

# 使用单水听器定位浅水中的脉冲声源

王晋晋<sup>1</sup>, 王大成<sup>1</sup>, 范军<sup>2</sup>, 蔡平<sup>1</sup>, 胡军<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 水声工程研究所, 上海 200240; 3. 65659 部队 74 分队, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:** 针对浅海信道的相干多途结构, 给出了一种利用单水听器通过估计多途时延差来定位脉冲声源的方法。分析了水底和水面声学特性的差别对反射波相位的影响, 利用相位的差别来区分水面反射和水底反射, 解决定位方程中声源位置模糊。使用复数域上的凸集投影方法估计信道中的多途幅度衰减和相位变化, 其分辨率优于传统匹配滤波器, 可以扩展定位方程的应用范围。通过误差传递方程研究了单水听器定位时的误差。对实验数据处理结果表明, 这种定位方法在实际浅海环境中是可行的, 具有成本低廉, 结构简单的优点。

**关键词:** 声学; 单水听器定位; 界面反射; 凸集投影算法; 多途时延估计

**中图分类号:** TB56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2012)09-1131-07

## Impulsive Source Localization in Shallow Water Using Single Hydrophone

WANG Jin-jin<sup>1</sup>, WANG Da-cheng<sup>1</sup>, FAN Jun<sup>2</sup>, CAI Ping<sup>1</sup>, HU Jun<sup>3</sup>

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. Institute of Underwater Acoustic Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Element 74 Unit 65659 of PLA, Jinzhou 121000, Liaoning, China)

**Abstract:** Aimed at coherent multipath structure of the underwater acoustic channel in shallow water, a method of impulsive source localization using a single hydrophone was proposed. The phase change properties of reflected wave at different acoustic interfaces were studied. The difference between surface reflection and bottom reflection was used to solve position ambiguity in the location equation. The estimated resolutions of amplitude attenuation and phase change of the underwater acoustic channel were improved by using projection onto convex sets, compared with match filter. The localization error using single hydrophone was estimated with the error propagation equation. The experiment results show that this method is feasible in shallow water environment, and has the advantages of simple structure and low cost.

**Key words:** acoustics; single hydrophone localization; boundary reflect; projection onto convex sets; multipath time delay estimation

## 0 引言

常规的水声定位系统都是利用声信号到达各水听器基元的时间差或相位差来计算声源位置<sup>[1]</sup>。这种定位方法的理论基础是声传播的自由场模型,

并不考虑界面反射的影响。但浅海中, 海底和海面的界面反射强烈影响声传播, 并形成了明显的相干多途信道, 这种环境下常规定位系统的性能极易受到影响<sup>[2]</sup>。

为了利用信道的多途信息, 许多学者研究了利

收稿日期: 2012-02-02

基金项目: 国家“863”计划项目(2006AA09Z106)

作者简介: 王晋晋(1984—), 男, 博士研究生。E-mail: wangjinjin@hrbeu.edu.cn;

蔡平(1952—), 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: caiping@hrbeu.edu.cn

用声传播模型的定位方法,例如匹配场<sup>[3-4]</sup>和时间反转镜定位<sup>[5-6]</sup>,这些方法使用已知的环境参数来计算声场的空间分布,将计算结果用于处理实际接收信号,达到利用多途信息的目的。在实际应用中,声传播模型的运算量较大,且容易受到环境参数失配的影响。利用单矢量水听器对声压和振速进行相关处理,提取多途信息,也可用于定位声源<sup>[7]</sup>,但由于矢量水听器的工作频率较低,通常为 2 kHz 以下,因此难以对高频声源进行定位。

利用直达波和水面反射以及水底反射的时延差,使用单水听器即可定位水中的哺乳动物<sup>[8-9]</sup>。本文使用这一方法来估算定位系统中的脉冲声源——应答器或信标的位置。与动物叫声相比,这些声源的发射信号多是已知的单频脉冲,因此借助于高分辨的时延估计算法,来提高这种定位方法的定位距离和应用范围。首先介绍了利用多途时延定位的基本理论,分析了声波在水底和水面上的反射特性,然后使用基于凸集投影的高分辨信道辨识算法估计多途时延,并分析了时延估计误差对定位精度的影响,最后利用湖上试验数据来验证定位方法的可行性。

## 1 时延差定位的基本原理

在浅水中,通过声传播的射线理论模型,可以计算出由发射声源经水面和水底反射后到达水听器的一系列声线,即本征声线。图 1 给出了浅海中经海底和海面一次和两次反射的本征声线示意图,声源用星形表示,水听器用实心圆圈表示,本征声线用实线表示,从图上可以看出,经水底或水面反射的传播路径,实际相当于到达水听器关于界面的虚像(用空心圆圈表示)的直达路径,这样一来,就形成了一个由实水听器和虚水听器组成的接收阵,如果能够估计信道到达这个接收阵各个阵元之间的时延差,便可定位声源的距离和深度。

### 1.1 定位方程的求解

在图 1 中建立柱坐标系  $(r, z)$ ,  $r$  轴与水面重合,由水听器指向声源方向,  $z$  轴与水面垂直,由水面指向水底方向,水听器和其虚像均位于  $z$  轴上,只考虑直达路径和经水面和水底一次反射的路径,对应的水听器坐标分别为  $(0, z_1)$ 、 $(0, z_2)$  和  $(0, z_3)$ ,声源位于  $(r_s, z_s)$ ,水深为  $D$ ,可以得到如下关系:

$$\begin{cases} z_2 = -z_1, \\ z_3 = 2D - z_1. \end{cases} \quad (1)$$

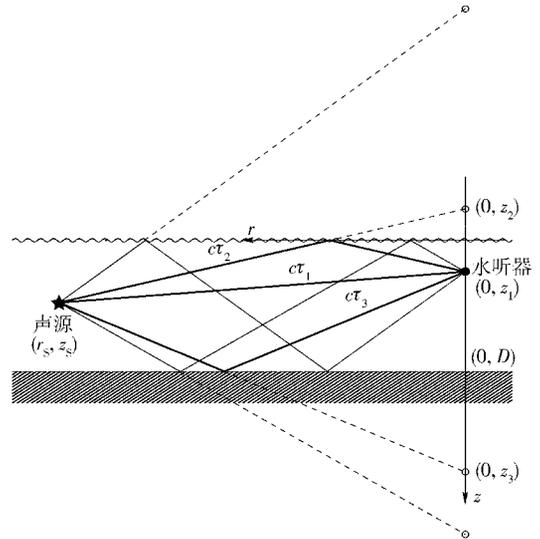


图 1 浅海中的本征声线示意图

Fig. 1 Illustration of eigenrays in shallow water

直达波由声源到达水听器的时间为  $\tau_1$ ,水面反射到达时间为  $\tau_2$ ,水底反射到达时间为  $\tau_3$ ,水中声速为  $c$ ,可以得到如下方程

$$r_s^2 + (z_s - z_1)^2 = c^2 \tau_1^2, \quad (2)$$

$$r_s^2 + (z_s - z_2)^2 = c^2 \tau_2^2, \quad (3)$$

$$r_s^2 + (z_s - z_3)^2 = c^2 \tau_3^2. \quad (4)$$

令  $\tau_{21} = \tau_2 - \tau_1$ ,  $\tau_{31} = \tau_3 - \tau_1$ ,并分别用(3)式和(4)式减去(2)式可以得到

$$z_2^2 - z_1^2 - 2(z_2 - z_1)z_s = c^2(\tau_{21}^2 + 2\tau_1\tau_{21}), \quad (5)$$

$$z_3^2 - z_1^2 - 2(z_3 - z_1)z_s = c^2(\tau_{31}^2 + 2\tau_1\tau_{31}), \quad (6)$$

即可求得

$$z_s = \frac{c^2 \tau_{31} \tau_{21} (\tau_{31} - \tau_{21}) + 4Dz_1 \tau_{21} - 4D^2 \tau_{21}}{4z_1 (\tau_{21} - \tau_{31}) - 4D \tau_{21}}, \quad (7)$$

$$\tau_1 = \frac{4z_s z_1 - c^2 \tau_{21}^2}{2c^2 \tau_{21}}, \quad (8)$$

$$r_s = \sqrt{c^2 \tau_1^2 - (z_s - z_1)^2}. \quad (9)$$

因此只要测量得到水深  $D$  和水听器深度  $z_1$ ,再估计出时延差  $\tau_{21}$  和  $\tau_{31}$ ,即可求得声源深度  $z_s$  和距离  $r_s$ .

### 1.2 声波在界面上的反射

从图 1 中可以得出,当  $z_s < D - z_1$  时,  $\tau_2 < \tau_3$ ,即水面反射先于水底反射到达;而当  $z_s > D - z_1$  时,  $\tau_2 > \tau_3$ ,水底反射先于水面反射到达,为了正确区分水面反射还是水底反射,需要利用声波在界面上的反射特性。

如图 2 所示,当平面波以入射角度  $\alpha_i$  入射到两层液体的分界面时,会产生反射波和折射波,反射角  $\alpha_r$  与入射角相等,而折射角  $\alpha_f$  满足 snell 折射定

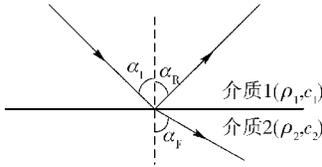


图2 声波在界面上的反射

Fig.2 Wave reflection at an interface

律,即

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_f} = \frac{c_1}{c_2}, \quad (10)$$

式中  $c_1$  和  $c_2$  分别为介质 1 和 2 中的声速。 $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为介质 1 和介质 2 的密度,反射系数  $\gamma$  定义为

$$\gamma = \frac{\rho_2 c_2 \cos \alpha_i - \rho_1 c_1 \cos \alpha_f}{\rho_2 c_2 \cos \alpha_i + \rho_1 c_1 \cos \alpha_f} = \frac{\rho_2 \cos \alpha_i - \rho_1 \sqrt{c_1^2/c_2^2 - \sin^2 \alpha_i}}{\rho_2 \cos \alpha_i + \rho_1 \sqrt{c_1^2/c_2^2 - \sin^2 \alpha_i}}. \quad (11)$$

当  $c_1 < c_2$  时,定义临界角  $\alpha_0$ :

$$\sin \alpha_0 = \frac{c_1}{c_2}. \quad (12)$$

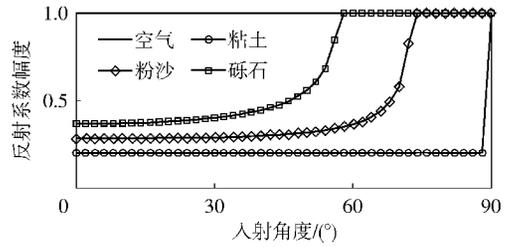
当入射角  $\alpha_i > \alpha_0$  时,反射系数  $\gamma$  变为复数,其模值  $|\gamma| = 1$ ,即发生全反射的现象,此时反射波相对于入射波还会有附加的相移存在。

图3给出了由水分别入射到空气、粘土、粉沙、砾石上时利用(11)式计算出的反射系数的模值和相移,其中介质的密度和声速取自文献[10]中的表1.3.

从图3中可以看出,水面反射的相移是接近  $180^\circ$  的,而水底反射在不发生全反射时,其相移为  $0^\circ$ ,发生全反射时,随着入射角的增大,其相移从  $0^\circ$  变化到  $180^\circ$ ,利用接收信号的相位即可分辨水底反射和水面反射。

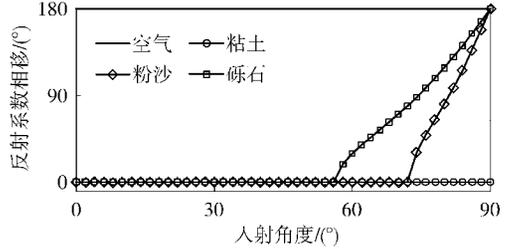
## 2 高分辨的时延估计算法

经典的估计传播时延与幅度的方法是使用最大似然估计器——匹配滤波器,但匹配滤波器的分辨率受到信号带宽的限制。为了突破这一限制,Zeng等<sup>[11]</sup>将用于图像重构领域内的凸集投影(POCS)方法用于水声信道辨识中,这一算法充分利用了水声信道冲激响应的稀疏特性,可以高分辨的辨识大时延扩展的水声多途信道。POCS算法比匹配滤波器的运算量大,并且对接收信号的信噪比有一定要求。在实际实验中,定位结果一般使用计算机处理得到,运算量的要求容易满足。同时,在海况较小的情况



(a) 反射系数的模值

(a) Modulus of reflection coefficient



(b) 反射系数的相位

(b) Angle of reflection coefficient

图3 声波从水中入射到不同介质时的反射系数

Fig.3 Interfaces reflection coefficients with different media

下,海洋环境噪声也比较小,接收信号的信噪比也满足计算条件。本文将POCS方法扩展到复数域,来获得多途时延中的相位信息,用于分辨水面反射与水底反射。

用线性时不变系统来描述水声信道,当发射信号为  $s(n)$  时,接收信号  $g(n)$  可以表示为发射信号与信道冲激响应  $h(n)$  的卷积再加上噪声  $v(n)$  形式,即

$$g(n) = s(n) \otimes h(n) + v(n). \quad (13)$$

信道中存在  $M$  个本征声线时,对应的冲激响应可以表示为

$$h(n) = \sum_{m=1}^M A_m \delta(n - \tau_m), \quad (14)$$

式中: $m$  是本征声线的编号; $A_m$  和  $\tau_m$  分别是第  $m$  个本征声线对应的衰减因子和传播时延; $\delta(n)$  是单位脉冲。如果考虑界面反射引起的相位变化, $A_m$  就变为一个复数,即  $A_m = a_m \exp\{j\theta_m\}$ ,其中  $a_m$  为幅度衰减, $\theta_m$  为相位变化,此时对应的冲激响应  $h(n)$  也是复数。由于接收信号都是实数,为了正确表示信道对发射信号的相移,利用复共轭算子,将发射信号写为解析信号的形式,这时(13)式变为

$$g(n) = \frac{1}{2} s(n) \otimes h(n) + \frac{1}{2} s^*(n) \otimes h^*(n) + v(n). \quad (15)$$

构造循环矩阵  $\Theta_s$ :

$$\Theta_s = \begin{bmatrix} s(0) & s(N-1) & \cdots & s(1) \\ s(1) & s(0) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & s(N-1) \\ s(N-1) & s(N-2) & \cdots & s(0) \end{bmatrix},$$

式中  $s(0), \dots, s(N-1)$  为发射信号  $s(n)$  的  $N$  个离散采样点。同时将  $g(n), h(n)$  和  $v(n)$  表示为列向量的形式:  $\mathbf{g} = [g(0) \ g(1) \ \cdots \ g(N-1)]^T$ ,  $\mathbf{h} = [h(0) \ h(1) \ \cdots \ h(N-1)]^T$  和  $\mathbf{v} = [v(0) \ v(1) \ \cdots \ v(N-1)]^T$ , 则(15)式可以表示为矩阵形式:

$$\mathbf{g} = \frac{1}{2}\Theta_s \mathbf{h} + \frac{1}{2}\Theta_s^* \mathbf{h}^* + \mathbf{v}, \quad (16)$$

式中(15)式的线性卷积变成了圆周卷积的形式, 为了避免计算错误, 假定所有的采样点都已经进行了补零处理。信道辨识的目的就是在已知向量  $\mathbf{g}$  和矩阵  $\Theta_s$  的情况下求解向量  $\mathbf{h}$  的估计值  $\hat{\mathbf{h}}$ 。

POCS 是一种寻找优化问题的可行性解的迭代方法, 可行性解由若干约束条件确定。每个约束条件都对应着一个封闭的凸集合, 集合中的所有元素都满足给定约束条件。问题的解是每个约束凸集中的元素, 这些凸集的交集构成了优化问题的可行性解的集合。

对于给定的凸集  $C_l$ , 定义一个投影算子  $P_l$  来修正凸集中元素的位置, 以令其满足凸集约束  $C_l$ 。

凸集投影的迭代过程可以表示为

$$\mathbf{h}_{q+1} = P_1 P_2 \cdots P_l \cdot \mathbf{h}_q, \quad q=0, 1, \dots \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{h}_q$  为第  $q$  次迭代后的估计值, 而  $\mathbf{h}_{q+1}$  为第  $q+1$  次迭代后的估计值;  $P_1, P_2, \dots, P_l$  为  $l$  个约束条件  $C_1, C_2, \dots, C_l$  对应的投影算子。

经过  $q$  次迭代后得到信道的估计值  $\hat{\mathbf{h}}$  满足

$$\hat{\mathbf{h}} = \mathbf{h}_q \in C_1 \cap C_2 \cap \cdots \cap C_l. \quad (18)$$

常用的凸集约束有以下 4 种<sup>[11-12]</sup>:

1) 残差的方差约束  $C_1$ :

$$\left\| \mathbf{g} - \frac{1}{2}\Theta_s \mathbf{h} - \frac{1}{2}\Theta_s^* \mathbf{h}^* \right\|_2^2 \leq \varepsilon_v, \quad (19)$$

式中:  $\|\cdot\|_2$  表示向量的  $\ell_2$  范数;  $\varepsilon_v$  是由噪声  $v(n)$  的统计特性所确定的门限值。

2) 冲激响应的  $\ell_1$  范数约束  $C_2$ :

$$\|\mathbf{h}\|_1 \leq \zeta, \quad (20)$$

式中  $\zeta$  为  $\ell_1$  范数的上界。

3) 冲激响应的上界约束  $C_3$ :

$$a_u \leq |h(n)| \leq a_u, \quad (21)$$

式中  $a_u$  和  $a_l$  分别是冲激响应幅度的上下界。

4) 残差的功率谱约束  $C_4$ :

$$\left| G(k) - \frac{1}{2}S(k)H(k) - \frac{1}{2}S_*(k)H_*(k) \right|^2 \leq \xi_v, \quad (22)$$

式中:  $G(k), S(k)$  和  $H(k)$  分别是  $g(n), s(n)$  和  $h(n)$  的傅里叶变换;  $S_*(k)$  和  $H_*(k)$  是  $s^*(n)$  和  $h^*(n)$  的傅里叶变换;  $\xi_v$  是由噪声频谱  $V(k)$  所确定的门限值。

假定噪声  $v(n)$  是均值为 0, 方差为  $\sigma_v^2$  的高斯白噪声, 对应的 4 种投影算子分别为

$$P_1 \mathbf{h}_q = \mathbf{h}_q + \text{IDFT} \left\{ S^* \times \mathbf{G} \div \left( \frac{1}{2}|\mathbf{S}|^2 + \frac{1}{\lambda} \mathbf{1} \right) \right\}; \quad (23)$$

$$P_2 h_q(n) = \text{sgn}\{h_q(n)\} \max\{|h_q(n)| - \mu, 0\}; \quad (24)$$

$$P_3 h_q(n) = \begin{cases} h_q(n), & a_l \leq |h_q(n)| \leq a_u; \\ a_l \text{sgn}\{h_q(n)\}, & |h_q(n)| < a_l; \\ a_u \text{sgn}\{h_q(n)\}, & |h_q(n)| > a_u; \end{cases} \quad (25)$$

$$P_4 H_q(k) = \frac{2}{S(k)} \left[ \frac{G(k) - \frac{1}{2}S(k)H_q(k)}{\left| G(k) - \frac{1}{2}S(k)H_q(k) \right|} \right]. \quad (26)$$

(23)式中:  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{G}$  分别是发射信号向量  $\mathbf{s}$  和接收信号向量  $\mathbf{g}$  的傅里叶变换;  $\text{IDFT}\{\cdot\}$  表示傅里叶反变换算子, 运算符  $\times$  和  $\div$  分别表示向量的点乘和点除;  $|\cdot|^2$  表示对向量的元素取模后再平方。(24)式中:  $\text{sgn}\{\cdot\}$  为符号函数;  $\max\{\cdot\}$  为最大值函数; 参数  $\lambda$  和  $\mu$  都可以由噪声功率  $\sigma_v^2$  计算得到。

运用投影算子对冲激响应的初值交替进行投影运算, 经过几步迭代后即可得到信道冲激响应的辨识结果。理想情况下, 冲激响应  $h(n)$  的估计值为一系列单位脉冲。每个单位脉冲对应的时刻即是多途时延的估计值, 而幅度  $A_m$  的模值和辐角分别表示了多途的幅度衰减和界面反射引起的相移。

### 3 定位误差分析

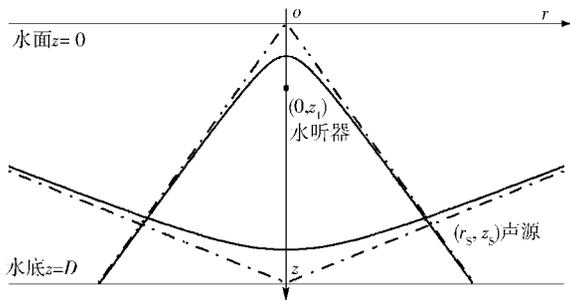
从定位方程(7)式和(9)式中可以看出, 影响定位结果的主要误差源有: 时延估计误差  $\Delta\tau_{21}, \Delta\tau_{31}$ , 水听器深度测量误差  $\Delta z_1$ , 水深测量误差  $\Delta D$  和声速测量误差  $\Delta c$ 。为直观了解这些因素对定位误差的影响, 将式(5)~式(6)变形为

$$\frac{z_s^2}{a^2} - \frac{r_s^2}{z_1^2 - a^2} = 1, \quad (27)$$

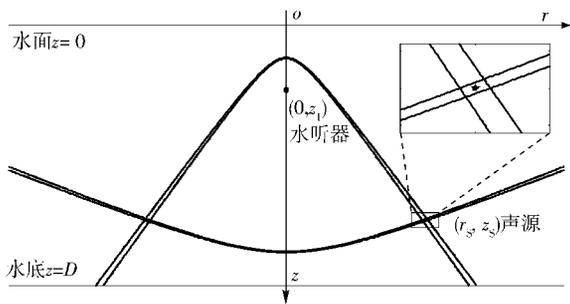
$$\frac{(D - z_s)^2}{b^2} - \frac{r_s^2}{(D - z_1)^2 - b^2} = 1, \quad (28)$$

式中:  $a^2 = c^2 \tau_{21}^2 / 4$ ;  $b^2 = c^2 \tau_{31}^2 / 4$ . 从(27)式可以看出水面反射与直达波的时间差确定了一条以水听器位置为焦点、以水面为对称轴的开口向下的双曲线;而式(28)则是水底反射与直达波的时间差确定的一条以水听器位置为焦点、以水底为对称轴的开口向上的双曲线,这两条双曲线的交点即是声源位置。图4(a)给出了这两条双曲线的示意图,图上还用虚线画出了这两条双曲线的渐近线,当声源水平距离较远时,可以用渐近线的交点来代替双曲线的交点,降低定位方程的次数。

当误差存在时,误差的上下界分别确定了4条双曲线,它们所围的区域是声源的可能位置,区域面积的大小表示了定位误差的大小,如图4(b)所示。



(a) 无误差时的定位方程确定的双曲线和其渐近线  
(a) Hyperbole and its asymptotes defined by the location equation without errors



(b) 误差上下界确定的双曲线  
(b) Hyperboles defined by the error bounds

图4 定位方程确定的双曲线示意图

Fig. 4 Hyperboles defined by the location equation

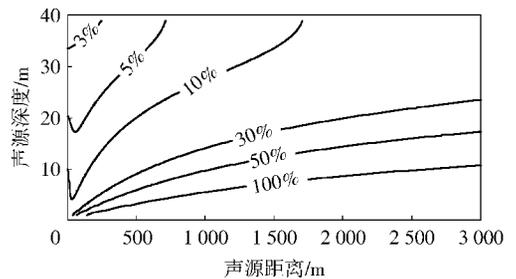
为了研究声源在不同位置时的定位误差,利用误差传播方程<sup>[13]</sup>:

$$(\Delta z_s)^2 = \left( \frac{\partial z_s}{\partial \tau_{21}} \Delta \tau_{21} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_s}{\partial \tau_{31}} \Delta \tau_{31} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_s}{\partial z_1} \Delta z_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial z_s}{\partial D} \Delta D \right)^2 + \left( \frac{\partial z_s}{\partial c} \Delta c \right)^2, \quad (29)$$

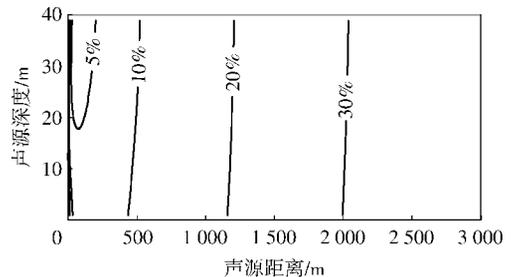
$$(\Delta r_s)^2 = \left( \frac{\partial r_s}{\partial \tau_{21}} \Delta \tau_{21} \right)^2 + \left( \frac{\partial r_s}{\partial \tau_{31}} \Delta \tau_{31} \right)^2 + \left( \frac{\partial r_s}{\partial z_1} \Delta z_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial r_s}{\partial D} \Delta D \right)^2 + \left( \frac{\partial r_s}{\partial c} \Delta c \right)^2, \quad (30)$$

式(29)~式(30)中右侧的平方误差项可以直接由数值方法计算得到。

图5中是  $D = 40 \text{ m}$ ,  $z_1 = 10 \text{ m}$ ,  $\Delta \tau_{21} = \Delta \tau_{31} = 100 \mu\text{s}$ ,  $\Delta D = 1 \text{ m}$ ,  $\Delta z_1 = 0.1 \text{ m}$ ,  $\Delta c = 10 \text{ m/s}$  条件下,声源位置不同时的深度和距离定位相对误差的分布图。从图中可以看出深度估计误差和距离估计误差在近距离时随声源距离增加而减小,在远距离时随声源距离增加而增大;深度估计误差随声源深度的增加而减小,距离估计误差随声源深度的增加缓慢减小。



(a) 深度估计值的相对误差  
(a) Depth estimation relative errors



(b) 距离估计值的相对误差  
(b) Range estimation relative errors

图5 声源位置不同时的定位误差分布

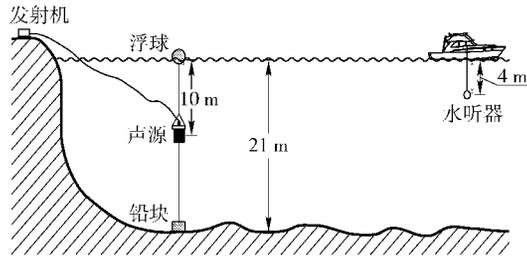
Fig. 5 Relative errors with different source locations

## 4 实验结果

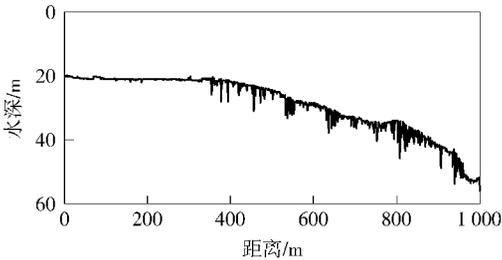
为了验证定位算法在实际使用中的性能,对2009年的松花湖实验数据进行了处理。实验环境如图6(a)所示。

声源位于水下10 m处,接收水听器布放于船舷一侧水下4 m处。声源以1 s为周期发射频率7 kHz,脉宽为10 ms的CW脉冲信号。水听器接收信号经放大滤波后记录到采集设备中。船上安装有GPS和测深仪,实时记录船的位置与水深。图6(b)中是实验过程中测深仪测得的水深数据。从图上可

可以看出,在距离声源 300 m 以内的区域湖底地势较为平坦,这一区域的平均水深为 21 m,湖底起伏的均方位移为 0.1 m,与发射信号的波长 0.21 m 相比较小。根据对界面粗糙度的定义<sup>[14]</sup>,此时的湖底是小粗糙度界面,水底界面散射对反射的影响可以忽略,只考虑水底镜反射。而 300 m 以外靠近松花湖大坝,水深剧烈起伏,不再满足单水听器定位的条件,在这一区域无法得到理想的定位结果。



(a) Illustration of experimental environment



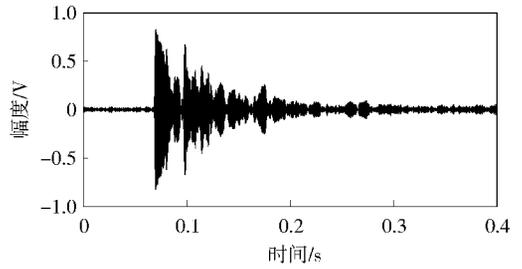
(b) Depth data of experimental environment

图 6 实验环境及水深示意图

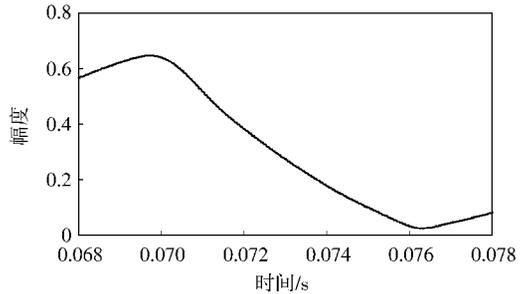
Fig. 6 Illustration of experimental environment and depth data

图 7 是接收信号与信道估计结果,从图 7(a)中可以看出,由于水面和水底反射的影响,接收信号展宽到 300 ms 以上,图 7(b)是使用匹配滤波器的处理结果,由于匹配滤波器的时间分辨率约为信号的脉宽,在 70 ms 时只有单个峰值。而 POCS 算法对信道的幅度估计结果则清晰地显示了 3 个峰值,分别对应直达波,水面反射和水底反射的到达时刻。由于发射换能器带宽的限制,发射信号的脉宽较宽,此时 POCS 算法的估计结果并不是理想的单位脉冲,而是具有一定时间宽度,这会带来一定的时延估计误差。分别求解对应 3 个峰值处冲激响应的相位值,即可得到接收信号相对于发射信号的相移估计值。将估计结果代入(7)式和(9)式中即可计算出声源深度和距离。

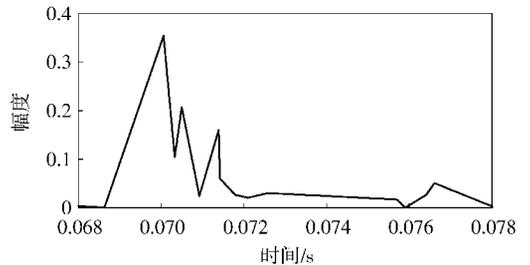
图 8 是 80 组数据的处理结果,图 8(a)是利用 POCS 估计的水面反射和水底反射相对于直达波的



(a) 接收信号  
(a) Received signal



(b) 匹配滤波器估计结果  
(b) Matched filter estimation result



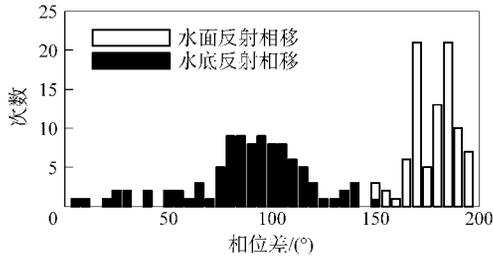
(c) POCS算法估计结果  
(c) POCS estimation result

图 7 接收信号及信道估计结果

Fig. 7 Received signal and channel estimation results

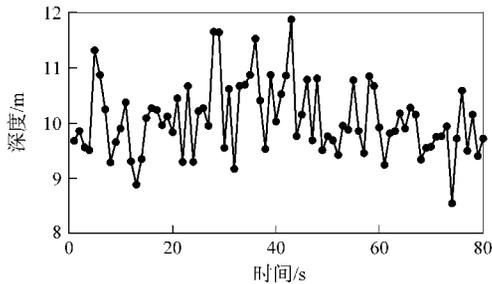
相移统计结果,从图上可以看出水底反射的相移介于  $0^\circ \sim 150^\circ$  之间,而水面反射的相移约为  $180^\circ$ ,这与理论分析的结果是相吻合的。声源深度慢变化时,水面反射和水底反射的到达顺序不会发生跃变。如果对短时间内测量得到的多组数据同时进行相位估计,再利用统计结果,即可清楚判断水面反射和水底反射到达的先后次序。图 8(b)是深度估计结果,图 8(c)是距离估计结果,深度估计的均值为 10.06 m,均方误差为 0.67 m,距离估计的均方误差为 25.8 m。

对实验数据的处理结果表明:单水听器定位方法在实际环境中是适用的。由于实验条件的限制,实验区域的湖底地形较为复杂,引起多途时延的变化,进一步导致定位误差增大。如果在浅海大陆架海域进行实验,由于洋流对海底的冲刷作用,海底地形较为平坦,使用单水听器定位方法可以达到更高的定位精度。



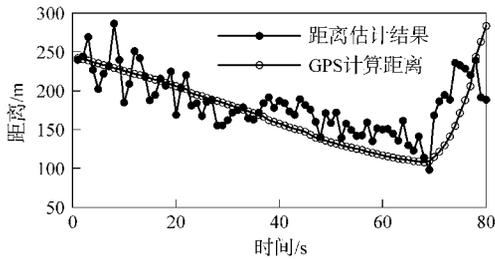
(a) 水面反射和水底反射的相移统计结果

(a) Phase change statistical results of surface and bottom reflection



(b) 深度估计结果

(b) Depth estimation results



(c) 距离估计结果

(c) Range estimation results

图8 80组数据的处理结果

Fig. 8 80 data sets estimation results

## 5 结论

本文使用单水听器,利用浅海环境中的直达波、水面反射和水底反射的时间差,实现了对单频脉冲声源的定位。POCS算法可以正确估计出多途反射的到达时刻和相位,其分辨率优于匹配滤波器,相位估计结果可以用于区分水面反射和水底反射,进一步正确计算声源位置。湖上实验结果表明这种定位方法具有成本低廉,结构简单的优点,具有一定应用价值。此外,在使用多个浮标进行定位的长基线系统中,利用这种单水听器定位方法,可以大幅度减小同步定位时,浮标之间进行时钟和数据同步的工作量,提供了一种新的定位解算方案。

## 参考文献 (References)

[1] 田垣. 水下定位与导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社,

2007: 14-45.

TIAN Tan. Technologies of underwater localization and navigation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 14-45. (in Chinese)

[2] 付进, 梁国龙, 张光普. 界面反射对定位系统性能影响及应对策略研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(1): 24-29.

FU Jin, LIANG Guo-long, ZHANG Guang-pu. Influence of interface reflection on positioning performance and restraining technology [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(1): 24-29. (in Chinese)

[3] Tolstoy A. Matched field processing for underwater acoustics[M]. Singapore: World Scientific, 1993.

[4] Bucker H P. Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound sources in shallow water[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 59(2): 368-373.

[5] Jackson D R, Dowling D R. Phase conjugation in underwater acoustics[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(1): 171-181.

[6] 生雪莉, 罗方方, 郭咏, 等. 垂直阵时反聚焦的目标被动定位方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(3): 359-364.

SHENG Xue-li, LUO Fang-fang, GUO Yong, et al. Target passive location by time-reversal mirror based on vertical array [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(3): 359-364. (in Chinese)

[7] 吴艳群, 胡永明, 倪明, 等. 基于单矢量水听器多途宽带信号的三维定位算法[J]. 兵工学报, 2010, 31(9): 1181-1187.

WU Yan-qun, HU Yong-ming, NI Ming, et al. Three-dimension localization of broadband sources using a single vector hydrophone in multipath environment [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(9): 1181-1187. (in Chinese)

[8] Aubauer R, Lammers M O, Au W W L. One-hydrophone method of estimating distance and depth of phonating dolphins in shallow water [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(5): 2744-2749.

[9] Tiemann C O, Thode A M, Straley J, et al. Three-dimensional localization of sperm whales using a single hydrophone [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120(4): 2355-2365.

[10] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational ocean acoustics[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2011: 38-44.

[11] Zeng W, Jiang X, Li X, et al. Deconvolution of sparse underwater acoustic multipath channel with a large time-delay spread [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(2): 909-919.

[12] Trussell H, Civanlar M. The feasible solution in signal restoration [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1984, 32(2): 201-212.

[13] Bevington P R, Robinson D K. Data reduction and error analysis for the physical sciences[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2003: 36-46.

[14] Brekhovskikh L M, Lysanov Y. Fundamentals of ocean acoustics [M]. 3rd ed. New York: Springer, 2003: 183-186.