

基于拖曳倾斜线列阵的海底反射损失提取方法^{*}

黎雪刚[†] 杨坤德 张同伟 邱海宾

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2009 年 5 月 13 日收到 2009 年 7 月 2 日收到修改稿)

在浅海环境中,海底声学参数对水下声场的精确预报十分重要.现有的海底声学参数反演方法大多数是采用固定垂直阵进行的,其缺点是不能实施大面积、高分辨的走航式反演.在已提出的垂直阵海底反射损失反演方法的基础上,研究了基于三种线列阵列形的海底反射损失提取方法及其特点,提出了基于拖曳倾斜线列阵与三个声源组合的走航式海底参数快速获取方法,并对该方法进行了误差分析.研究结果表明:覆盖同样的掠射角范围,垂直线列阵需与多个距离的声源组合,拖曳水平线列阵只需一个声源组合但需要采用较大的物理孔径,拖曳倾斜线列阵综合了垂直阵和水平阵的优点,它与三个声源的组合,只需采用较小的物理孔径,就可实现海底声学参数的走航式、高分辨反演.

关键词:水下声场预报,海底声学参数,海底反射损失,拖曳倾斜线列阵

PACC: 4330, 9210V

1. 引 言

浅海中海底作为海洋的一个界面,其地形、结构以及声学物理特性是影响声波传播的重要因素.海底对声波的吸收、散射和反射等声学特性,关系到水声设备作用的远近.快速有效地获取海底声学参数对水下声场的预报^[1]、水下目标的匹配场被动定位^[2]、水声通信^[3]等问题都具有重要意义.

目前已经若有若干方法用于估计海底声学参数,如匹配场反演^[4-7],传播损失与波形匹配反演^[8]模式幅度反演^[9],浅底层剖面声纳反演^[10]等.每种方法都有其优点和缺点.匹配场反演常用于远距离实验数据,反映了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,且反演参数多,存在不唯一性.基于复杂的 Biot 模型和浅底层剖面声纳垂直反射数据, Schock^[10]提出了一种估计海底物理和声学参数的方法,但其需要估计 Biot 模型的 13 个参数,过程复杂.文献 11, 12 采用拖曳声源和固定的接收点,通过提取海底反射损失曲线来反演海底参数,可以较好地估计海底表层

的声速和密度,但其缺点是声源拖曳在离海面几十厘米的位置,海浪起伏影响较大,且由于声源距离不断变化和声速剖面波动,提取的海底反射损失波动较大.

上述方法主要以固定的基阵来接收水声数据,不便实现大面积海底的走航式反演.尽管国外近年来开展了基于拖曳水平线列阵的海底环境参数匹配场反演^[13],但其需要很大的水平物理孔径.本文提出了基于拖曳倾斜线列阵的海底反射损失提取方法,通过获得海底反射损失随频率、掠射角的变化关系,利用文献 14 提出的方法,可以反演获得主要的海底声学参数,如密度、声速、海底分层厚度、海底衰减系数等.

利用较小物理孔径的拖曳倾斜线列阵与多个声源组合,来实现走航式、高分辨的海底参数快速获取,具有迫切的应用需求,国内外在这一方面的研究还未见报道.

2. 海底反射损失的计算

经过一次海底反射后到达波的声压幅度 P_{r1}

^{*} 国家自然科学基金(批准号:30774119)教育部新世纪优秀人才支持计划,陕西省自然科学基金(批准号: SJ08F07),声场声信息国家重点实验室基金和西北工业大学基础研究基金资助的课题.

[†] E-mail: xuegang608@126.com

满足

$$20\log Pr_1 = 20\log Ps - RL - 20\log r_1 - \alpha \cdot r_1 \times 10^{-3}, \quad (1)$$

其中 RL 为海底反射损失, Ps 为声源级声压幅度, r_1 (m) 为一次海底反射声波传播的距离, 吸收系数 α

$$= \frac{0.102f^2}{1+f^2} + \frac{40.7f^2}{4100+f^2} \text{ (dB/km)}, f \text{ (kHz) 为发射信号$$

频率

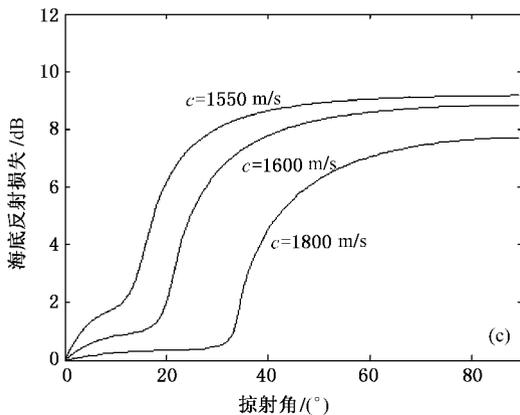
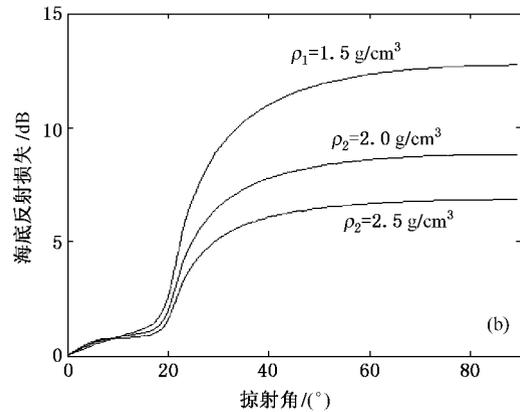
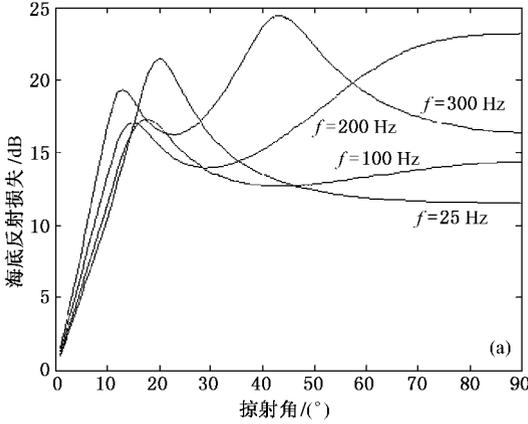


图 1 海底反射损失曲线 (a) 频率敏感性曲线 (b) 密度敏感性曲线 (c) 声速敏感性曲线

直达波的声压幅度 Pr_2 满足

$$20\log Pr_2 = 20\log Ps - 20\log r_2 - \alpha \cdot r_2 \times 10^{-3}, \quad (2)$$

其中 Ps 为声源级声压幅度, r_2 (m) 为直达波传播距离.

当声源在直达波与海底反射波方向的指向性相同时, 由 (1) 式和 (2) 式可以消去声源级得到海底反射损失的表达式

$$RL = 20\log \frac{Pr_2}{Pr_1} - 20\log \frac{r_1}{r_2} - \alpha(r_1 - r_2) \times 10^{-3}. \quad (3)$$

由 (3) 式知声源级的波动不影响结果. 如果声源在这两个方向的指向性有明显差异, 可以先进行校正, 进而消去声源级的影响.

计算出海底反射损失后, 若能得到海底反射损失随频率、掠射角的变化曲线, 就可以反演出海底声学参数, 如密度、声速、海底分层厚度、海底衰减系数等. 海底反射损失随频率、海底沉积层密度、海水声速和掠射角的变化规律如图 1 所示, 它对描述海底特性十分重要. 图 1 中海水声速为 1500 m/s, 海水密度为 1.0 g/cm³, 图 1(a) 中海底介质分 3 层, 从上往下声速依次为 1.55 m/s, 1.65 m/s 和 1.80 m/s, 衰减系数依次为 0.25 dB/λ, 0.5 dB/λ 和 0.75 dB/λ, 密度依次为 1.5 g/cm³, 2.0 g/cm³ 和 2.1 g/cm³, 图 1(b) 中海底为单层均匀介质 (半无限大空间), 海底速度为 1600 m/s, 衰减系数为 0.5 dB/λ, 密度为 1.0 g/cm³, 图 1(c) 中海底为单层均匀介质, 海底密度 2.0 g/cm³, 压缩波衰减系数为 0.5 dB/λ.

3. 三种阵形获得海底反射损失的仿真

仿真条件 选取夏季典型的声速剖面, 如图 2 所

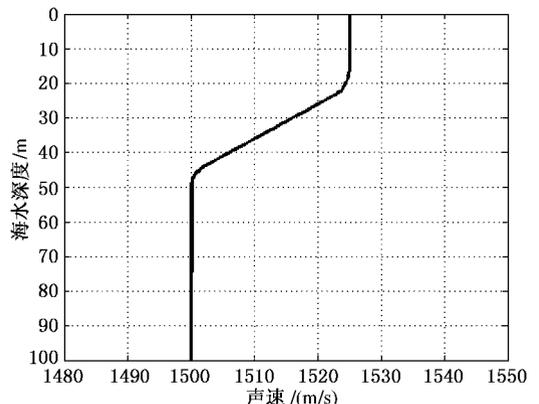


图 2 浅海声速剖面

示.海底为单层均匀介质,发射信号频率为 2000 Hz,海深为 100 m,海底压缩声波速度为 1610 m/s,海底密度为 1.80 g/cm³,海底衰减系数为 0.3 dB/λ,假定多途信号可分辨的时间间隔为 0.5 ms.本文研究方法与海底分层等复杂程度无关,主要目的是要获得较大掠射角范围的海底反射损失曲线.

3.1. 采用垂直线列阵提取海底反射损失

垂直线列阵的仿真示意图如图 3 所示,阵长 80 m,阵元间距 4 m,共 21 个阵元,阵元编号从下至上分别为 1 到 21,1# 和 21# 阵元距离海底和海面均为 10 m.垂直线列阵离声源较近且声源深度较小时,可以获取大掠射角对应的数据;反之离声源较远而且声源深度较大时,可以获取小掠射角对应的数据.通过分析,按照如下四种状态布放声源与垂直阵的位置关系时可以覆盖 7°—70°的掠射角范围.四种状态分别为(D_s, r)=(20 m, 50 m), (80 m, 50 m), (20 m, 300 m)和(80 m, 300 m);其中 D_s 为声源深度, r 为声源离垂直线列阵的水平距离.

由于多径传播的影响,需要去掉那些多径信号的时延间隔太小而无法区分的数据.经处理得到如图 4 所示的多途到达时延图,右端色标颜色表示接收信号幅度的大小(下同),单位为 dB, d 代表直达

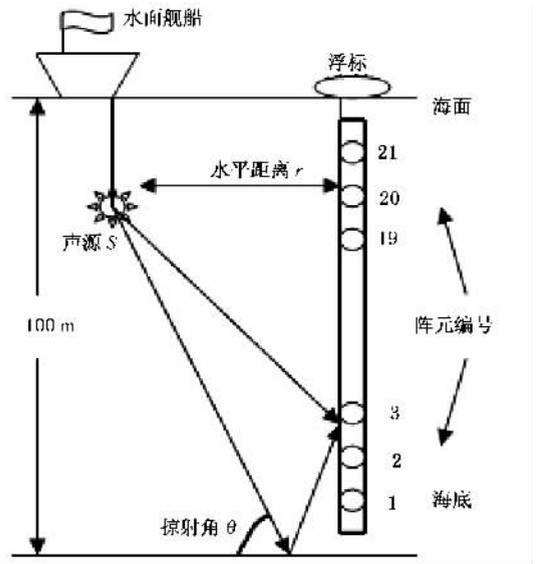


图 3 垂直线列阵的工作示意图

波 s 代表一次海面反射波, b 代表一次海底反射波, sb 代表先经过一次海面反射再经过一次海底反射的声波, bs 代表先经过一次海底反射再经过一次海面反射的声波.由(3)式可知计算海底反射损失用到 b 和 d ,因而要去掉 b 和 d 与其他到达波的时延交叉点.从图 4(a)中可以看出 b 与 s 的时延有交叉,时延间隔太近的点的水听器编号分别为 3, 4, 5.同

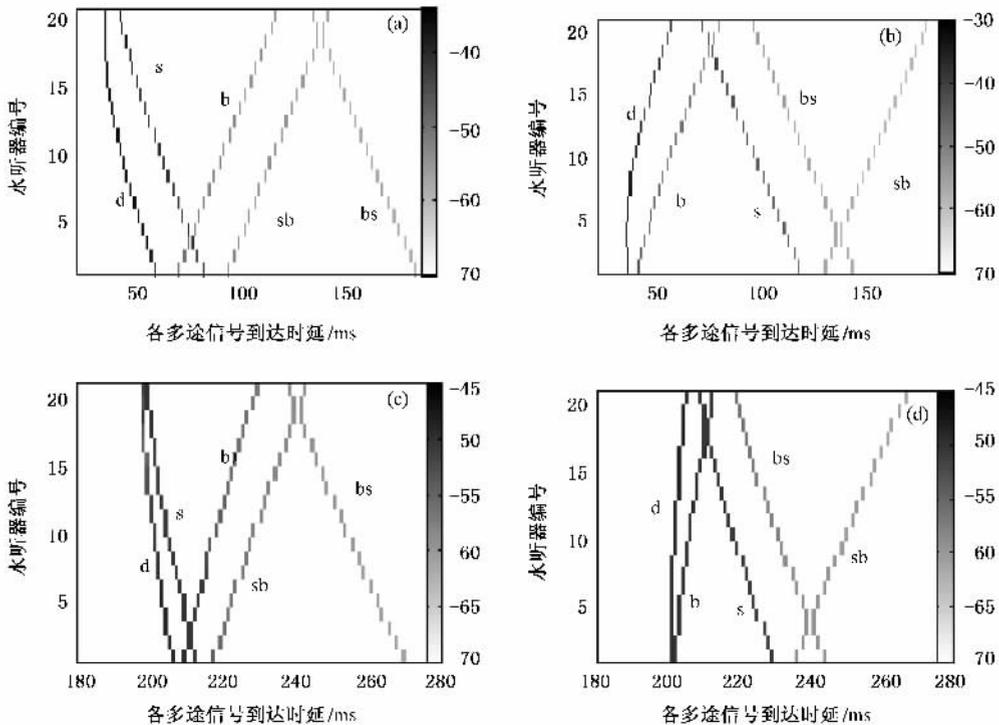


图 4 垂直线列阵的多途到达时延图 (a) $D_s = 20\text{ m}, r = 50\text{ m}$ (b) $D_s = 80\text{ m}, r = 50\text{ m}$ (c) $D_s = 20\text{ m}, r = 300\text{ m}$; (d) $D_s = 80\text{ m}, r = 300\text{ m}$

理 存在时延交叉的阵元编号状态二对应 18,19,20; 状态三对应 2,3,4,19,20,21; 状态四对应 1,2,3,17,18,19, 时延间隔太近的点共有 18 个. 由 (3) 式计算出海底反射损失随掠射角的变化关系如图 5 所示. 其中空心点为时延间隔太小无法区分的点, 实心点为有效数据计算出的可用点, 实际覆盖的掠射角范围为 7° — 73° . 垂直线列阵覆盖了较大的掠射角范围, 但是它需要与多个距离的声源组合, 而且不便于实现走航式海底参数获取.

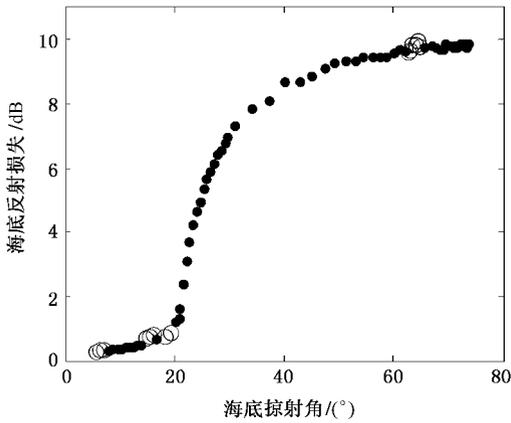


图 5 海底反射损失随掠射角的变化规律 (垂直线列阵)

3.2. 采用水平线列阵提取海底反射损失

拖曳水平线列阵的仿真示意图如图 6 所示, 阵长 300 m, 阵元间距 5 m, 共 61 个阵元, 阵元编号从右至左分别为 1 到 61. 要获取小掠射角的数据, 声源与水平线列阵应靠近海底, 为了防止水平线列阵拖底, 它离海底不能太近; 要获取大掠射角的数据, 声源与水平线列阵最前端 (61# 阵元) 应保持较小的水平距离. 综合分析, 取声源深度 $D_s = 80$ m, 水平阵深度 $D_r = 70$ m, 声源离水平线列阵最前端 (61# 阵元) 的距离 $r = 20$ m 时覆盖的掠射角范围为 7° — 70° .

经计算得到如图 7 (a) 所示的多途到达时延图, 其中 b 与 d 在下端有时延交叉, 对应的水听器编号为 1, 2, 3, 4, 5, 由 (3) 式计算出海底反射损失随掠射角的变化规律如图 7 (b) 所示, 其中空心点为时延间隔太小的点, 实心点为有效数据点, 实际覆盖的掠射角范围为 9° — 64° . 拖曳水平线列阵便于实现走航式海底参数反演, 但是它要求较大的物理孔径 (300 m), 在浅海环境中容易发生拖底的危险.

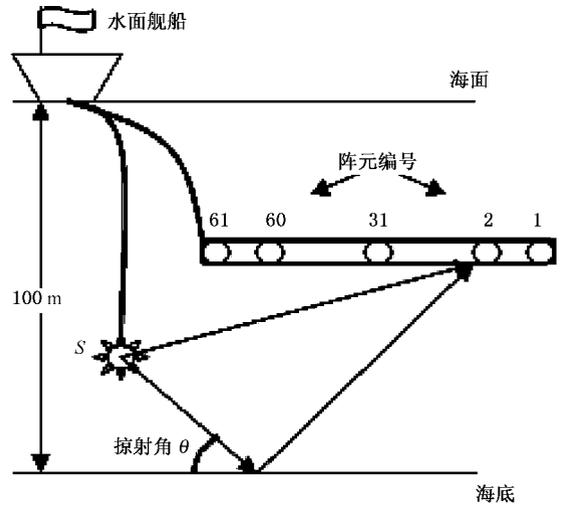


图 6 拖曳水平线列阵的工作示意图

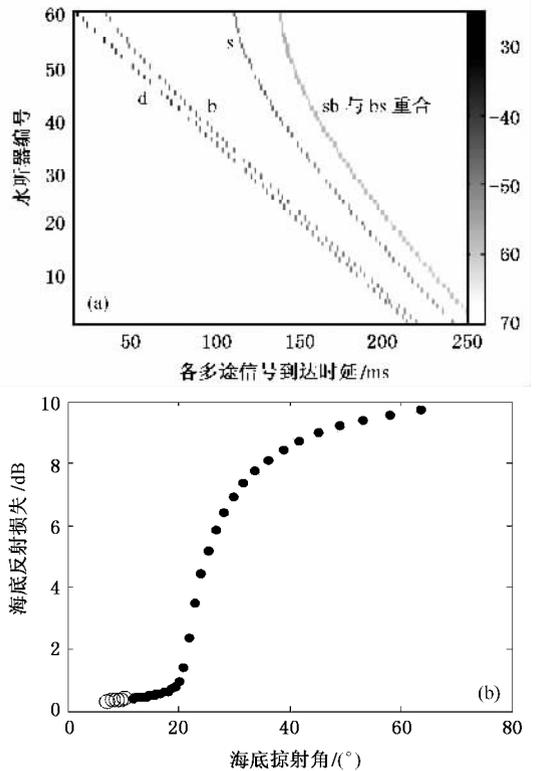


图 7 拖曳水平线列阵的仿真结果 (a) 水平线列阵的多途到达时延图 (b) 海底反射损失随掠射角的变化规律

3.3. 采用倾斜线列阵提取海底反射损失

拖曳倾斜线列阵的工作示意图如图 8 所示, 阵长 153 m, 上下端距离海面海底的距离均为 10 m, 阵元间距 3.8 m, 共 41 个阵元, 阵元编号从下至上分别

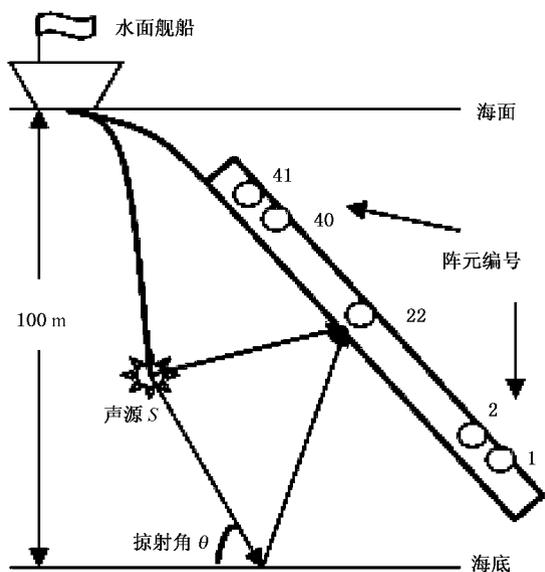


图 8 拖曳倾斜线列阵的工作示意图

为 1 到 41。为了覆盖较大的掠射角范围，声源应该靠近海底且与倾斜阵顶端的水平距离应相对较小。综合考虑取声源深度 $D_s = 90\text{ m}$ ，声源离倾斜阵顶端的水平距离 $r = 30\text{ m}$ 。这种姿态下覆盖的掠射角范围为 $7^\circ\text{—}70^\circ$ 。

对这 41 组数据进行处理得到如图 9(a) 所示的多途到达时延图，b 与 d 和 s 都有时延交叉，且时延间隔太近的点共有 8 个，对应的水听器编号分别为 1 2 3 4 5 35 36 37。由 (3) 式计算出海底反射损失随掠射角的变化关系如图 9(b) 所示，其中空心点为时延间隔太小无法区分的点，实心点为有效数据计算出的可用点，实际覆盖的掠射角范围为 $9^\circ\text{—}70^\circ$ （其中 $53^\circ\text{—}57^\circ$ 为无效数据）。拖曳倾斜线列阵便于实现走航式海底参数获取，它的物理孔径相对于水平线列阵减小了，但仍大于浅海深度，有拖底的危险。

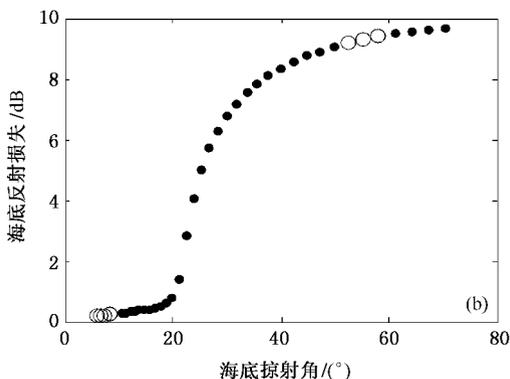
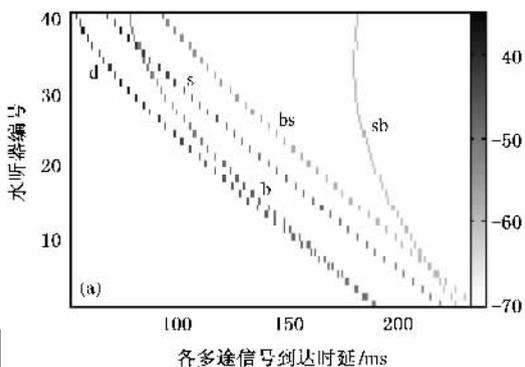


图 9 拖曳倾斜线列阵的仿真结果 (a) 拖曳倾斜线列阵的多途时延图 (b) 海底反射损失随掠射角的变化规律

4. 倾斜线阵与多个声源的组合方法

垂直线阵需要由海面舰船或者浮体悬挂于浅海中，机动性不好，不便于进行海底参数的走航式快速反演，而且需要与多个声源距离组合才能获取较大的掠射角范围。拖曳水平线列阵要覆盖较大的掠射角范围就必须使用较大的物理孔径，这一孔径通常远大于浅海深度。如果拖船突然减速或者停船，拖曳水平线列阵就有拖底的危险。因而提出拖曳倾斜线列阵与多个声源组合的走航式方法。它综合垂直阵和水平阵的优点，采用小孔径（小于浅海深度），实现走航式海底参数快速获取，避免了线列阵容易拖底的危险。

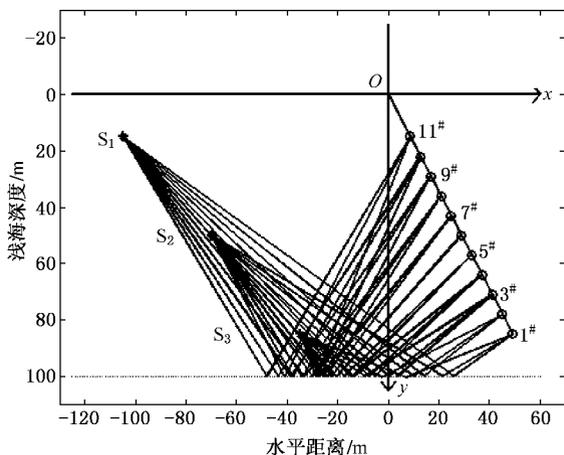


图 10 拖曳倾斜线列阵与三个声源的位置关系

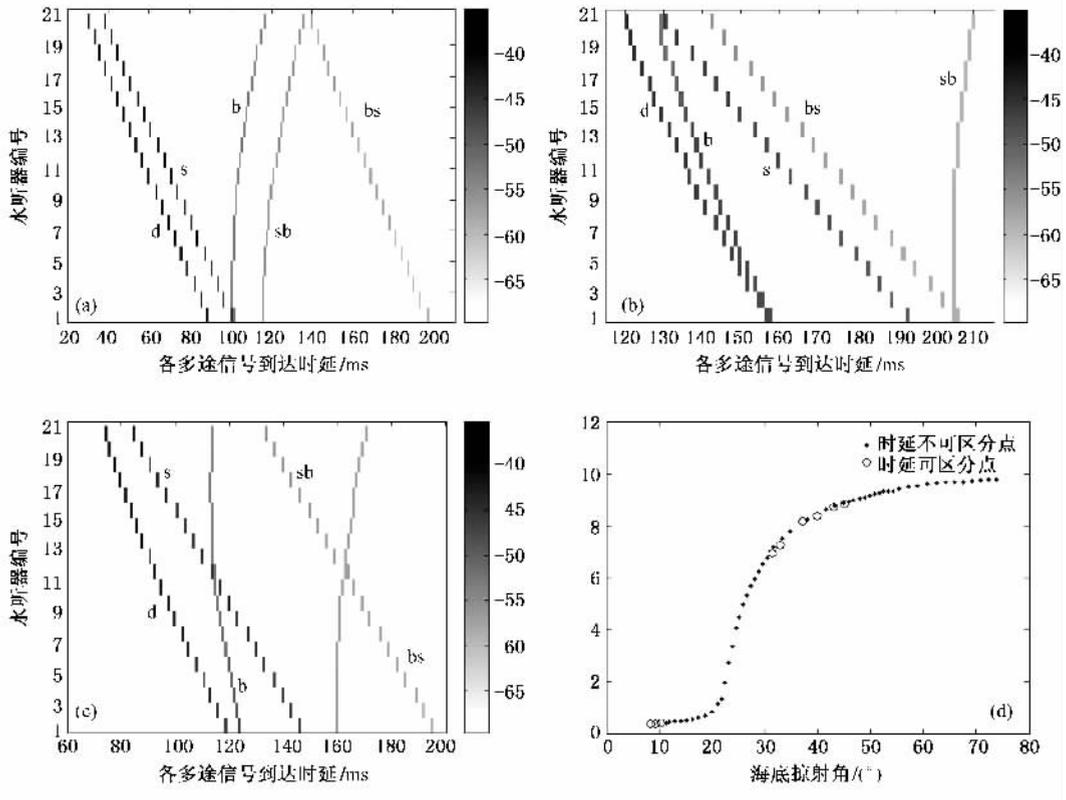


图 12 拖曳倾斜线列阵与三个声源组合的仿真结果 (a)声源 S_1 的多途到达时延图 (b)声源 S_2 的多途到达时延图 (c)声源 S_3 的多途到达时延图 (d)海底反射损失随掠射角的变化规律

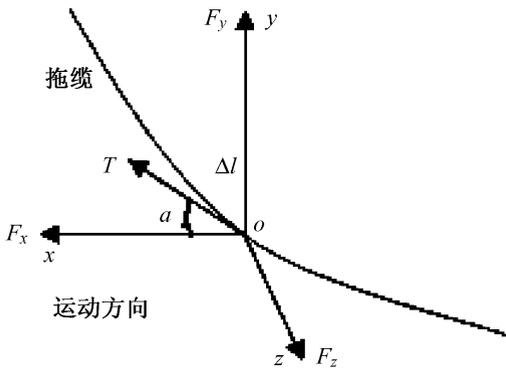


图 13 拖缆在水下的运动姿态

$$x = \frac{T}{r} \left(\frac{1}{\sin a} - \frac{1}{\sin a_0} \right), \quad (4)$$

$$y = \frac{T}{r} \ln \frac{\cot a/2}{\cot a_0/2}, \quad (5)$$

$$l = \frac{T}{r} (\cot a - \cot a_0), \quad (6)$$

其中 T 为拖曳力, r 为单位绳索的阻力, l 为声学模块部分的长度, a 为拖缆水下部分任意一点处切线方向与 x 轴的夹角, a_0 为拖缆在水面处切线方向与

x 轴的夹角, 可以通过航速控制。

在拖缆的声学模块等间隔布放 5 个深度传感器得到 5 个 y 值, 在第 21[#] 阵元处布放一个倾斜传感器可以得到 a_0 的值, 声学模块长度为 l , 代入(5)式和(6)式, 可以解得 5 个深度对应 a 值, 然后由(4)式和(6)式解得对应的 5 个 x 值, 这样就得到了 5 组拖缆的坐标, 然后利用 5 组坐标值拟合出一条曲线即为拖缆在水下的运动姿态, 进而可以得到每个阵元的坐标位置。

假定 5 个深度传感器测得的 y 值分别为 18 m, 34 m, 50 m, 64 m 和 77 m, a_0 值为 65° , 且 $l = 81$ m, 由方程(4)(5)和(6)解得 x 值分别为 8.1 m, 16.5 m, 26.2 m, 38.4 m 和 51.7 m, 采用 2 次曲线拟合得到图 14 中虚线所示的曲线, 即为拖缆的运动姿态。声源为全向声源, 对它的姿态不需严格要求, 对它的坐标位置的确定采取类似的方法求解。

采用拖缆的拟合位置与近似位置计算得到的海底反射损失如图 15 所示, 与拖缆的近似位置相比, 实际位置覆盖的掠射角范围以及掠射角大小均发生了较小变化, 覆盖范围为 $13^\circ\text{—}73^\circ$, 它对进一步反演

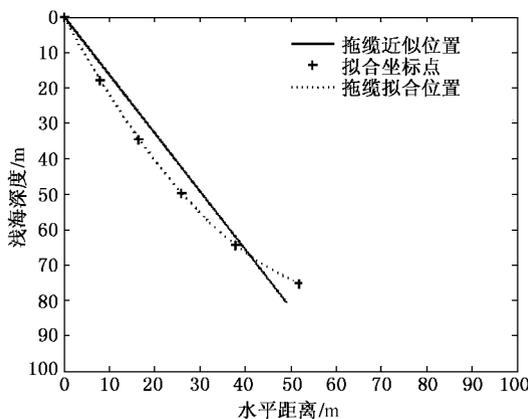


图 14 拖缆的拟合位置与近似位置

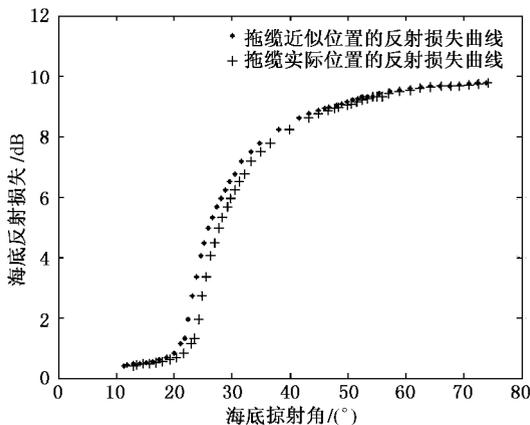


图 15 海底反射损失曲线

海底参数引起的误差不大. 实际建模可以直接采用拟合出的曲线位置, 这样误差就会更小. 解出拖缆的运动方程, 可以大致确定拖缆在 oxy 平面近似为一条悬链线, 当拖缆的密度取得合适时, 悬链线的曲率可以相当大, 这就可能使声学模块近似于一条直线, 在实际操作过程中还可以采用定深拖鱼^[15]来控制

拖缆的姿态. 此外, 对拖缆的姿态有了实时的监测, 就不需将倾斜阵的倾角严格控制在某一固定的角度, 只需控制在一定范围内, 然后根据监测数据进行适当的修正即可.

5. 结 论

垂直线列阵的姿态容易控制, 但它不易实现海底声学参数的走航式快速获取, 而且为了获得较大掠射角范围的海底反射损失, 需要与多个距离或深度位置的声源进行组合. 拖曳水平线列阵容易实现走航式海底参数反演, 但为了覆盖较大掠射角的范围, 它必须有足够大的物理孔径. 在浅海环境中若操作不当, 水平线阵有可能接触海底而损坏. 拖曳倾斜线列阵与多个声源的组合使用, 综合了垂直阵和水平阵的优点. 采用较小的物理孔径, 就能获得较大掠射角范围的海底反射损失, 进而实现海底声学参数的走航式、高分辨快速获取.

由于受到拖船航速、深水流等海洋环境的影响, 拖曳倾斜线列阵的姿态控制起来会相对较难一些, 但可以使用一些高精度传感器控制并记录其姿态, 在反演算法中进行相应的修正. 在实际使用中, 由于浅海环境的深度不同, 倾斜线阵的布放深度与孔径大小, 以及多个声源布放深度的确定, 可以根据本文提出的基本原理进行优化选择. 本文基于射线模型对海底参数反演进行了仿真分析与计算, 进一步的工作是结合实验数据对仿真结论进行验证. 另外, 可以根据具体的反演要求进行带宽的选择, 确定可分离多途信号的时间分辨率, 从而获得一定掠射角范围的海底反射损失曲线.

- [1] Luo W, Schmidt H 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 52
- [2] Skarsoulis E K, Piperakis G S 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 1384
- [3] Yin J W, Hui J Y, Guo L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1753 (in Chinese) [殷敬伟、惠俊英、郭龙祥 2008 物理学报 **57** 1753]
- [4] Gerstoft P, Mecklenbräuker C F 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **104** 808
- [5] Chapman R, Chin-Bing S, King D, Evans R B 2003 *IEEE J. Oceanic Eng.* **28** 320
- [6] Yang K D, Chapman R, Ma Y L 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 833
- [7] Yang K D, Ma Y L, Sun C, Miller J H, Potty G R 2004 *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** 964
- [8] 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]
- [9] Li Z L, Yan J, Li F H, Guo L H 2002 *Acta Acustica* **27** 487 (in Chinese) [李整林、鄢锦、李风华、郭龙浩 2002 声学学报 **27** 487]
- [10] Schock S G 2004 *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** 1200
- [11] Holland C W 2003 **114** 1861
- [12] Dettmer J, Dosso S E, Holland C W 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 3327
- [13] Fallat M R, Nielsen L P, Dosso S E, Siderius M 2005 *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** 198
- [14] 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]

- [15] Li Q H , 2002 *Design principle of digital sonar* (Anhui : Anhui Education Press) p426 (in Chinese) [李启虎 2002 数字式声纳设计原理(安徽 : 安徽教育出版社 第 426 页)]

An extraction method of seabed reflection loss based on towed tilted line array^{*}

Li Xue-Gang[†] Yang Kun-De Zhang Tong-Wei Qiu Hai-Bin
(*College of Marine , Northwestern Polytechnical University , Xi 'an 710072 , China*)
(Received 13 May 2009 ; revised manuscript received 2 July 2009)

Abstract

Seabed acoustic parameters are very important to underwater acoustic field prediction in shallow water. The existing inversion methods generally uses a vertical line array to receive the signal and its platform is stationary , which can not be operated for a large area with high resolution. The methods for extracting seabed reflection losses based on three kinds of line arrays were studied. A fast inversion scheme for the seabed acoustic parameters was presented , which uses a towed tilted line array and three acoustic sources to cover a large scope of grazing angles. The error analysis was made for this method. The simulation results show that different arrays require different experimental configurations to cover the same scope of grazing angles. The vertical line array must operate with several acoustic sources and require a stationary platform of the array. The towed horizontal line array needs only one acoustic source but requires a large-aperture line array. The towed tilted line array combines the merits of the vertical line array and the horizontal line array , which can inverse the seabed acoustic parameters in a moving and high resolution way and requires only a line array of smaller aperture.

Keywords : underwater acoustic field prediction , seabed acoustic parameters , seabed reflection loss , towed tilted line array

PACC : 4330 , 9210V

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10774119) , the Program for New Century Excellent Talents in University , the Natural Science Foundation of Shaanxi Province , China (Grant No. SJ08F07) , the Foundation of National Laboratory of Acoustics , and the NPU Foundation for Fundamental Research.

[†] E-mail : xuegang608@126.com