

利用多角度海底反向散射信号进行地声参数估计*

周天[†] 李海森 朱建军 魏玉阔

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2013年9月22日收到; 2013年12月12日收到修改稿)

针对现有海底地声参数估计方法的不足, 提出了利用相控参量阵浅地层剖面仪接收的多角度海底反向散射信号进行地声参数估计的方法. 首先利用正下方和斜入射方向上沉积层上、下表面的差频反向散射信号进行沉积层厚度和声速估计, 然后利用正下方沉积层上、下表面两个不同频率的差频信号的反向散射信号估计沉积层衰减系数, 最后利用正下方沉积层上表面原频反向散射信号估计沉积层阻抗, 计算沉积层密度从而解决和声速的耦合性. 通过水池试验验证了该方法的有效性.

关键词: 地声参数估计, 反向散射信号, 多角度, 参量阵

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Ma, 43.25.Lj, 43.60.Pt

DOI: 10.7498/aps.63.084302

1 引言

海底沉积层的声速、密度、衰减系数以及厚度等地声参数是海底资源考察和科学研究的基础, 通过对海底沉积物结构和分布状况的探测与分析, 可为海底资源开发、水下工程选址、港口建设及日常维护等提供直观的信息^[1]. 因为遥感测量的效率要远远高于原位测量方法, 现阶段国内外对海底特性信息探测主要是以水声方法为主、原位测量为辅的手段, 已经有若干水声方法用于反演地声参数, 如匹配场反演^[2-4]、传播损失反演^[5]、海底反射损失反演^[6]、模式幅度反演^[7]、局部海底高分辨反演^[8]以及基于多波束、侧扫、浅地层剖面仪等探测声纳(或者其组合)进行地声参数反演^[9-11]等.

从性能上来讲, 每种反演方法都有其优点和缺点, 匹配场反演的优点在于其能够对大区域地声参数进行反演, 但其缺点是其反演结果可能存在多解, 并且只能反映水体和海底空间变化环境的平均效果, 对海底密度和衰减系数的敏感性较小; 基于复杂的Biot模型和浅地层剖面仪垂直反向散射数

据, Schock^[10]提出了一种反演海底物理和声学参数的方法, 计算过程复杂; 基于海底反射损失的反演方法, 可以高分辨地反演局部海底的分层厚度、密度和声速, 但对海底衰减系数不敏感; 局部海底高分辨反演方法在不同深度上布放声源, 并采用垂直阵接收, 完成短距离上的海底参数反演, 但反演效率相对较低; 现有的基于单独地形探测声纳或浅地层剖面探测声纳反演的方法虽然直观, 但获取的地声参数不够丰富, 而多种声纳探测信息的融合利用则增加了反演的复杂性.

从获取声学数据的途径上来讲, 这些方法大致分为两类: 一类是发、收换能器分点布置, 利用反射信号; 另一类是发、收换能器共点布置, 利用反向散射信号. 前一类方法需要将发射声源和接收阵远距离布放, 接收阵常采用垂直阵或水平阵, 甚至是掩埋阵^[12], 发射声源一般在深度方向上可调, 甚至需要搭载载体大范围运动^[13], 虽然可能获得大海底区域的地声参数, 但这类方法不便于工程实施, 并且难以快速获取地声参数的高分辨估计; 后一类方法一般采用收发共点的声纳设备, 如测深声纳、侧扫声纳、浅地层剖面仪等, 这类方法由于获取声学

* 国家自然科学基金(批准号: 41006057, 41376103, 41327004, 41306182)和中央高校基本科研业务费(批准号: HEUCF130501)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhoutian@hrbeu.edu.cn

数据位置明确、直接快速, 因此成为近年来的研究方向之一. 在这些声纳设备中, 浅地层剖面仪不仅可以获取沉积层表面信息, 而且也常用于探测海底第一个浅地层^[14]. Schock^[10] 和 Theuillon 等^[14] 分别利用了基于常规换能器的单波束浅地层剖面仪和多波束浅地层剖面仪反演了沉积层阻抗, 但没有解决沉积层厚度和声速的耦合性.

本文提出基于相控参量阵浅地层剖面仪, 利用不同角度上沉积层上、下界面的原频及差频反向散射信号对海底地声参数估计. 具体过程是: 首先利用正下方和斜入射方向上沉积层上、下表面的差频反向散射信号进行沉积层厚度和声速估计, 然后利用正下方沉积层上、下表面两个不同频率的差频信号的反向散射信号估计沉积层衰减系数, 最后利用正下方沉积层上表面原频反向散射信号估计沉积层阻抗, 计算沉积层密度从而解决与声速的耦合性. 与现有的同类方法相比^[10,14], 本文提出的方法能够解决沉积层厚度与声速的耦合性, 从而估计沉积层厚度信息, 更有效地获取沉积层的地声特性.

本文第 2 部分对所提方法的原理进行分析说明并给出相关表达式; 第 3 部分介绍了为验证该方法所开展的水池试验情况, 并采取将利用本方法处理试验数据的结果和参考值相比较的方式验证所提方法的有效性; 第 4 部分给出结论和展望.

2 基于反向散射信号的沉积层参数估计方法

本文中利用相控参量阵在水池进行沉积层参数估计试验的几何示意图见图 1 (沉积层假设为一层). 假设一定探测区域内各沉积层厚度相同且各向同性, 各层平行水平分布; 设水体特性参数为深度 h_0 , 密度 ρ_0 , 声速 c_0 , 衰减系数 α_0 , 其中 h_0 可以通过参量阵垂直波束直接测量得出, ρ_0, c_0 也可通过专门测量设备直接获得, α_0 可以通过经验公式估计得到; 沉积层特性参数为厚度 h_s , 密度 ρ_s , 声速 c_s , 衰减系数 α_s , 为待估计量; 池底 (第二沉积层) 特性参数为密度 ρ_b , 声速 c_b , 衰减系数 α_b ; 相控参量阵可以向不同的角度方向相控发射探测波束, 不同的探测波束方向对应了不同的传播斜距和传播损失, 并且对应沉积层内不同的折射角和传播斜距.

下面基于图 1, 对沉积层参数估计方法进行分析和数学推导.

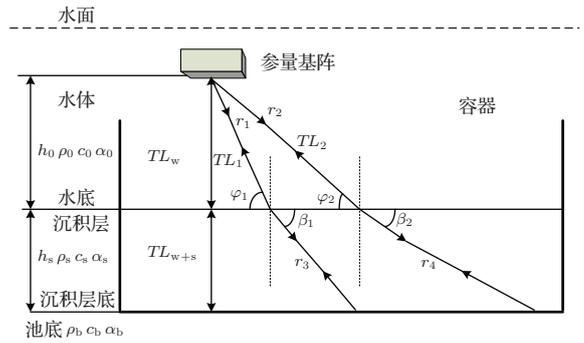


图 1 沉积层参数估计的几何示意图

2.1 沉积层厚度和声速估计

根据图 1 和射线声学理论, 正下方沉积层上、下表面回波时间分别为

$$t_0 = \frac{2h_0}{c_0}, \quad (1)$$

$$t_1 = \frac{2h_0}{c_0} + \frac{2h_s}{c_s}; \quad (2)$$

角度 φ 方向沉积层上、下表面回波时间分别为

$$t_2 = \frac{2h_0}{c_0 \sin \varphi}, \quad (3)$$

$$t_3 = \frac{2h_0}{c_0 \sin \varphi} + \frac{2h_s}{c_s \sin \beta}; \quad (4)$$

得到

$$\sin \beta = \frac{t_1 - t_0}{t_3 - t_2}. \quad (5)$$

掠射角 φ 和折射角 β 服从 Snell 定律: $\cos \varphi / c_0 = \cos \beta / c_s$, 得到沉积层厚度和速度估计的表达式如下:

$$c_s = c_0 \frac{\cos \beta}{\cos \varphi} = c_0 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{t_1 - t_0}{t_3 - t_2}\right)^2}}{\cos \varphi}, \quad (6)$$

$$h_s = \frac{c_s(t_1 - t_0)}{2}, \quad (7)$$

(6) 式中, 相控探测角度 φ 、水中声速 c_0 均为已知, 只需估计垂直方向和 φ 方向沉积层上、下表面回波的到达时间间隔 $t_1 - t_0, t_3 - t_2$ 即可. 从 (6) 和 (7) 式可以看出, 沉积层厚度和声速是独立估计, 因而能够解决二者之间的耦合性. 为了提高估计的精度, 也可以利用多个不同相控角度 φ 上的时间间隔进行最小二乘估计.

2.2 沉积层衰减系数估计

沉积层上表面的反射信号强度可以表示为

$$P_{\text{bottom}} = SL - TL_w - TM_1 - Loss_w, \quad (8)$$

其中, SL 为声源级, TL_w 为垂直入射时水中双程扩展损失, TM_1 为水底反射损失, $Loss_w$ 为水体吸收损失.

沉积层下表面的反射信号强度可以表示为

$$P_{\text{sediment}} = SL - TL_{w+s} - TM_2 - TM_3 - TM_4 - Loss_w - Loss_{\text{sediment}}, \quad (9)$$

其中, TL_{w+s} 为水中和沉积层中的双程扩展损失, $Loss_w$ 为水体吸收损失, $Loss_{\text{sediment}}$ 为沉积层吸收损失. TM_2 和 TM_4 是声波进、出沉积层时的透射损失, TM_3 为沉积层底反向散射损失.

对于频率为 f_1 的探测声波, 水底方向散射信号强度和沉积层底反向散射信号强度之差可以表示为

$$\begin{aligned} P_{f_1} &= P_{\text{bottom}} - P_{\text{sediment}} \\ &= -TL_w - TM_1 + TL_{w+s} + TM_2 \\ &\quad + TM_3 + TM_4 + Loss_{\text{sediment}}. \end{aligned} \quad (10)$$

基于射线声学, 当低频探测信号频率比较接近时, 可以认为传播损失和折射及反射损失不变^[8]. 根据(10)式, 用频率为 f_2 的探测声波进行探测获得 P_{f_2} , 从而得到:

$$\begin{aligned} P_{f_1} - P_{f_2} &= \Delta Loss_{\text{sediment}} \\ &= (R_{f_1} - R_{f_2})\alpha_s, \end{aligned} \quad (11)$$

此处, R_{f_1} 和 R_{f_2} 是沉积层中的声线长度 (λ), α_s 是沉积层衰减系数 (dB/λ). 由(6),(7)式估计出沉积层层厚和声速后, 沉积层中的声线路径长度可以容易得到, 因此上式可以进一步表示为

$$P_{f_1} - P_{f_2} = -\frac{2h_s}{c_s} \Delta f \alpha_s, \quad (12)$$

其中, $\Delta f = f_2 - f_1$. 根据(12)式即可估计沉积层衰减系数.

2.3 沉积层密度估计

文献[8]中采用了反射模型直接估计沉积层密度. 由于目前还缺乏经过理论和大量试验验证的反向散射模型, 难以基于外侧角度的反向散射信号利用类似方法进行了沉积层密度估计. 本文2.1中已经对沉积层声速进行了有效估计, 因此只需再估计出沉积层阻抗, 即可求出沉积层密度.

沉积层密度具体估计过程是利用参量阵发射声源级、传播损失、吸收损失三者关系得到垂直入

射沉积层表面前后的声波强度估计得到反射系数值, 再根据反射系数的定义

$$R = \frac{\rho_s c_s - \rho_0 c_0}{\rho_s c_s + \rho_0 c_0},$$

计算出沉积层阻抗 $\rho_s c_s$ (水体阻抗 $\rho_0 c_0$ 可直接测得), 最后根据(6)式估计出的沉积层声速 c_s , 求出沉积层密度值 ρ_s . 由于参量阵能够同时辐射高频原频信号和低频差频信号, 在估计反射系数时, 可选择这两个不同频率信号中信噪比较高的进行处理.

由2.1—2.3可见, 由沉积层声速 c_s 可以求出沉积层厚度 h_s , 继而求出沉积层吸收系数 α_s , 同时利用 c_s 还可以求出沉积层密度 ρ_s , 因此 c_s 的求解是几种沉积层参数估计的出发点. 根据(6)式, c_s 取决于水中声速 c_0 、相控角度 φ 以及界面回波时间. 其中, c_0 可由声速仪高精度测得, 相控角度可由声纳发射波束形成技术准确控制, 界面回波时间估计是关键, 其精度主要取决于发射波束在界面上的足印大小 (近似表示为 $H \tan \theta_{-3\text{dB}}$, H 为声纳换能器表面到界面的高度, $\theta_{-3\text{dB}}$ 为接收波束宽度), 在垂直入射附近区域, WMT (weighed mean time) 算法是一种在多波束测深系统中已得到充分验证的界面回波时间高精度估计方法, 本文后续试验数据处理也采用这种方法. 另外, 在 α_s 和 ρ_s 的求解中, 需要利用发射及接收信号的源级, 因此还需要对所用参量阵及原频接收换能器的声学参数进行准确测量.

3 水池试验验证

3.1 水池试验布局

试验在四壁消声的水池内进行, 坐底的吨袋内装有用 2 mm 孔径的筛网筛出的粗沙, 沙子厚度可根据需要进行调整. 浅地层剖面仪采用了 SES2000 标准型, 试验前需要测量其在所关注频点上的发射声源级. SES2000 采用参量阵技术, 可以相控发射不同方向上的探测波束. 由于 SES2000 只处理接收回波中的差频低频信号, 而本文还要对原频高频信号进行处理, 因此试验中还采用了 B&K 公司的 8103 高频水听器接收原频高频信号, 试验前需要对 8103 水听器在所关注频点上的接收灵敏度进行校准, 并且利用拓普公司的多通道动态信号测试分析仪对该高频信号进行采集, 采样频率为 500 kHz. 水池试验框图如图 2 所示, 试验现场照片如图 3 所示, 铺设了沙层的吨袋吊放照片如图 4 所示.

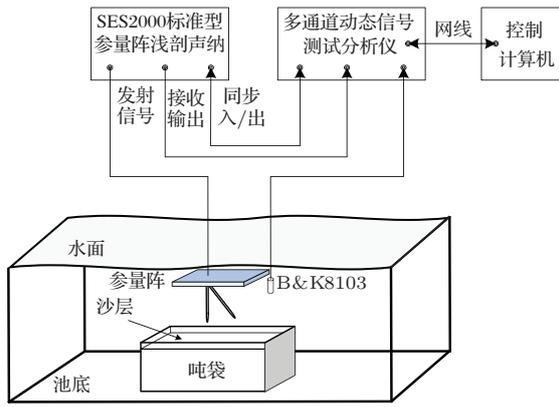


图2 水池试验框图

试验开始时需仔细调整参量阵和吨袋之间的相对位置, 避免吨袋侧壁及四周固定框架对沉积层回波的干扰.

3.2 试验数据处理与验证

3.2.1 估计沉积层厚度和声速

在试验中, 参量阵与沉积层上表面间距为 4 m, 沙层厚度为 62 cm, 相控 SES2000 的探测角度分别为 0° 和 10° , 考虑深度分辨率因素选择脉冲长度为 3 个周期, 采集到的波形如图 5 所示. 图 5 中前面的脉冲波形为同步信号的电串漏. 采用 WMT 算法对沉积层上、下表面的回波时间进行搜索估计并分别求上下幅度窗内信号的平均幅度. 得到 (6) 和 (7)

式中各变量的值分别为

$$t_0 = 0.005475 \text{ s}, \quad t_1 = 0.006153954119662 \text{ s},$$

$$t_2 = 0.005568 \text{ s}, \quad t_3 = 0.006263556018742 \text{ s},$$

利用声速仪测得水中声速 $c_0 = 1474 \text{ m/s}$, $\varphi = 10^\circ$, 则由 (6) 和 (7) 式计算可得沉积层厚度 $h_s = 62.6 \text{ cm}$, 与先验测量值相当; 沉积层声速 $c_s = 1844 \text{ m/s}$, 与经验值 $c_s = 1836 \text{ m/s}$ 接近 [15].



图3 试验系统现场连接图 (a) 干端连接图; (b) 湿端连接图

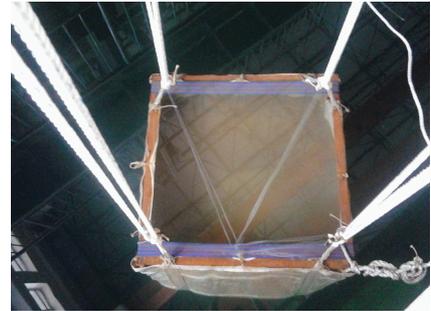


图4 铺设沙层吨袋吊放照片

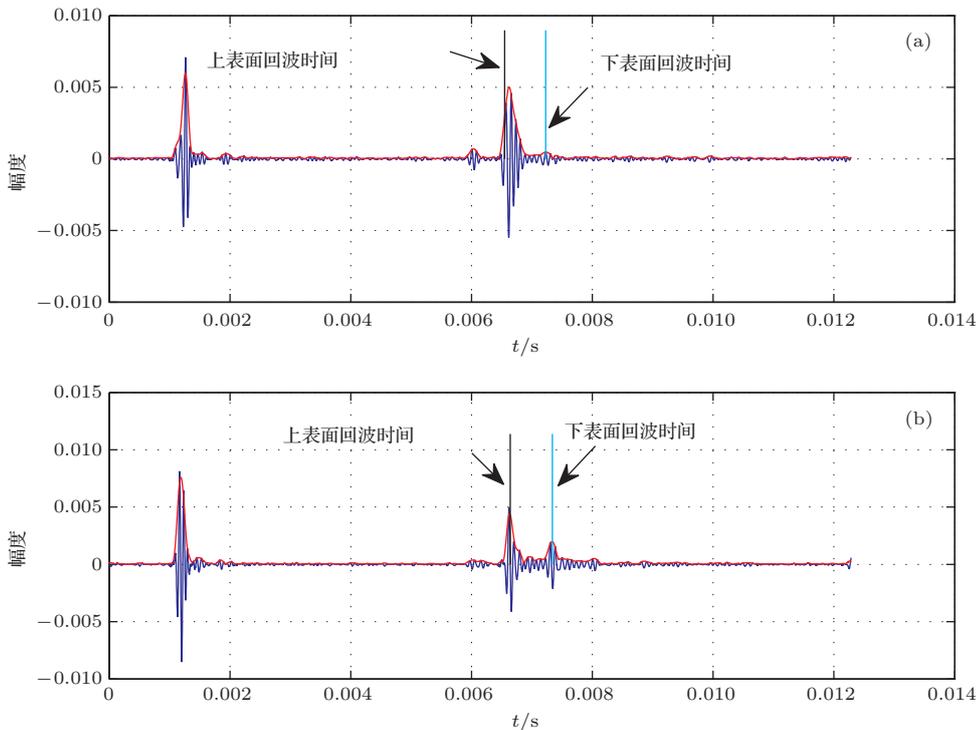


图5 基于 0° 和 10° 方向上回波的沉积层上、下表面回波时间估计 (a) 0° ; (b) 10°

3.2.2 估计沉积层衰减系数

在试验中, 参量阵与沉积层上表面间距为 4 m, 沙层厚度为 62 cm, SES2000 探测角度为 0° , 分别采用 8 和 12 kHz 差频对沉积层进行穿透, 考虑深度分辨率因素选择脉冲长度为 3 个周期, 利用 WMT 对沉积层上、下表面的回波时间进行搜索估计并

分别求上下幅度窗内信号的平均幅度, 分别计算 8 和 12 kHz 的双程传播损失, 然后计算二者双程传播损失之差, 由 (12) 式估计沉积层衰减系数. 试验中共计测量了 10 组数据(图 6 为其中一组数据的处理结果), 做平均后得到沉积层衰减系数 $\alpha_s = 0.843 \text{ dB}/\lambda$. 与 Innomar 公司给出的粗沙衰减系数

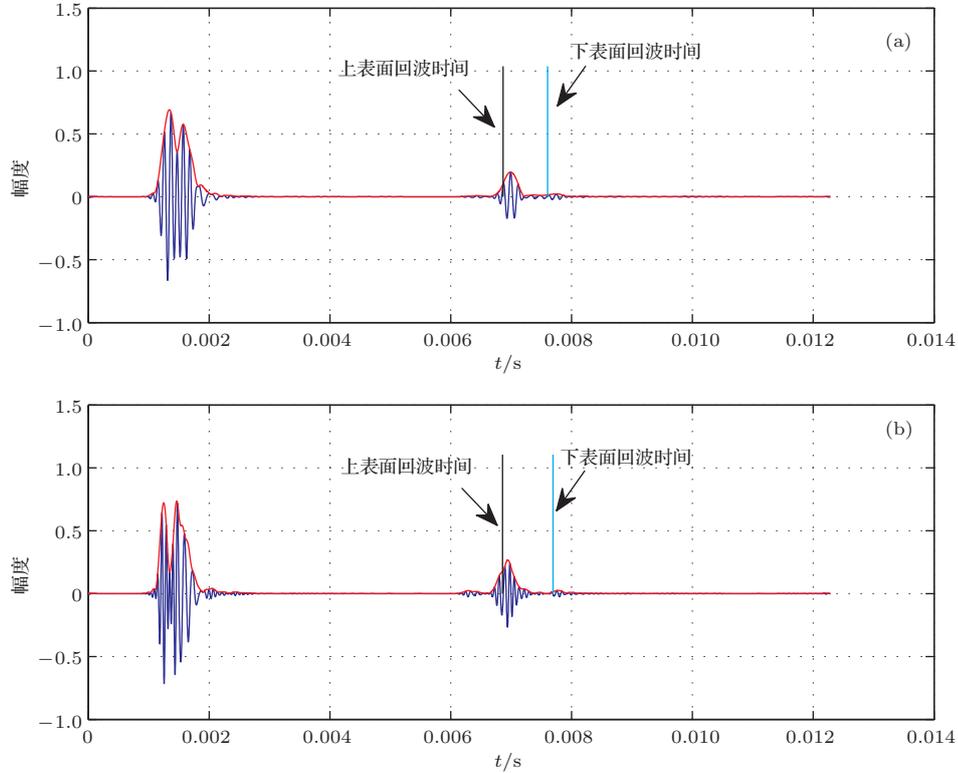


图 6 0° 方向 8 和 12 kHz 差频沉积层上、下表面回波时间估计 (a) 8 kHz; (b) 12 kHz

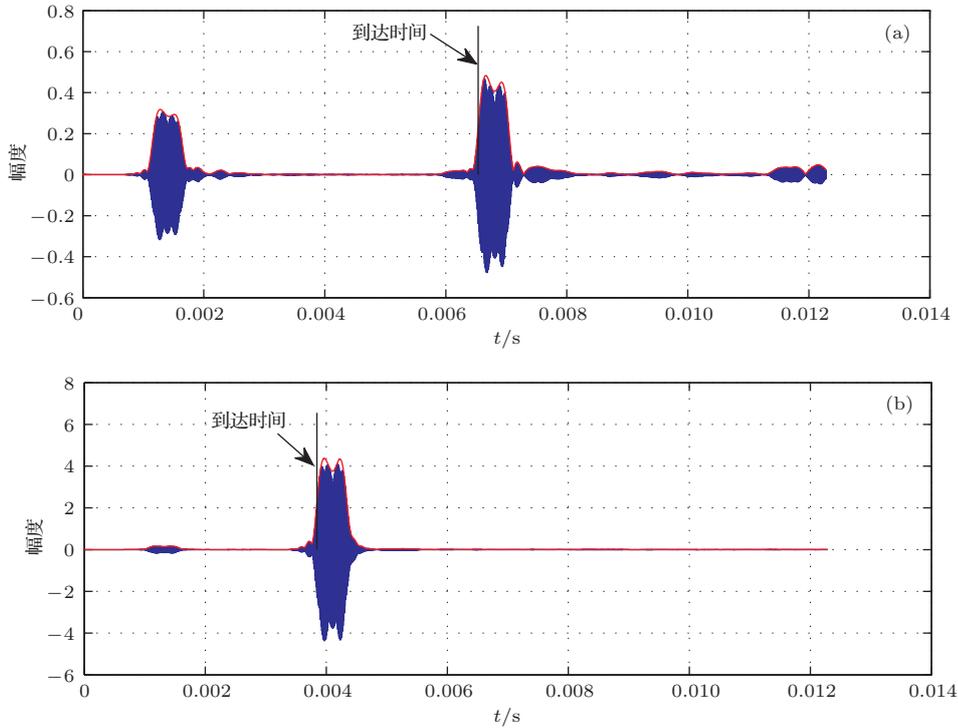


图 7 8103 水听器接收到的沉积层上表面反射信号和直达信号 (a) 反射回波; (b) 入射声波

经验值 $0.9 \text{ dB}/\lambda$ 相当^[16].

为了进一步验证该水池试验环境下的沙层衰减系数, 试验中还进行了比对测量. 将袋子悬空吊放, SES2000 和 8103 水听器分置两侧, 分别测量了空袋和装沙状态下袋子的衰减损失, 得到本试验中所铺设沙层的衰减系数的测量值为 $0.87 \text{ dB}/\lambda$. 通过和实际测量值和经验值的对比验证了估计值的合理性.

3.2.3 估计沉积层密度

在试验中, 参量阵与沉积层上表面间距为 4 m , 沙层厚度为 62 cm , SES2000 探测角度为 0° . 当参量阵产生 8 kHz 差频分量时, 同时还产生了 98 和 106 kHz 原频分量, 本试验中选择 98 kHz 原频分量进行反射系数的估计. 利用 WMT 对 8103 水听器接收到的沉积层上表面的反射回波时间进行搜索估计并分别求幅度窗内信号的平均幅度, 并考虑传播损失和水体衰减损失因素, 将其归算至沉积层上表面处, 同时根据发射声源级推算沉积层上表面处的入射声波幅度(本试验中采取了直接测量直达声幅度的方法, 如图 7 所示), 从而可由反射系数计算公式获得沉积层阻抗 $\rho_s c_s$, 再由前面估计出的沉积层声速值 c_s 可得到最终的沉积层密度 ρ_s . 取水的密度为 $\rho_0 = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 水中声速取实测值 $c_0 = 1474 \text{ m}/\text{s}$, 沉积层声速取估计值 $c_s = 1844 \text{ m}/\text{s}$, 则由试验数据估计出沉积层密度 $\rho_s = 2004.7 \text{ kg}/\text{m}^3$, 与采用量杯和高精度电子称测得的 $1991.7 \text{ kg}/\text{m}^3$ 相当, 也与经验值 $2034 \text{ kg}/\text{m}^3$ 接近^[15].

4 结 论

针对现有海底地声参数估计方法的不足, 提出了利用相控参量阵浅地层剖面仪接收的多角度海底反向散射信号进行地声参数估计的方法. 文中详细分析了该方法的基本原理, 推导了该方法的数学模型, 并有针对性地构建了水池试验系统, 通过试

验数据处理对沉积层声速、厚度、密度以及衰减系数进行了估计, 估计值与先验信息或经验值符合较好, 充分验证了该方法的有效性.

该方法高效直观, 不仅可以用于现有相控参量阵浅地层剖面仪的数据处理功能扩展, 而且为国内的相控参量阵浅地层剖面仪研制提供了理论指导. 下一步的工作是开展海上试验, 进一步验证该方法的鲁棒性.

参考文献

- [1] Grelowska G, Kozaczka E, Kozaczka S, Szymczak W 2012 *11th European Conference on Underwater Acoustics* Edinburgh, UK, July 2–6, 2012 p1446
- [2] Yang K D, Chapman N R, Ma Y L 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 833
- [3] Dettmer J, Dosso S E 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **132** 2239
- [4] Tan B A, Gerstoft P, Yardim C, Hodgkiss S 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 312
- [5] Neumann P, Muncill G 2004 *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** 13
- [6] Dettmer J, Dosso S E, Holland C W 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 161
- [7] Li Z L, Zhang R H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 471
- [8] Yang K D, Ma Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1798 (in Chinese) [杨坤德, 马远良 2009 物理学报 **58** 1798]
- [9] Jiang Y M, Chapman N R 2010 *IEEE J. Oceanic Eng.* **35** 59
- [10] Schock S G 2004 *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** 1200
- [11] Siemes K, Snellen M, Amiri-Simkooei A R, Simons D G, Hermand J P 2010 *IEEE J. Oceanic Eng.* **35** 766
- [12] Hefner B T, Jackson D R, Williams K L, Thorsos E I 2009 *IEEE J. Oceanic Eng.* **34** 372
- [13] Ohta K, Okabe K, Morishita I, Frisk G V, Turgut A 2009 *IEEE J. Oceanic Eng.* **43** 526
- [14] Theuillon G, Stéphan Y, Pacault A 2008 *IEEE J. Oceanic Eng.* **33** 240
- [15] Liu B S, Lei J Y 1993 *Principles of Underwater Acoustics* (Harbin: Harbin Engineering University Press) 77 (in Chinese) [刘伯胜, 雷家煜 1993 水声学原理 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社) 第 77 页]
- [16] Innomar 2009 *Technologie GmbH SES2000 User's Guide* (V 2.8) 2009 181

A geoacoustic estimation scheme based on bottom backscatter signals from multiple angles*

Zhou Tian[†] Li Hai-Sen Zhu Jian-Jun Wei Yu-Kuo

(Acoustic Science and Technology Laboratory, College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(Received 22 September 2013; revised manuscript received 12 December 2013)

Abstract

Aiming at the disadvantages of current methods to estimate sediment geoacoustic parameters, a geoacoustic estimation scheme is presented, in which used are the bottom back reflection signals from multiple angles sampled with a multi-beam parametric array sub-bottom profiler. Firstly, the sediment thickness and sound speed are estimated with difference frequency backscatter signals separately from upper and lower sediment surfaces with vertical and outboard direction. Then, the sediment attenuation coefficient is estimated by use of the two backscatter signals with different difference frequencies from upper and lower sediment surfaces with vertical direction. Finally, the sediment property impedance is estimated with primary frequency backscatter signals from upper sediment surface with vertical direction and followed by the computation of the sediment density, thereby solving its coupling with sound speed. The efficiency is tested through pool experiment.

Keywords: geoacoustic parameters estimation, backscatter signals, multiple angles, parametric array

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Ma, 43.25.Lj, 43.60.Pt

DOI: [10.7498/aps.63.084302](https://doi.org/10.7498/aps.63.084302)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41006057, 41376103, 41327004, 41306182) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. HEUCF130501).

[†] Corresponding author. E-mail: zhoutian@hrbeu.edu.cn