

一种基于简正波模态频散的远距离宽带海底参数反演方法

郭晓乐 杨坤德 马远良

A far distance wideband geoacoustic parameter inversion method based on a modal dispersion curve

Guo Xiao-Le Yang Kun-De Ma Yuan-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 174302 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.174302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于水声信道传播时延排序的分层空时信号检测

Ordered detection of layered space-time signals based on the propagation delays of underwater acoustic channels

物理学报.2015, 64(16): 164302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164302>

水声正交频分多址上行通信稀疏信道估计与导频优化

Sparse channel estimation and pilot optimization for underwater acoustic orthogonal frequency division multiple access uplink communications

物理学报.2015, 64(15): 154304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154304>

水下任意刚性散射体对 Bessel 波的散射特性分析

Study on underwater acoustic scattering of a Bessel beam by rigid objects with arbitrary shapes

物理学报.2015, 64(15): 154305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154305>

矢量拖线阵水听器流噪声响应特性

Flow-induced noise calculations for vector hydrophones in towed arrays

物理学报.2015, 64(15): 154306 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154306>

水下目标弹性声散射信号分离

Separation of elasto acoustic scattering of underwater target

物理学报.2015, 64(9): 094302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094302>

一种基于简正波模态频散的远距离宽带海底参数反演方法*

郭晓乐 杨坤德[†] 马远良

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2015年1月9日收到; 2015年4月13日收到修改稿)

在浅海环境中, 海底环境参数对声传播有着重要的影响. 由于利用单个宽带声源进行海底参数反演时, 随着距离的增大, 误差变大, 本文提出利用 warping 变换对在浅海波导中传播的, 不同距离上的两个宽带爆炸声源进行简正波的有效分离, 实现了宽带爆炸声源的远距离海底参数反演. 采用全局寻优遗传算法对提取出的模态频散到达时间差与理论计算的模态频散到达时间差进行匹配处理, 并结合随距离连续变化的声传播损失, 实现了利用单水听器进行海底参数的反演. 实验结果表明: 运用反演出的海底参数提取模态频散时间差和实测数据提取出的模态频散时间差吻合得较好; 而通过传播损失反演得到的海底衰减系数与频率呈指数关系. 最后, 对反演结果进行了后验概率分析, 并将本组爆炸声源的反演结果用于另一组不同距离上爆炸声源时仍然有效, 来评价反演结果的有效性.

关键词: 地声反演, 两个宽带爆炸声源, 模态频散, 传播损失

PACS: 43.30.+m, 92.10.Vz

DOI: 10.7498/aps.64.174302

1 引言

浅海环境中, 海底的声速、密度、衰减系数等海底参数对声传播^[1]有着重要的影响. 由于这些海底参数很难直接测量且费用昂贵, 因此利用声学手段进行海底参数反演成为水声物理中的热点问题. 近些年来, 利用单接收水听器进行参数反演的方法被提出来^[2], 单水听器反演方法一般利用简正波的频散特性^[3], 即不同频率、不同模态的简正波以不同的群速度在波导中传播.

利用海洋波导中简正波的频散关系反演海底参数, 关键在于准确地提取各号简正波的频散曲线. 近年来, 基于简正波频散特征映射的信号处理方法被应用于水声学中. Bonnel 等利用 warping 变换^[4-7]分离波导简正波, 并利用重排的谱图分析方法估计各号简正波的频散曲线, 最后利用提取的频散曲线进行海底参数反演. 李整林等^[8-10]利用

warping 变换提取单个宽带声源的频散曲线, 并利用提取的频散曲线进行海底参数反演. 但是他们处理的都是单个宽带声源, 单个宽带声源的反演误差随着接收水听器与宽带声源距离的增加而变大^[6], 为了准确地反演远距离的海底参数, 本文利用不同距离上的两个宽带爆炸声源进行模态频散分析, 实现爆炸声源的远距离海底参数反演, 通过 warping 变换分离出两爆炸声源在低频段的各号简正波, 运用不同距离上的相对模态频散时间差对实验海区的海底参数进行了反演; 在得到海底密度和声速数据后, 结合与距离有关的传播损失, 反演出海底衰减系数.

海底参数反演是一个多维参数的最优化搜索过程, 由于海底复杂多变, 反演时往往会存在多值性和不确定性, 所以很难保证最终的结果是绝对的最优值, 如何评价反演结果的有效性就显得至关重要. 一般地, 用后验概率分析的方法^[11,12]分析反

* 国家自然科学基金(批准号: 11174235)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 3102014JC02010301)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ykdzym@nwpu.edu.cn

演结果, 从而评估反演算法及反演结果的有效性. 本文中, 首先利用后验概率的方法, 评估反演结果的有效性; 其次, 将反演结果代入模型计算不同距离上爆炸声源模态频散时间差与实验数据提取的模态频散时间差对比, 以及计算不同接收深度和不同频率下的传播损失对比, 来进一步验证反演结果的可靠性.

2 反演方法及过程

2.1 运用 warping 变换进行模态分离

根据简正波理论, 在水平不变的环境中, 一个深度为 z_s 的声源发射一个宽带脉冲, 则在距离为 r 、深度为 z_r 的接收点处的谱 $Y(f)$ 可以表达为^[13]

$$Y(f) \approx Q \sum_{m=1}^M \psi_m(f, z_s) \psi_m(f, z_r) \times \frac{e^{jk_{rm}(f)r}}{\sqrt{k_{rm}(f)r}}, \quad (1)$$

其中, M 是传播模态数, ψ_m 是第 m 阶模态的模态函数, $k_{rm}(f)$ 是第 m 阶模态的传播波数. 系数 $Q = e^{j\pi/4}/\sqrt{8\pi\rho(z_s)}$ 是一个常量, $\rho(z_s)$ 表示在声源深度处的海水密度值.

运用固定相位分析, 得出时域解 $y(t)$ 为^[14]

$$y(t) = \sum_{m=1}^M A_m(t) e^{j\Phi_m(t)}, \quad (2)$$

其中, $\Phi_m(t)$ 表示随时间变化的相位, $A_m(t)$ 表示第 m 阶模态瞬时幅度. 这个幅度变化和相位变化相比是一个时间的慢变函数. 在理想波导(两个界面均为全反射界面且与距离无关的等速水层)条件下, 随时间变化的相位 $\Phi_m(t)$ 可以表示为

$$\Phi_m(t) = 2\pi f_{cm} \sqrt{t^2 - (r/c)^2}, \quad (3)$$

其中, $f_{cm} = mc/2D$ 是理想波导第 m 号简正波的截止频率, D 为理想波导的深度, c 为波导中的声速. 因此, 在理想波导条件下, (2) 式可写为

$$y(t) = \sum_{m=1}^M A_m(t) e^{j2\pi f_{cm} \sqrt{t^2 - (r/c)^2}}. \quad (4)$$

由于各阶模态频散曲线是时间和频率的双重函数, 在时频图上相互叠加, 不容易区分. 为了将上式的相位项变为时间的线性函数, 从而提取各阶模态曲线, 本文使用 warping 变换^[4-7]对宽带爆炸声源进行处理.

从数学上来说, warping 变换主要是一个置换过程. 假设变量为 t 的函数 $y(t)$, 其 warping 变换之后的函数 $W_h y(t)$ 为^[5]

$$W_h y(t) = \sqrt{\left| \frac{dh(t)}{dt} \right|} y[h(t)], \quad (5)$$

其中, $h(t) = \sqrt{t^2 + (r/c)^2}$ 是本文所使用的 warping 函数. 我们知道 $W_h y(t)$ 和 $y(t)$ 是一个信号的两种表示, 但包含相同的信号能量. 在本文中, $y(t)$ 是时域接收信号, 变量 t 是时间.

运用 warping 变换处理相当于对接收到的时域信号进行了重采样, 将 (4) 式中的原始采样时刻 t 换成新的采样时刻 $h(t)$, 得到时域 warping 变换后的结果为

$$\begin{aligned} W_h y(t) &= \sqrt{\left| \frac{dh(t)}{dt} \right|} y[h(t)] \\ &= \sqrt{h'(t)} \sum_{m=1}^M A_m[h(t)] e^{j2\pi f_{cm} \sqrt{h(t)^2 - (r/c)^2}} \\ &= \sum_{m=1}^M \sqrt{h'(t)} A_m[h(t)] e^{j2\pi f_{cm} t} \\ &= \sum_{m=1}^M C_m(t) e^{j2\pi f_{cm} t}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $C_m(t) = \sqrt{h'(t)} A_m[h(t)]$ 是变换之后第 m 号简正波的瞬时幅度. 由上式可以看出, 经过 warping 变换之后的各阶模态, 其瞬时相位随时间是线性变化的, 即变换之后各阶简正波模态都是单频信号, 且单频信号的频率对应每阶模态的截止频率. 对变换后每阶模态对应的单频信号运用霍夫变换^[15,16]进行模态分离并提取出每阶模态函数, 从而分离出各阶模态频散曲线经变换之后的单频成分. 由于 warping 变换是一种可逆变换, 时域的逆 warping 变换通过逆变换函数 $h^{-1}(t) = \sqrt{t^2 - (r/c)^2}$ 实现

$$W_{h^{-1}} W_h y(t) = W_h W_{h^{-1}} y(t) = y(t). \quad (7)$$

对提取出的各阶模态的单频成分进行逆 warping 变换, 从而将提取出的各阶模态恢复到原来的时频域, 进行后续处理. 图 1 给出了整个模态提取的过程.

虽然 (6) 式得到的 warping 变换是在理想波导的基础上得出的, 但是文献^[5, 6]指出 warping 变换是一种较为稳健的变换, 低频成分可以用于大部分浅海波导中.

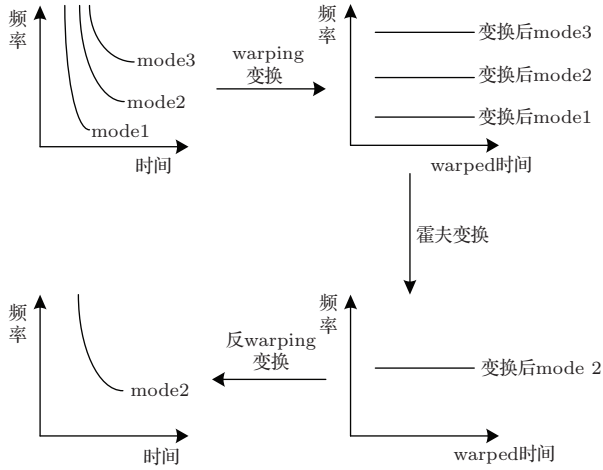


图1 使用 warping 进行模式分离

Fig. 1. Principle of modal filtering using warping.

2.2 由模态频散时间差反演海底声速和密度

由于海底声速对模态频散曲线比较敏感, 而海底密度对模态频散曲线较为敏感^[17,18]. 所以通过提取出的各阶模态曲线反演海底声速和密度比较有效. 由(1)式可得, 第 m 阶模态的群速度的倒数可表示为^[13]

$$\frac{1}{V_g^{(m)}} = \frac{dk_m}{d\omega} = \frac{\omega}{k_m} \int_0^\infty \frac{\psi_m^2(z)}{\rho(z)c^2(z)} dz. \quad (8)$$

当使用单个声源进行模态反演时, 对于一个给定的距离 r , 同一频率不同号数的简正波到达时间差为

$$\Delta T_{mn}(f) = \left[1/V_g^{(m)}(f) - 1/V_g^{(n)}(f) \right] r \propto r, \quad (9)$$

对于不同频率同一号数的简正波的到达时间差为

$$\Delta T_n(f) = \left[1/V_g^{(n)}(f) - 1/V_g^{(n)}(f_H) \right] r \propto r, \quad (10)$$

所以单个宽带声源进行反演时的代价函数^[8-10] $\phi(G)$ 为

$$\begin{aligned} \phi(G) = & \sum_n \sum_f \frac{|\Delta T_n(f) - \Delta T_n(f, G)|}{|\Delta T_n(f)| |\Delta T_n(f, G)|} \\ & + \sum_{m, n(m \neq n)} \sum_f \frac{|\Delta T_{mn}(f) - \Delta T_{mn}(f, G)|}{|\Delta T_{mn}(f)| |\Delta T_{mn}(f, G)|} \\ & \propto \frac{1}{r}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中, n 表示相应的模态, f 表示反演过程中所使用的不同频率, f_H 为参考频率. G 包含海底声速和密

度等对模态频散曲线敏感性较强的几个参数. 由代价函数可知, 代价函数与距离成反比关系, 所以随着距离的增加, $\frac{1}{r}$ 的值变得越来越小, 对代价函数的影响越来越大, 从而导致反演结果不准确. 所以利用同一测线上的两个不同距离上的爆炸声源进行远距离海底参数反演.

对于在同一测线上距离分别为 r_1 和 r_2 的两个型号参数都相同(爆炸时认为产生相同的宽带信号)的宽带爆炸声源, 满足 $r_1, r_2 > r_1 - r_2$.

$$\begin{aligned} \Delta T'_{mn}(f) = & \left[1/V_g^{(m)}(f) - 1/V_g^{(n)}(f) \right] r_1 \\ & - \left[1/V_g^{(m)}(f) - 1/V_g^{(n)}(f) \right] r_2 \\ & \propto (r_1 - r_2). \end{aligned} \quad (12)$$

不同频率同一号数的简正波的到达时间差为

$$\begin{aligned} \Delta T'_n(f) = & \left[1/V_g^{(n)}(f) - 1/V_g^{(n)}(f_H) \right] r_1 \\ & - \left[1/V_g^{(n)}(f) - 1/V_g^{(n)}(f_H) \right] r_2 \\ & \propto (r_1 - r_2). \end{aligned} \quad (13)$$

所以估计海底参数信息 G 能够通过下式代价函数 $\phi'(G)$ 得到:

$$\begin{aligned} \phi'(G) = & \sum_n \sum_f \frac{|\Delta T'_n(f) - \Delta T'_n(f, G)|}{|\Delta T'_n(f)| |\Delta T'_n(f, G)|} \\ & + \sum_{m, n(m \neq n)} \sum_f \frac{|\Delta T'_{mn}(f) - \Delta T'_{mn}(f, G)|}{|\Delta T'_{mn}(f)| |\Delta T'_{mn}(f, G)|} \\ & \propto \frac{1}{(r_1 - r_2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

由代价函数(14)可知, 代价函数与两个爆炸声源的距离之差成反比, 所以随着反演距离的增加, 只要保证两个爆炸声源之间的距离保持不变, 距离成分就不会影响代价函数的寻优过程, 从而实现远距离准确地反演海底参数. 对于不同的海底模型, G 包含的参数个数和参数变量会相应改变.

2.3 由传播损失反演海底衰减

由于海底衰减系数对模态频散曲线不敏感, 而对传播损失比较敏感, 在得到海底声速和密度的条件下, 再根据传播损失来反演海底衰减^[6-10]. 定义距离为 r_i 的实测的传播损失 $TL_{\text{实测}}(r_i)$ 与数值模拟的传播损失 $TL_{\text{数值}}(r_i, \alpha)$ 之差为 $\Delta TL(r_i, \alpha) = TL_{\text{数值}}(r_i, \alpha) - TL_{\text{实测}}(r_i)$, 令 $\overline{\Delta TL(\alpha)}$ 为不同距离上 $\Delta TL(r_i, \alpha)$ 的平均值. 并且定义反演衰减系数 α 的代价函数为

$$E(\alpha) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta TL(r_i, \alpha) - \overline{\Delta TL(\alpha)})^2}{N-1}}, \quad (15)$$

其中, N 是距离个数. 通过调节海底衰减系数 α 的数值, 使标准偏差 $E(\alpha)$ 最小时, 此时的海底衰减系数的数值即为反演的估计值. 其中距离为 r , 深度为 z 的数值模拟声传播损失 $TL_{\text{数值}}(r_i, \alpha)$ 可以由简正波理论计算

$$TL_{\text{数值}}(r, \alpha) \approx -20 \log \left| \frac{\sqrt{2\pi}}{\rho(z_s)} \sum_{m=1}^M \psi_m(z_s, \alpha) \times \psi_m(z_r, \alpha) \frac{e^{jk_{rm}(\alpha)r}}{\sqrt{k_{rm}(\alpha)r}} \right|. \quad (16)$$

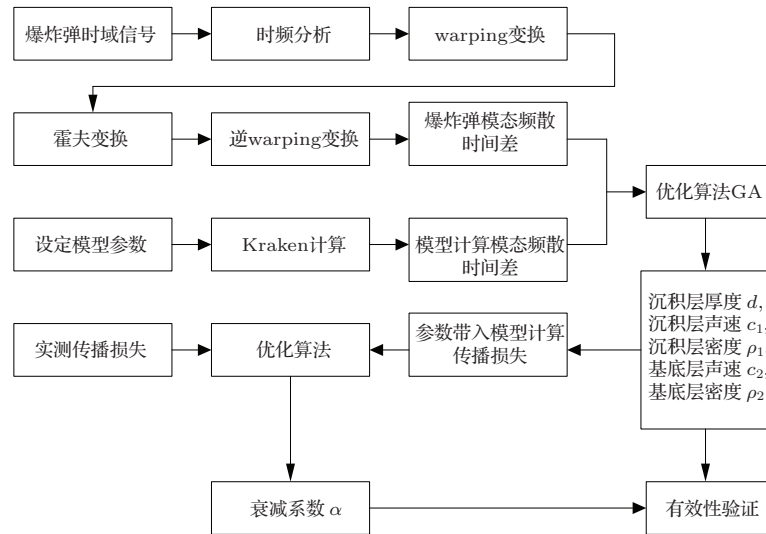


图2 反演流程图

Fig. 2. Flowchart of inversion.

3 实验数据分析

3.1 模态曲线提取

实测的实验海区的海底地形比较平坦, 平均深度为 105 m. 图 3 为实验海区的平均声速剖面.

选择爆炸深度为 50 m, 重量为 1 kg 的两枚距离接收阵分别为 $r_1 = 36$ km 和 $r_2 = 49.5$ km 的爆炸声源进行分析. 图 4 给出了距离为 $r_1 = 36$ km, 深度为 48 m 的水听器接收到的信号时域波形和时频图.

从爆炸声源的时频图可知爆炸声源经过一定距离传播后, 在低频段 ($f < 200$ Hz) 前 4 阶模态频散曲线分离开来, 其中分离的各阶模态频散传播的时间包含了海底参数信息, 提取出分离的前

2.4 反演算法流程

利用两爆炸声源模态频散时间差反演海底参数, 图 2 为整个参数反演的流程图. 首先, 从实验数据中估计各号筒正波的相对到达时间, 提取两个爆炸声源模态频散时间差, 通过建立声场模型计算两个距离上的模态频散时间差, 用实测频散时间差与模型计算频散时间差构成代价函数, 从而估计出海底声速和密度等参数; 其次, 将估计出的海底参数代入模型计算传播损失, 提取测线上的实际传播损失, 将实测值和模型计算值的标准差构成代价函数, 得出海底衰减系数; 最后对反演结果进行了有效性验证.

4 阶模态传播时间, 用于反演海底参数. 首先, 运用 warping 变换对两个爆炸声源低频段数据进行处

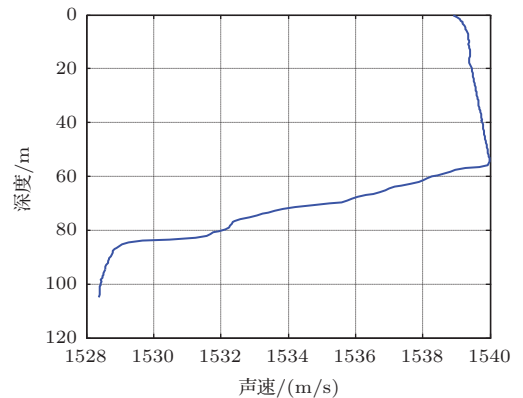


图3 实验海区的平均声速剖面

Fig. 3. The average sound speed profile in the water column corresponds to in situ measurements.

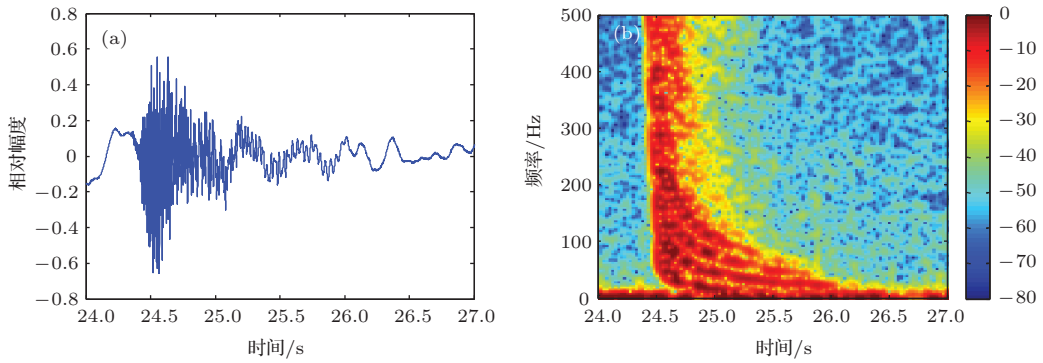


图4 (网刊彩色) 距离为 $r_1 = 36$ km 的爆炸声源的时域波形和时频图 (a) 时域波形; (b) 时频图

Fig. 4. (color online) The received explosive signal at $r_1 = 36$ km: (a) the time domain waveform; (b) the time-frequency diagram.

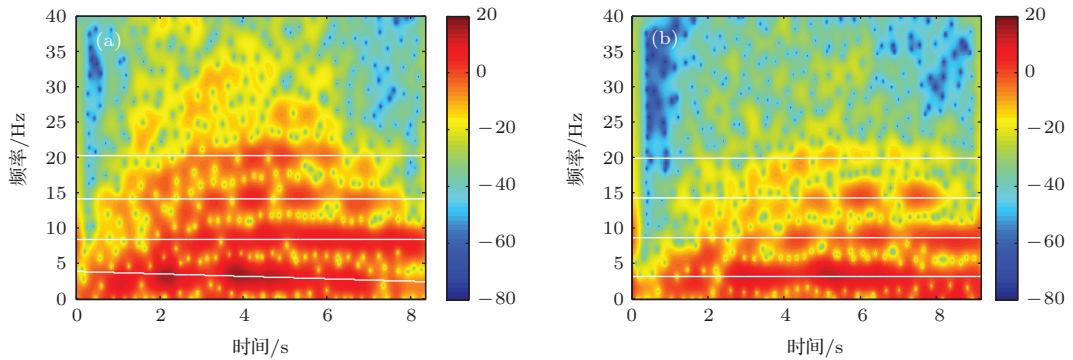


图5 (网刊彩色) 宽带爆炸声源经 warping 变换后的时频图 (a) $r_1 = 36$ km; (b) $r_2 = 49.5$ km

Fig. 5. (color online) The time-frequency diagram of warped explosive signal: (a) $r_1 = 36$ km; (b) $r_2 = 49.5$ km.

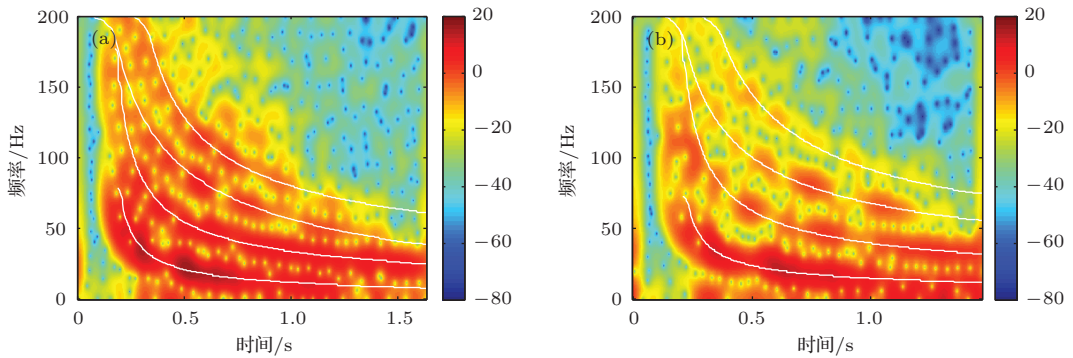


图6 (网刊彩色) 提取出的模态频散曲线图 (a) $r_1 = 36$ km; (b) $r_2 = 49.5$ km

Fig. 6. (color online) The extracted model dispersion curves of received signals: (a) $r_1 = 36$ km; (b) $r_2 = 49.5$ km.

理, 并利用霍夫变换提取出图形所包含的直线成分. 图5即为经 warping 变换之后两个爆炸声源的时频图.

图5中的白色直线成分为运用霍夫变换提取出的各阶模态频散成分, 最后对提取出的直线成分进行逆 warping 处理, 得到如图6所示的在原时频域的频散曲线.

图6中白色曲线为经过处理提取出的不同阶

数的模态频散曲线, 由图6可知, 提取出的模态频散曲线和时频图比较符合. 说明本方法在提取爆炸声源模态频散曲线时比较有效. 为了利用模态频散曲线进行反演, 必须记录两个爆炸声源不同模态不同频率的频散曲线的相对到达时间. 首先将单个爆炸声源提取出来, 然后对提取出来的爆炸声源时频图进行能量归一化处理, 从归一化能量开始大于一定门限 $\varepsilon = 0.7$ 的时刻作为爆炸声源模态频散时间

的起始时刻.

3.2 海底参数反演

假设海底模型采用图7所示的两层模型, 并使用遗传算法^[11,12](GA)在参数空间中搜索全局最优解, 使(14)式所示的代价函数值达到最小. 遗传算法搜索的参数共5个, 分别为沉积层厚度 d 、沉积层声速 c_{sed} 、沉积层密度 ρ_{sed} 、基底层声速 c_{sub} 和基底层密度 ρ_{sub} . 遗传算法每代人口数为100, 共遗传100代, 且通过多次平行计算确保算法收敛于全局最优值. 在得到海底密度和声速之后, 结合随距离变化的声传播损失, 从而反演出海底衰减系数.

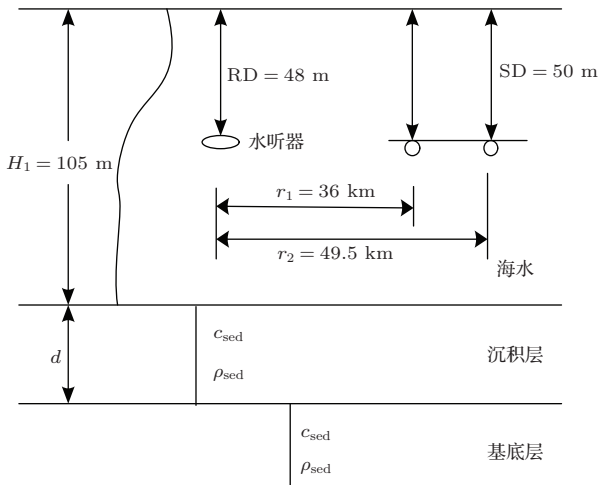


图7 两层海底模型

Fig. 7. Two layered bottom model.

4 海底参数的反演结果和反演验证

4.1 海底参数的反演结果

运用基于不同距离上相同声源的模态频散时间差进行海底参数反演的方法, 得出在相应实验海区的反演结果如表1所示.

表1 参数空间及反演结果

Table 1. Parameters space and inversion results.

反演参数	参数标识	下边界	上边界	反演结果
沉积层厚度/m	d	0.5	40	13.875
沉积层声速/(m/s)	c_{sed}	1550	1800	1578.6
沉积层密度/(g/cm ³)	ρ_{sed}	1.5	2.0	1.6014
基底层声速/(m/s)	c_{sub}	1700	2000	1716.2
基底层密度/(g/cm ³)	ρ_{sub}	1.7	2.4	2.1836

将得到的反演结果代入模型进行计算, 图8为由爆炸声源提取的模态时间差和由模型计算得到的模态时间差对比图.

从图8可以看出, 根据反演结果代入模型计算的前4阶简正波到达时间差与实验结果在大部分频率上都符合的很好, 只有少数频点出现了偏离, 所以将反演结果作为参数最优值比较可信.

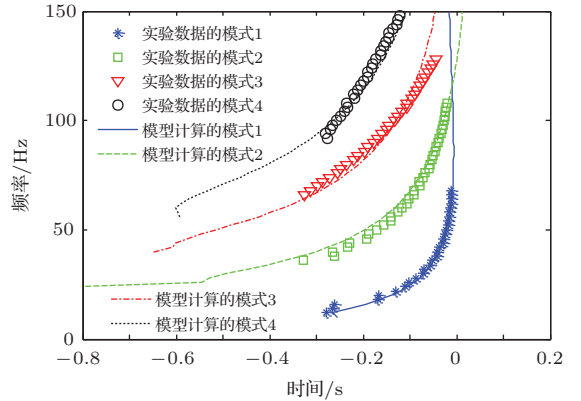


图8 (网刊彩色) 两个爆炸声源的模态频散时间差

Fig. 8. (color online) The extracted model dispersion curves time difference of two explosive signals.

将表1中反演出的海底密度和声速等参数代入(15)式, 由传播损失的标准偏差可反演出海底衰减系数 α . 在反演沉积层衰减系数时, 由海水引起的海水吸收损失也考虑进去, 一个近似的与频率有关的海水吸收系数 α' 为^[13]

$$\alpha' \approx 3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3.0 \times 10^{-4}f^2 \quad [\text{dB/km}], \quad (17)$$

其中, 频率 f 的单位为kHz. 反演时令基底的衰减等于沉积层的衰减, 计算出在同一频率下不同接收深度和不同接收距离时所对应的传播损失实验值与计算值相比较, 得出此频率下的海底衰减系数, 通过变换频率值得出海底衰减系数随频率的变化关系. 反演结果见表2. 文献^[19—21]指出, 海底衰减和频率成指数关系, 所以对反演结果进行指数拟合可得海底衰减和频率的关系为

$$\alpha = 0.0785f^{1.0542}, \quad (18)$$

其中, 频率 f 的单位为kHz. 图9给出了根据不同频率实验信号反演所得的不同频率所对应的海底衰减.

表2 海底衰减系数反演结果

Table 2. The inversion result of attenuation coefficient of sediment.

频率/kHz	0.1	0.125	0.16	0.2	0.25	0.315
α /(dB/ λ)	0.08	0.09	0.11	0.12	0.13	0.15

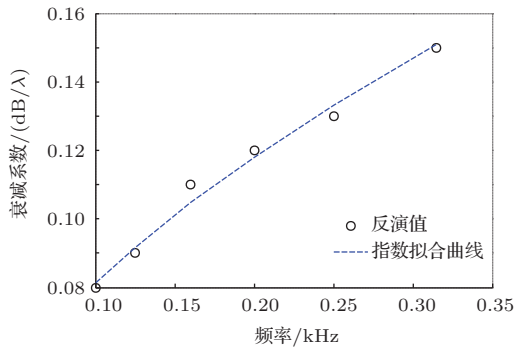


图9 不同频率下反演得到的海底衰减系数

Fig. 9. Inversed attenuation coefficient at different frequencies.

4.2 海底参数的反演结果验证

检验反演结果的有效性是反演过程中最关键的环节, 最直接的检验方法是将反演值与海底采样值进行比较, 但是在没有进行海底采样的情况下, 用统计的方法来描述反演结果是对其进行可靠性分析的有效工具, 其中后验概率分析是对反演结果在搜索空间中的分布进行概率统计, 从而确定反演算法及反演结果的有效性^[11,12]. 不仅如此, 如果将本组爆炸声源的反演结果用于测线上另一组爆炸声源时仍然有效, 也说明了反演结果的有效性.

为了得到反演结果的后验概率分布, 在求解代价函数(14)式的过程中, 搜索空间的所有采样值 G_k 及其目标函数值 $\phi'(G_k)$ 被保存下来, 从而构成模型向量的采样空间 Ω , 对反演结果在采样空间 Ω 中的分布进行概率统计, 将采样值按照其所对应代价函数的大小进行重排, 并按照 Boltzmann 分布进行加权, 从而得到反演结果的第 k 组向量的后验概率分布^[11]为

$$\sigma(G_k) = \frac{\exp[-\phi'(G_k)/T]}{\sum_{k=1}^{N_{\text{obs}}} \exp[-\phi'(G_k)/T]}, \quad (19)$$

其中, N_{obs} 是遗传算法迭代过程中, 保存下来的模型向量的个数, T 是温度控制参数. 文献^[11]中指出, 温度控制参数 T 取反演过程中 50 个最佳代价函数的均值比较合适. 则参数向量 G 的第 i 个参数值为 κ 时的边缘概率分布为

$$\sigma^i(G^i = \kappa) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{obs}}} \exp[-\phi'(G_k)/T] \delta(G_k^i = \kappa)}{\sum_{k=1}^{N_{\text{obs}}} \exp[-\phi'(G_k)/T]}. \quad (20)$$

利用边缘概率分布判断反演结果好坏是一种很重要且有效的手段. 图 10 为反演参数的边缘概率密度分布图, 其中向上的箭头所示位置表示反演目标函数最小值所对应的参考值.

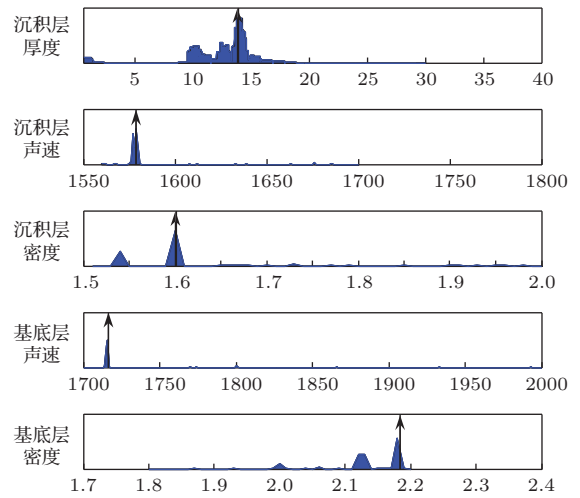


图 10 反演参数的边缘概率分布

Fig. 10. The marginal probability distribution of inversion parameters.

从图 10 可以看出, 本反演方法对沉积层和基层层声速的敏感性较强, 其后验概率比较集中; 对沉积层厚度、沉积层密度和基层层密度敏感性较差, 其后验概率密度比较分散. 根据代价函数对各个参数敏感性的不同, 可以认为反演出的海底声速的可信度最高.

为了进一步检验反演结果的有效性, 将本组反演结果用于另一组信号源时仍然有效^[22], 则从另一方面验证了反演结果的正确性. 首先将反演出的海底声速和密度等参数代入模型计算距离分别为 $r_1 = 40$ km 和 $r_2 = 53.8$ km 上两个爆炸声源的模态频散时间差; 其次, 将反演的衰减系数代入模型计算不同深度不同频率下的传播损失. 图 11 为模型计算的模态频散时间差和实验测量的模态频散时间差对比图, 由图可知, 将反演结果代入模型计算不同距离上爆炸声源模态频散时间差时, 实测的前 4 阶模态频散时间差和模型计算值在大部分频点上符合程度较好, 说明反演出的海底密度声速等参数比较可靠. 图 12(a) 为深度 32 m, 频率 100 Hz 的传播损失对比图; 图 12(b) 为深度 64 m, 频率 250 Hz 的传播损失对比图. 由图 12 可知, 根据反演值计算不同接收深度、不同频率上的传播损失和实测值比较一致, 说明了反演出的海底衰减系数的可靠性.

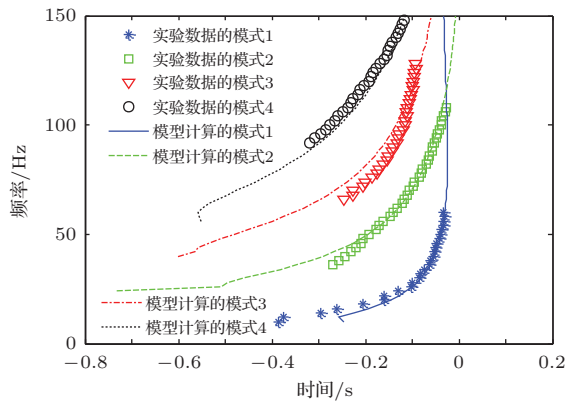


图 11 (网刊彩色) 不同距离上的两个爆炸声源的模态频散时间差

Fig. 11. (color online) The extracted model dispersion curves time difference of two explosive signals at different distance.

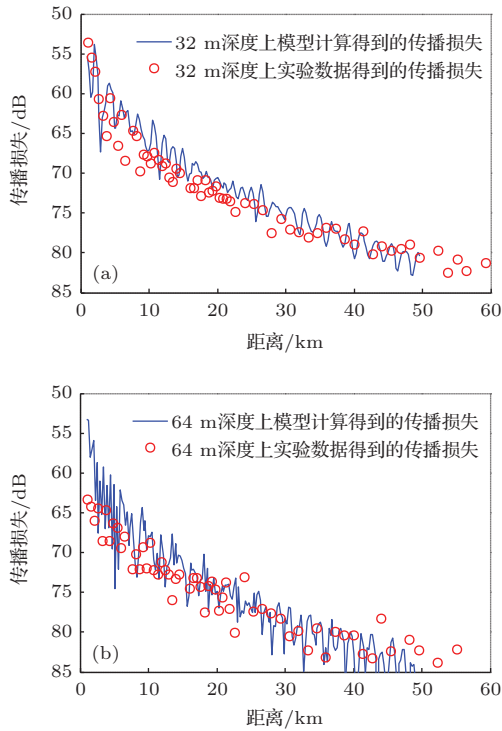


图 12 实测和模型计算的传播损失对比 (a) 32 m, 100 Hz; (b) 64 m, 250 Hz

Fig. 12. Comparison of the numerical TL and experimental TL: (a) 32 m, 100 Hz; (b) 64 m, 250 Hz.

5 结 论

本文研究了利用单个宽带声源进行海底参数反演时存在随着距离的增大, 误差变大的缺点, 提出利用 warping 变换提取出测线上两个不同距离的爆炸声源的模态频散时间差反演海底密度和声速等参数的方法, 克服了单个爆炸声源反演的缺点. 运用假设的海底模型反演得到的海底声速和密度

等参数不但用于本组爆炸声源时, 实测模态频散时间差和模型计算模态频散时间差符合程度较好, 用于不同距离上另一组爆炸声源时仍然比较符合, 并且各反演参数的边缘概率密度函数集中在反演结果附近, 说明此方法反演出的海底声速和密度等参数比较有效. 通过计算随距离变化的传播损失反演得到海底衰减系数与频率成指数关系; 而对海底衰减系数验证时, 得到在不同频率、不同深度上传播损失的实测值和模型计算值比较一致, 说明反演出的海底衰减系数比较有效.

本文反演过程中, 实验海区的海底地形和声速剖面变化不大, 对于海底地形和声速剖面变化大的情况, 如何准确提取爆炸声源的频散曲线是下一步需要研究的工作.

参考文献

- [1] Duan R, Yang K D, Ma Y L, Lei B 2012 *Chin Phys. B* **21** 124301
- [2] Gac J L, Asch M, Stephan Y, Demoulin X 2003 *IEEE J. Oceanic Engineer.* **28** 479
- [3] Qi Y B, Zhou S H, Zhang R H, Zhang B, Ren Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044303 (in Chinese) [戚聿波, 周士弘, 张仁和, 张波, 任云 2014 物理学报 **63** 044303]
- [4] Baraniuk R, Jones D 1995 *IEEE Trans. Signal Proc.* **43** 2269
- [5] Bonnel J, Nicolas B, Mars J I, Walker S C 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 719
- [6] Bonnel J, Chapman N 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** EL101
- [7] Lu L C, Ma L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024305 (in Chinese) [鹿力成, 马力 2015 物理学报 **64** 024305]
- [8] Li Z L, Zhang R H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 471
- [9] Li Z L, Yan J, Li F H, Guo L H 2002 *Acta Acoust.* **27** 487 (in Chinese) [李整林, 鄢锦, 李风华, 郭良浩 2002 声学学报 **27** 487]
- [10] Zhang X L, Li Z L, Huang X D 2009 *Acta Acoust.* **34** 54 (in Chinese) [张学磊, 李整林, 黄晓砥 2009 声学学报 **34** 54]
- [11] Gerstoft P 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **95** 770
- [12] Gerstoft P, Mechlenbrauker C F 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **104** 808
- [13] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2000 *Computational Ocean Acoustics* (Vol. 2) (New York: American Institute of Physics) p67
- [14] Tolstoy I, Clay C 1987 *Theory and Experiment in Underwater Sound* (Vol. 2) (New York: Acoustical Society of American)
- [15] Duda R O, Hart P E 1972 *Commun. ACM* **15** 11
- [16] Fernandes L A F, Oliveira M M 2008 *PRR* **41** 299
- [17] Yang K D, Ma Y L, Sun C, Miller J H, Potty G R 2004 *IEEE J. Oceanic Engineer.* **29** 964

- [18] Juan Z, Chapman N, Bonnel J 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 394
- [19] Hamilton E L 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **68** 1313
- [20] Zhou J X, Zhang X Z, Rogers P H, Jarzynski J 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 2068
- [21] Stall R D, Houtz R E 1983 *J. Acoust. Soc. Am.* **73** 163
- [22] Zhang T W, Yang K D, Ma Y L, Li X G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3294 (in Chinese) [张同伟, 杨坤德, 马远良, 黎雪刚 2010 物理学报 **59** 3294]

A far distance wideband geoacoustic parameter inversion method based on a modal dispersion curve*

Guo Xiao-Le Yang Kun-De[†] Ma Yuan-Liang

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 9 January 2015; revised manuscript received 13 April 2015)

Abstract

Acoustic propagation in shallow water is greatly influenced by the properties of the sea bottom. The dispersion characteristics of modes are relatively sensitive to the bottom parameters and have been used to invert the bottom parameters. Since the inversion error using a single wideband sound source increases with increasing range, a far distance inversion method based on the modal dispersion curve using a single hydrophone with two wideband sound sources is presented in this paper, in which a warping transform is applied so that it can accurately extract the modal dispersion curve from the warped signal spectrum. Experimental data used for the inversion are acquired using a hydrophone of vertical array in the South Sea of China during the Autumn in 2012. The transmitted signals are explosive signals, and the bottom sound speed and density are inverted by matching the theoretical arrival time differences of various modes and frequencies with those calculated using the experimental data. The attenuation coefficient is deduced using the transmission loss data recorded in the experiment. A genetic algorithm (GA) is used for optimization search for the parameter bounds. Inversion results demonstrate that the arrival time difference when using the bottom sound speed and density show a high consistency with those obtained using the experimental data. Moreover, the attenuation coefficient is nonlinear over the frequency band from 100 to 315 Hz. The validity of inverted parameters is evaluated by the posteriori probability distributions, and the numerical results of arrival time differences calculated using the inverted sound speed and density are in good agreement with those extracted from the other two wideband explosive signals at different distances. In addition, the theoretical transmission loss calculated using the inverted attenuation coefficient matches the experiment data very well. It is shown that the inversion scheme can provide a valid and stable environmental estimation.

Keywords: geoacoustic inversion, two wideband explosive signals, modal dispersion, transmission loss

PACS: 43.30.+m, 92.10.Vz

DOI: 10.7498/aps.64.174302

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174235), and the Fundamental Research Funds for the central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 3102014JC02010301).

† Corresponding author. E-mail: ykdzym@nwpu.edu.cn