21.0	83	1517.44	1.77	粘土质粉砂
S63523-1	230—270	21.0	83	1588.24	1.77	粘土质粉砂
S63524-1	230—300	21.0	83	1564.69	1.77	粘土质粉砂
S63531-1	300—330	21.0	83	1565.55	1.90	砂质粉砂
S63532-1	330—360	21.0	83	1616.20	1.92	粉砂质砂
S63533-1	360—400	21.0	83	1568.53	1.98	粉砂质砂
平均				1560		

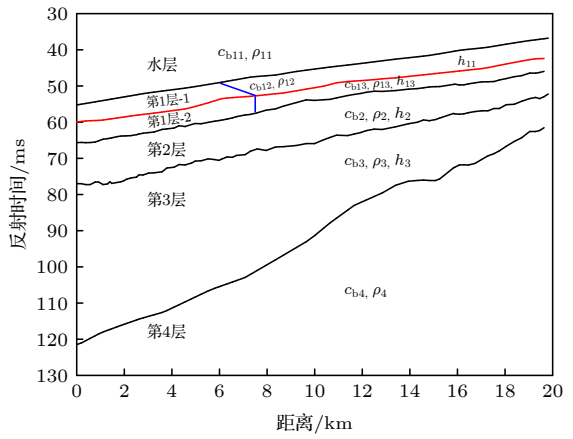

图 13 细化的海底分层结构

Fig. 13. Finer-grained seabed layering along the consider track.

3.4 传播损失反演衰减系数

一定距离内的传播损失曲线是反演低频海底衰减系数的有效途径. 将实验获得的声传播损失用于海底衰减系数反演, 构造代价函数如下:

$$\varphi(\alpha)=\frac{1}{\sqrt{NM}}\left[\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\left(\mathrm{TL}^{\mathrm{e}}\left(f_0,r_i,z_j\right)-\mathrm{TL}^{\mathrm{c}}\left(f_0,r_i,z_j,\alpha\right)\right)^2\right]^{1/2}, \tag{14}$$

式中, N 为声传播距离上的采样点数; M 为阵元个数; e代表实际数据; c代表拷贝场数据; TL 表示以 f_0 为中心频率的 1/3 倍频程带宽内的平均声传播损失.

将简正波频散结构反演得到的二三层声速及其密度和匹配场反演得到的表层声速及其密度的均值作为已知, 将各层衰减系数视作相等, 利用 100—500 Hz 各阵元在 20 km 内共计 39 个距离处的传播损失反演衰减系数, 结果如表 5, 平均误差为 2 dB. 图 14 所示为深度 8 和 54 m 处阵元在 225 和 375 Hz 处传播损失的对比结果, 其中圆圈代表实验数据, 直线代表利用反演结果计算的声传播损失曲线, 可以看出两者符合较好.

将 100—500 Hz 间衰减系数随频率的变化关系进行拟合, 如图 15 所示, 为 $\alpha=0.36f^{1.92}$ dB/m, 其中, f 的单位是 kHz, α 与文献 [27] 总结中的砂质海底条件下衰减系数与频率的非线性关系 $\alpha=(0.38\pm0.08)f^{(1.87\pm0.13)}$ dB/m 基本一致.

为了进一步对比本文反演结果的效果, 建立传统单层海底模型, 根据图 12 中不同频段下等效声

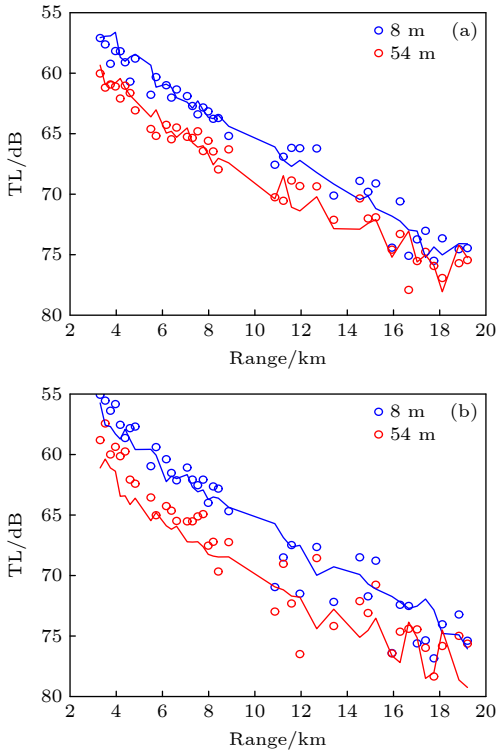

图 14 不同频率的传播损失 (a) 225 Hz; (b) 375 Hz

Fig. 14. Comparison of theoretical and experimental transmission-loss at different frequencies: (a) 225 Hz; (b) 375 Hz.

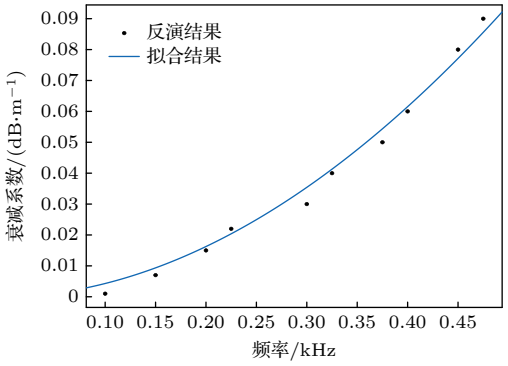

图 15 不同频率的衰减系数

Fig. 15. Inverted attenuation coefficient at different frequencies.

表 5 不同频率下反演的衰减系数及反演结果预报声传播损失的平均误差

Table 5. The inversion result of attenuation coefficient and their errors.

频率/Hz	100	150	200	225	300	325	375	400	450	475
α/(dB·m^{-1})	0.001	0.007	0.015	0.022	0.033	0.04	0.045	0.061	0.078	0.094
误差 /dB	2.91	1.70	1.68	1.42	1.61	1.78	2.27	2.23	2.37	2.60

速的反演结果, 对于声速较为稳定的 100—300 Hz 频段范围, 利用传播损失反演衰减系数, 反演结果及对应的声传播损失预报误差如表 6 所示. 比较表 5 和表 6, 可以看出相同频率下多层海底模型反演结果预报传播损失的误差小于单层等效海底反演结果预报传播损失的误差, 且多层海底声速可以同时适用于较宽频段.

表 6 单层海底模型下反演结果

Table 6. Inversion results for single-layer bottom model.

频率/Hz	100	150	200	225	300
$c_e/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	1615	1615	1615	1613	1600
$\alpha/(\mathrm{dB\cdot m^{-1}})$	0.0001	0.011	0.022	0.032	0.04
误差 /dB	3.98	1.81	1.71	1.53	1.68

4 结 论

2022 年 8 月在南海北部大陆架斜坡海区开展的海上实验中, 浅地层剖面仪获取的海底呈现出明显的水平变化分层结构. 本文据此建立的多层水平变化海底地声模型, 提出一种低频联合反演方法, 即先利用简正波频散结构反演各层海底声速、再利用匹配场方法反演对简正波频散结构较不敏感的表层海底声速, 最后将得到的结果用到传播损失中反演衰减系数. 形成结论如下.

1) 在复杂海底环境中, 利用浅地层剖面仪可以预先获取海底分层结构, 在此基础上进行反演, 可以有效地减少待反演参数, 获得更接近实际海底情况的反演结果.

2) 根据敏感性不同, 利用简正波频散结构和匹配场联合反演的方式, 可以提高各层声速反演结果的可信性, 反演结果可以验证多种声学现象.

3) 相比于等效单层海底模型, 多层水平变化海底地声模型的反演结果在较低频传播损失上的精度得到明显提升, 且多层海底声速可以同时适用于较宽频段.

感谢自然资源部第一海洋研究所提供的浅地层剖面仪数据, 感谢中山大学海洋与技术学院提供的采样数据, 感谢南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州) 组织实施的“关键海区底质声学特性调查航次”的全体海上工作人员, 是他们的辛勤劳动为本论文提供了可靠的数据支撑.

参考文献

[1] Taroudakis M I, Markaki M G 1998 *J. Comput. Acoust.* **6** 167

[2] Yang K D 2003 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [杨坤德 2003 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]

[3] Cobo P P, Ranz G C 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **85** 2388

[4] Zhou J X 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **78** 1003

[5] Zhao M, Hu C Q 2009 *Tech. Acoust.* **28** 104 (in Chinese) [赵梅, 胡长青 2009 声学技术 **28** 104]

[6] Li F H, Zhang R H 2000 *Acta Acustica* **25** 297 (in Chinese) [李风华, 张仁和 2000 声学学报 **25** 297]

[7] Yang T C, Yoo K, Fialkowski L T 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 3338

[8] Weng J B, Li F H, Guo Y G 2015 *Acta Acustica* **40** 207 (in Chinese) [翁晋宝, 李风华, 郭永刚 2015 声学学报 **40** 207]

[9] Li Z L, Zhang R H 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1100

[10] Li M Z, Li Z L, Zhou J X, Zhang R H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 094301 (in Chinese) [李梦竹, 李整林, 周纪浔, 张仁和 2019 物理学报 **68** 094301]

[11] Wu S L 2016 *M. S. Thesis* (Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [吴双林 2016 硕士学位论文 (北京: 中国科学院声学研究所)]

[12] Cui Z Q, Xue Y Y, Xiao R, Wang Q L 2021 *Chin. Water Transport* **21** 147 (in Chinese) [崔智强, 薛洋洋, 肖瑞, 王其乐 2021 中国水运 **21** 147]

[13] Lu L C, Ma L, Chen Y M 2007 *Tech. Acoust.* **26** 787 (in Chinese) [鹿力成, 马力, 陈耀明 2007 声学技术 **26** 787]

[14] Zhu H H, Xiao R, Zhu J, Tang J 2021 *J. Shanghai Jiao Tong Univ.* **55** 958 (in Chinese) [祝捍皓, 肖瑞, 朱军, 唐骏 2021 上海交通大学学报 **55** 958]

[15] Qiu H B, Yang K D 2011 *Acta Armamentarii* **32** 298 (in Chinese) [邱海宾, 杨坤德 2011 兵工学报 **32** 298]

[16] Kim K, Seong W, Lee K 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 735

[17] Bonnel J, Lin Y T, Eleftherakis D, et al. 2018 *J. Acoust. Soc. Am.* **143** 405

[18] Hamilton E L, Bachman R T 1982 *J. Acoust. Soc. Am.* **72** 1891

[19] Shao B H 2012 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [邵宝辉 2012 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]

[20] Zhou Y H, Lu Y C, Shi C Y 1998 *J. Tsinghua Univ.* (Sci. & Technol.) **38** 93 (in Chinese) [周远晖, 陆玉昌, 石纯一 1998 清华大学学报 (自然科学版) **38** 93]

[21] Bonnel J, Nicolas B, Mars J I, Walker S C 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 719

[22] Zhang D M, Li Z L, Zhang R H 2005 *Acta Acustica* **30** 415 (in Chinese) [张德明, 李整林, 张仁和 2005 声学学报 **30** 415]

[23] Porter M B 2001 *The KRAKEN Normal Mode Program* (Italy: DRAFT. SACLANT Undersea Research Center) pp1–196

[24] Niu H Q, He L, Li Z L, Zhang R H, Nan M X 2014 *Acta Acustica* **39** 1 (in Chinese) [牛海强, 何利, 李整林, 张仁和, 南明星 2014 声学学报 **39** 1]

[25] Hu G S 1997 *Digital Signal Processing* (Beijing: Tsinghua University Press) p386 (in Chinese) [胡广书 1997 数字信号处理-理论、算法与实现 (北京: 清华大学出版社) 第 386 页]

[26] Zhang X L, Li Z L, Huang X D 2009 *Acta Acustica* **34** 54 (in Chinese) [张学磊, 李整林, 黄晓砥 2009 声学学报 **34** 54]

[27] Zhou J X, Zhang X Z, Knobles D P 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 2848

Low frequency inversion method based on multi-layer holizontal variation shallow seafloor model*

Kang Juan [1)2)] Peng Zhao-Hui [1)†] He Li [1)‡] Li Sheng-Hao [1)] Yu Xiao-Tao [1)]

1) (*State Key Laboratory of Acoustics*, *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

2) (*School of Physical Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 101407, *China*)

(Received 28 October 2023; revised manuscript received 24 November 2023)

Abstract

Sound propagation in shallow water is significantly influenced by geoacoustic properties. Estimating these geoacoustic parameters is essential for sound field analysis and sonar performance assessment. As a common practice, the seafloor is often treated as a single-layer or two-layer range-independent geoacoustic model to reduce the number of involved parameters. However, acoustic parameters inverted through these two geoacoustic models are typically limited in their applicability to a specific frequency range, thus posing challenges when applied across a broader frequency range. A range-dependent multi-layer geoacoustic model based on experimental measurements obtained with a sub-bottom profiler is proposed in this study. The inversion scheme combines three inversion methods to estimate geoacoustic parameters, considering the different sensitivities of geoacoustic parameters to different physical parameters within the acoustic field. Firstly, modal dispersion is used to invert the geoacoustic parameters of each layer, with the dispersion curve obtained through warping transform and the Wigner-Ville distribution. After that, both the localization using matched field processing and the dispersion curve fitting demonstrate the effectiveness of the inversion results for each layer, although the peak of the probability distribution of sound speed in the first layer is broader than in others. Secondly, matched field processing is employed to invert the geoacoustic parameters of the first layer. This method is based on the theory that as frequency increases, the depth of sound rays penetrating the seabed decreases, revealing changes in the first layer's sound speed with the seabed depth. Lastly, bottom attenuation coefficients at different frequencies are inverted by the transmission loss (TL), and a fitting relationship between the attenuation coefficient and the frequency is derived. The inversion results obtained by using the range-dependent multi-layer geoacoustic model are compared with results estimated by the single-layer geoacoustic model. The findings indicate that the transmission loss (TL) error from the range-dependent multi-layer geoacoustic model in this study is smaller than that from the single-layer geoacoustic model, especially in the lower frequency band. The range-dependent multi-layer geoacoustic model proves to be suitable for a broader frequency range, providing better precision in explaining various acoustic phenomena.

Keywords: broadband geoacoustic inversion, range-dependent multi-layer geoacoustic model, modal dispersion, transmission loss

PACS: 43.30.+m, 43.30.Pc **DOI:** 10.7498/aps.73.20231715

* Project supported by the National Key Research and Development of China (Grant No. 2021YFF0501200) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12204507).

† Corresponding author. E-mail: pzh@mail.ioa.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: heli@mail.ioa.ac.cn

物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

基于多层水平变化浅海海底模型的低频反演方法

康娟　彭朝晖　何利　李晟昊　于小涛

Low frequency inversion method based on multi-layer holizontal variation shallow seafloor model

Kang Juan　Peng Zhao-Hui　He Li　Li Sheng-Hao　Yu Xiao-Tao

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 73, 054301 (2024)　DOI: 10.7498/aps.73.20231715

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.73.20231715

当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种低声速沉积层海底参数声学反演方法

Geoacoustic inversion for acoustic parameters of sediment layer with low sound speed

物理学报. 2019, 68(9): 094301　https://doi.org/10.7498/aps.68.20190183

深海海底反射会聚区声传播特性

Characteristics of convergence zone formed by bottom reflection in deep water

物理学报. 2019, 68(1): 014301　https://doi.org/10.7498/aps.68.20181761

西太平洋远距离声传播特性

Characteristics of long-range sound propagation in western Pacific

物理学报. 2022, 71(21): 214302　https://doi.org/10.7498/aps.71.20220566

深海不完整声道下反转点会聚区研究

Lower turning point convegence zone in deep water with an incomplete channel

物理学报. 2021, 70(2): 024301　https://doi.org/10.7498/aps.70.20201375

基于大掠射角海底反射特性的深海地声参数反演

Inversion of deep water geoacoustic parameters based on the seabed reflection characteristics of large grazing angles

物理学报. 2022, 71(11): 114302　https://doi.org/10.7498/aps.71.20211915

深海海底山环境下声传播水平折射效应研究

Horizontal refraction effects of seamounts on sound propagation in deep water

物理学报. 2018, 67(22): 224302　https://doi.org/10.7498/aps.67.20181480