基于声传播时间的三维浅海声速剖面反演

张维*, 杨士莪, 黄益旺, 雷亚辉

哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001

*联系人, E-mail: zhangwei667@163.com

收稿日期: 2012-09-29; 接受日期: 2012-10-25

国家安全重大基础研究(批准号: 613110010202)和国家自然科学基金(批准号: 11104045)资助项目

摘要 不平整海底的反射导致声线在水平方向上产生偏转, 给特征声线的搜索和声传播时间的计算带来了困难. 因此, 提出了一种三维空间特征声线搜索方法并用最快特征声线传播时间作为代价函数反演了三维浅海声速剖面. 为达到在大面积海域长时间监测海洋环境的目的, 研制了一套具有全球差分定位、短波通信功能的声纳浮标并在南中国海某海域开展了实验. 实验结果表明, 该声纳浮标在较高的海况下具有良好的可靠性与水面稳定性; 考虑声线的水平偏转能有效提高声速剖面反演的精度. 另外, 仿真结果表明该反演算法对海底深度失配不敏感.

关键词 声速剖面反演, 传播时间, 水平偏转, 浅海, 声纳浮标

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Cq, 43.30.Zk, 43.30.Wi

doi: 10.1360/132012-831

自 1979 年 Munk 首次提出了海洋声层析的概念^[1], 从理论和技术上分析了用声学方法反演海洋声速剖面的可行性之后, 各国学者对此表示出极大的兴趣, 并投入大量的人力和物力进行相关的实验研究. 与此同时, 基于声传播时间^[2,3]、模态匹配^[4-6]、简正波水平折射^[7]、峰值匹配^[8]以及波束匹配^[9,10]的声速剖面反演等多种理论模型逐渐发展起来. 与其他模型相比, 用声传播时间反演声速剖面具有以下优势: (1) 受海底声速、密度等参数影响小; (2) 相比于其他特征量, 例如模态相位等, 最快特征声线的传播时间易于获得; (3) 射线方法能进行三维声场的计算, 进而反演具有复杂海底的海洋环境下的声速剖面; (4) 射线方法速度快, 精度也较高. 在已有的用

特征声线传播时间反演浅海声速剖面的文献中, 都假设声线在同一垂直剖面内传播, 没有考虑不平整海底反射所带来的声线的水平偏转, 给反演的结果带来了不必要的误差. 因此, 提出了一种在三维空间中快速搜索特征声线的方法并基于最快特征声线的传播时间反演了南中国海某海域的声速剖面, 结果表明考虑声线的水平偏转能有效提高反演的精度. 另外, 仿真计算的结果表明, 三阶经验正交函数能够使得声速剖面反演达到较高的精度, 继续提高阶数, 反演的精度能有所提高但是效果不明显; 较小的海底深度失配对反演精度不会产生很大的影响.

为了在大面积海域进行水声参数考察时降低背景噪声, 获得高质量的实验数据, 一套具有高可靠性

引用格式: 张维, 杨士莪, 黄益旺, 等. 基于声传播时间的三维浅海声速剖面反演. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: s121-s130
Zhang W, Yang S E, Huang Y W, et al. Inversion of sound speed profile in three-dimensional shallow water based on transmission time (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: s120-s130, doi: 10.1360/132012-831

和水面稳定性、可遥控且有高精度时间同步和大地坐标定位的浮标系统是必需的设备^[11]. 现有的各类专业浮标, 功能相对单一, 在大面积海洋布阵能力、高精度定位和时间同步方面有很大的不足^[12]. 基于此目的, 开发了一套带有全球差分定位(DGPS)、短波无线电遥控和数据传输功能的声纳浮标, 实验证明该浮标在四级的海况下具有良好的可靠性和水面稳定性.

1 声传播时间计算模型

作为代价函数, 声传播时间的计算是影响声速剖面反演结果的最敏感因素. 因此, 建立合理的声传播时间计算模型对于声速剖面反演精度具有重要意义.

设声源和接收点的位置分别为 (x_0, y_0, z_0) 和 (x_r, y_r, z_r) . 声线在传播过程中满足 Snell 定理和射线方程, 分别如式(1)和(2)所示

$$\frac{c(z_0)}{c(z)} = \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} = n(z), \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_{j+1} - x_j - \int_{z_j}^{z_{j+1}} \frac{\mu_j dz}{\sqrt{n^2 - \mu_j^2 - \nu_j^2}} = 0, \\ y_{j+1} - y_j - \int_{z_j}^{z_{j+1}} \frac{\nu_j dz}{\sqrt{n^2 - \mu_j^2 - \nu_j^2}} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

式中, θ 和 θ_0 分别是深度 z 和 z_0 处的掠射角, (x_j, y_j, z_j) 和 $(x_{j+1}, y_{j+1}, z_{j+1})$ 是第 j 段声线的起始点和终止点, u_j, ν_j, s_j 分别是折射率 n 在 x, y 和 z 方向上的分量. 若方位角为 α , 则 u_j, ν_j, s_j 满足

$$\begin{cases} u_j = n \cos \theta \cos \alpha, \\ \nu_j = n \cos \theta \sin \alpha, \\ s_j = n \sin \theta, \end{cases} \quad (3)$$

设海底深度 h 是 x, y 的函数, 满足

$$\frac{\partial h(x, y)}{\partial x} = b_1, \quad \frac{\partial h(x, y)}{\partial y} = b_2.$$

令 $F = (1 + b_1^2 + b_2^2)$, 则海底法向量可以表示为

$$N = \frac{1}{F}(b_1, b_2, -1).$$

设入射向量为

$$I = \frac{1}{n}(\mu_j, \nu_j, s_j),$$

反射向量为

$$R = \frac{1}{n}(\mu_{j+1}, \nu_{j+1}, s_{j+1}),$$

令

$$W = s_j - b_1 \mu_j - b_2 \nu_j,$$

根据反射定理

$$I = (N \cdot I)N - N \times (N \times I)$$

和

$$R = -(N \cdot I)N - N \times (N \times I),$$

可以得到

$$\begin{cases} \mu_{j+1} = \{b_1 W - b_2(b_1 \nu_j - b_2 \mu_j) + (\mu_j + b_1 s_j)\} / F, \\ \nu_{j+1} = \{b_2 W + (\nu_j + b_2 s_j) + b_1(b_1 \nu_j - b_2 \mu_j)\} / F, \\ s_{j+1} = \{-W + b_2(\nu_j + b_2 s_j) + b_1(\mu_j + b_1 s_j)\} / F. \end{cases} \quad (4)$$

当海底深度梯度不为 0, 反射向量与入射向量在水平方向上的分量不相等, 声线发生水平偏转^[13].

在三维空间搜索特征声线时必须同时考虑声线的方位角和俯仰角^[14]. 首先假设初始出射方位角 α 为声源与接收点的连线方向, 出射掠射角在设定范围内按一定步长分为 N 等份, 按照式(1), (2), (3)和(4)进行第 n 根声线跟踪直到声线终点 (x'_m, y'_m, z'_m) 满足 $x'_m = x_r$, 然后利用

$$\alpha = \alpha \pm \arctan((y'_m - y_r) / (x'_m - x_0)), \quad (5)$$

对方位角进行补偿直到 $|y'_m - y_r| < \varepsilon$, 式(5)中正负号分别对应于分母小于 0 和大于 0 的情况. 若相邻出射掠射角的声线是同类声线(具有完全相同的反射和反转次数和顺序), 且 z_r 位于两声线 z 轴坐标 z'_m 和 z'_{m+1} 之间, 定义这样的声线为特征声线的相邻声线. 对特征声线的相邻声线进行掠射角线性迭代插值直到 $|z'_m - z_r| < \delta$, 从而确定特征声线. ε 和 δ 都是预先设定的误差上限.

某段声线从深度 z_1 传播到深度 z_2 所需要的时间为

$$t = \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{c(z) \sin \theta(z)} dz. \quad (6)$$

在反转点附近由于 $\sin \theta \approx 0$, 为了减小数值计算的误差, 假定该点附近的声速梯度是恒定的, (6)式可以简

化为^[15]

$$t = \left| \frac{1}{g} \ln \left[\frac{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta_0}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta'}{2}\right)} \right] \right|, \quad (7)$$

θ_0 和 θ' 分别为声线起始点与结束点处的掠射角, g 是恒定的声速梯度.

算例 1: 设海深 $h=25+3\times 10^{-3}x+3\times 10^{-3}y$ m, 声速随深度的变化关系为 $c(z)=1550-0.1z$ m/s, 声源和接收点分别位于(0, 0, 10) m 和(8806.8, 0, 10) m. 采用本文介绍的三维空间特征声线搜索方法搜索特征声线, 如图 1 所示. 从图 1 可以看到, 由于不平整海底的反射导致声线产生水平方向上的偏转. 在计算海底反射时, 分别令 b_1 和 b_2 等于 0 或者真实值, 声线将在二维或者三维空间传播. 二维空间与三维空间中同类特征声线的传播时间对比如表 1 所示. 从表 1 可以看到在传播时间量级为秒的情况下, 在海底较为平缓的声场环境中, 同类声线传播时间的偏差在毫秒的量级上.

图 1 三维空间特征声线传播轨迹

Figure 1 Trajectory of eigen-ray in three-dimensional space

表 1 二维空间与三维空间中同类声线传播时间对比

Table 1 The contrast of transmission time between 2D and 3D congeneric eigen-rays

声线序号	2D (s)	3D (s)	偏差 (ms)
1	5.7335	5.7311	2.4
2	5.7095	5.7081	1.4
3	5.6983	5.6971	1.2
4	5.7157	5.7142	1.5
5	5.7267	5.7245	2.2

2 性能仿真

2.1 经验正交函数阶数(EOF)对反演精度的影响

24 条样本声速剖面如图 2 所示, 根据样本声速剖面 $c_1(z_i), c_2(z_i) \dots c_N(z_i)$ 和平均声速剖面 $\bar{c}(z_i)$ 求协方差矩阵 R , R 的每一个元素 r_{ij} 可以表示为^[16]

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [c_k(z_i) - \bar{c}(z_i)][c_k(z_j) - \bar{c}(z_j)]. \quad (8)$$

将协方差矩阵进行特征分解, 选取前 K 个最大的特征值所对应的特征向量作为经验正交函数(EOF), 前 5 阶 EOF 如图 3 所示.

将待求解声速表示成平均声速与 K 阶 EOF 之和的形式

$$c'(z) = \bar{c}(z) + \sum_{k=1}^K a_k f_k(z), \quad (9)$$

式中, a_k 是 EOF 系数, f_k 是 EOF. 平均声速 $\bar{c}(z_i)$ 和各阶 EOF 通过多条样本声速获得, 是已知量, 这样就将声速剖面反演的问题转化为经验正交函数系数 a_k 求解的问题.

算例 2: 水平海底深度 100 m, 声源与接收阵之间的水平距离 10 km, 声源深度 10 m, 6 元接收阵上各个阵元深度分别为 15, 30, 45, 60, 75, 90 m. 以图 2 中的其中的一条声速剖面作为实际声速, 计算各水听器最快特征声线的传播时间并作为观测时间 τ_{ij} . 构造如下代价函数

$$E = \frac{1}{\sum_{i,j} [t_{ij}(r_i, r_j) - \tau_{ij}]^2}, \quad (10)$$

图 2 样本声速剖面

Figure 2 Measured sound speed profiles.

图 3 经验正交函数

Figure 3 Experimental orthogonal functions.

其中, r_i, r_j 分别为声源和接收点的坐标, t_{ij} 是拷贝时间. 采用全局优化效果较好且计算速度较快的量子粒子群算法^[17]搜索代价函数的全局最大值, 当代价函数最大时所对应的声速剖面即为反演结果.

定义

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [c(z_i) - c'(z_i)]^2} \quad (11)$$

为声速剖面反演的均方根误差. 仿真计算不同 EOF 阶数时声速剖面反演的精度, 如表 2 所示.

从表 2 可以看出, 采用 3 阶以上 EOF, 声速剖面反演的精度都比较高, 增加 EOF 的阶数能够提高反演的精度, 但是效果不是很明显, 而且增加了反演的难度. 因此, 本文采用 3 阶 EOF 进行声速剖面反演.

2.2 海底深度失配对反演精度的影响

海底深度随着潮汐的变化而变化, 给声传播时间的计算带来了误差, 有必要研究海底深度失配对反演结果的影响. 为了分析问题的简化, 仅考虑水平海底的情况. 如图 4 所示, 当海底深度发生失配时, 特征声线轨迹也由 L_1 变成 L_2 . 设海底深度为 D , 水平

传播距离为 r , 传播时间为 T , 则有

$$r = \int_{z_s}^D \frac{pc(z)}{\sqrt{1-p^2c^2(z)}} dz + 2N \int_0^D \frac{pc(z)}{c(z)\sqrt{1-p^2c^2(z)}} dz + \int_{z_r}^D \frac{pc(z)}{c(z)\sqrt{1-p^2c^2(z)}} dz, \quad (12)$$

$$T = \int_{z_s}^D \frac{1}{c(z)\sqrt{1-p^2c^2(z)}} dz + 2N \int_0^D \frac{1}{c(z)\sqrt{1-p^2c^2(z)}} dz + \int_{z_r}^D \frac{1}{c(z)\sqrt{1-p^2c^2(z)}} dz, \quad (13)$$

其中, N 为声线的跨度个数, z_s 和 z_r 分别为声源深度和接收点深度, θ_0 和 c_0 分别是声源处的掠射角和声速, p 是声线不变量, 满足

$$p = \frac{\cos \theta(z)}{c(z)} = \frac{\cos \theta_0}{c_0}. \quad (14)$$

图 4 海底深度失配示意图

Figure 4 The diagram of mismatched seabed depth.

表 2 EOF 阶数对反演精度的影响(m/s)

Table 2 The influence of EOF modal on inversion precision (m/s)		
	最大误差	均方根误差
3 阶	1.310	0.650
4 阶	1.008	0.628
5 阶	1.026	0.615

当海底深度变化 ΔD 很小时, 由海底深度变化所带来的传播时间误差可以表示为

$$\Delta T = \frac{dT}{dD} \Delta D, \quad (15)$$

由于水平传播距离 r 并未随海底深度的变化而变化, 因此

$$\frac{dr}{dD} = \frac{\partial r}{\partial D} + \frac{\partial r}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial D} = 0,$$

即

$$\begin{aligned} & \frac{(2N+2)pc(D)}{\sqrt{1-p^2c^2(D)}} + \left(\int_{z_1}^D \frac{c(z)}{(1-p^2c^2(z))^{3/2}} dz \right. \\ & \left. + 2N \int_0^D \frac{c(z)}{(1-p^2c^2(z))^{3/2}} dz + \int_{z_1}^D \frac{c(z)}{(1-p^2c^2(z))^{3/2}} dz \right) \\ & \frac{\partial p}{\partial D} = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

另外

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dD} &= \frac{\partial T}{\partial D} + \frac{\partial T}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial D} \\ &= \frac{2N+2}{c(D)\sqrt{1-p^2c^2(D)}} + \left(\int_{z_1}^D \frac{pc(z)}{(1-p^2c^2(z))^{3/2}} dz \right. \\ & \left. + 2N \int_0^D \frac{pc(z)}{(1-p^2c^2(z))^{3/2}} dz \right. \\ & \left. + \int_{z_1}^D \frac{pc(z)}{(1-p^2c^2(z))^{3/2}} dz \right) \frac{\partial p}{\partial D}, \end{aligned} \quad (17)$$

将(16)和(17)式代入(15)式得到

$$\Delta T = (2N+2) \frac{\sqrt{1-p^2c^2(D)}}{c(D)} \Delta D. \quad (18)$$

当声速变为 $c(z)+\Delta c$ 时, 传播时间变化量为 ΔT , 根据(6)式得到

$$\begin{aligned} \Delta T &= \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{(c(z)+\Delta c)\sin\theta(z)} - \frac{1}{c(z)\sin\theta(z)} dz \\ &\approx \int_{z_1}^{z_2} \frac{-\Delta c}{c^2(z)\sin\theta(z)} dz. \end{aligned}$$

令 $\bar{c} = \frac{1}{D} \int_0^D c(z) dz$ 为全海深的平均声速, 则上式

可以表示为

$$\Delta T \approx -\frac{\Delta c}{\bar{c}} T. \quad (19)$$

由(18)和(19)式得到

$$\Delta c \approx -(2N+2) \frac{\bar{c}\sqrt{1-p^2c^2(D)}}{Tc(D)} \Delta D. \quad (20)$$

算例 3: 环境参数如同算例 2, ΔD 为正表示计算所用深度大于实际海底深度, 仿真计算海底深度失配时声速剖面反演的误差, 并将采用(20)式计算的误差的绝对值称为理论预测平均误差, 误差随失配深度的变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 仿真计算的均方根误差与理论预测平均误差的变化趋势基本一致, 两者之间近似相差一个常数, 即计算固有误差. 海深为 100 m 的情况下, 在海底深度变化相对较小时, 海底深度失配所带来的反演误差并不是很明显, 尤其是在 2 m 以内。

3 实验介绍

3.1 浮标的结构与功能

浮标的可靠性与水面稳定性、短波通信性能以及时间同步和定位的精度对于大面积水声考察的任务来说都是至关重要的指标, 因此必须予以考虑。

在整体结构上, 本浮标吸取了 Spar 型结构^[18]的“集中浮力、集中重量、中间杆连接、减小迎风面积”等基本思想, 通过改进, 采用浮球代替浮力舱与浮力管, 使得浮标在损失部分抗涌浪能力的情况下有效地减小了长度和重量. 浮标全长约 9 m, 重 383.7 kg, 与 2002 年我国参加南海实验考察的浮标相比, 长度和重量上都有了较大程度的改进. 浮标的主体是浮

图 5 反演误差与海底失配深度之间的变化关系

Figure 5 The relation between inversion error and mismatched seabed depth.

体部分和电子舱, 两者之间用一根长 2 m 的钢管相连, 成“不倒翁式”的基本结构, 如图 6 所示. 容易计算出悬挂上垂直阵后整个浮标的重心位于距离电子电池舱上方 1.4 m 的连接杆上, 浮心位于重心正上方 1 m 的浮体上, 由力学知识可知该浮标在大角度倾斜后具有较强的自恢复能力. 实验结果表明, 在四级海况下, 浮标的摇摆角度小于 10° , 具有较好的稳定性.

作为浮标的关键设备之一, 短波天线的主要功能是在指挥船和浮标之间传输浮标工作状态、指令以及实验数据. 常规的鞭状天线在抗风浪能力和长度上均不适合小型浮标的装配. 因此, 对短波天线作了如下专门的设计: (1) 采用紫铜管外部裹敷玻璃钢结构, 在有效地提高辐射电阻和展宽频带的同时也提高了结构强度; (2) 通过加感处理, 使得天线长度仅 3 m, 相当于常规天线长度的 1/2; (3) 在天线根部设置了匹配箱, 对 13 和 6 MHz 两个频点进行了良好匹配, 在海上通信距离能达到 100 km 以上.

差分 DGPS 在浮标系统中有着至关重要的作用, 它除了确定水声信号接收点的大地坐标位置, 同时还担负着全系统时间统一的重任, 数据采集程序、每一组数据的时间起点等重要时序控制均取自 GPS 的 UTC 时间. 由于 DGPS 的使用, 在整个海岸线外 300 km 的带状区域, 每一枚浮标的定位精度可小于 5 m, 多枚浮标之间也具有了精确同步的时间基准.

图 6 浮标整体结构图

Figure 6 The diagram of sonobuoy structure.

3.2 实验过程描述

实验于 2011 年 9 月在南海进行. 三枚浮标呈等边三角形布放, 相邻浮标之间的距离大约为 50 km, 每枚浮标下悬挂一个垂直阵, 设备布放示意图如图 7 所示. 垂直阵上 3 个声压水听器深度分别为 19 m, 34 和 49 m, 矢量水听器深度为 64 m. 实验过程中, 发射船首先沿直线运动到 CA 连线的中点, 再沿直线运动到 AB 连线的中点, 最后沿直线运动到浮标 B 的位置, 如图 7 中箭头方向所示. 发射船在行进过程中, 每隔十分钟投放一枚声弹, 爆炸深度 100 m. 接收船则停留在三角形的中心位置和三个浮标进行通信.

实验时, 声弹爆炸时刻和爆炸位置都是未知的, 只有通过其他的信息估算得到. GPS 每秒记录一次发射船的位置. 设投弹时刻为 T_1 , 此时 GPS 位置为 (x_1, y_1) ; 监听水听器监记录到爆炸声信号的时刻为 T_2 , 此时 GPS 位置为 (x_2, y_2) ; 投弹点与 GPS 之间的距离为 d_1 , 与监听水听器之间的距离为 d_2 , 如图 8 所示; 声弹爆炸深度为 h , 从海表面到 h 深度的平均声速为 c_0 . 估算声爆炸时刻 T 和爆炸点的水平位置 (x, y) 的方法如下: 发射船航向(与 x 轴之间的夹角) $\alpha = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)$, 则爆炸点水平位置 (x, y) 可以表示为 $x = x_1 - d_1 \cos \alpha$, $y = y_1 - d_1 \sin \alpha$. 从投弹到监听到爆炸声信号, 发射船行进的距离为 $l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$,

图 7 实验设备布放示意图

Figure 7 Experimental configuration.

图 8 爆炸点位置与爆炸时刻估计示意图

Figure 8 The diagram of estimation of detonation position and time.

从爆炸点到监听水听器的声传播时间为

$$t = \sqrt{(l + d_2)^2 + h^2} / c_0, \text{ 那么爆炸时刻 } T = T_2 - t.$$

4 实验数据处理结果

实验时, 各水听器接收到很明显的爆炸声信号, 其中, 某时刻浮标 A 上深度为 64 m 的声压水听器的接收信号波形及对应的时频分布如图 9 所示.

发射船上监听的声弹爆炸的时域信号如图 10 所示. 对接收信号和监听信号采用互相关进行时延估计以获取该声信号到达时刻, 如图 11 所示. 图 11 中第一个峰值对应的时间即为信号到达时刻. 将信号到达时刻与爆炸时刻之差作为声传播时间, 该时刻浮标 A 上 4 个水听器接收信号的声传播时间如表 3 所示. 由于采样率为 10 K, 因此, 传播时间可以精确到 0.1 ms 的量级上. 传播时间测量误差主要来源是

图 9 接收信号波形及对应的时频分布

Figure 9 The received signal and corresponding time-frequency distributing.

图 10 监听爆炸声信号

Figure 10 The monitored sound source signal.

图 11 时延估计

Figure 11 Estimation time delay.

表 3 声传播时间

Table 3 The transmission time

深度(m)	19	34	49	64
时间(s)	20.2481	20.2470	20.2213	20.2123

爆炸时刻估计时采用了从海表面到爆炸深度的平均声速, 最大误差不超过 3 ms, 由(19)式可知, 传播时间所带来的声速剖面反演误差将小于 0.22 m/s.

实验海域的海底深度分布如图 12 所示, 色棒的单位是 km, A, B, C 分别表示三个浮标的位置, 海底深度由最浅的 250 m(A 点)变化到最深的 820 m(C 点), 变化较剧烈. 在实验阶段, 该海域最大潮高为 2 m,

图 12 海底深度分布

Figure 12 The distribution of seabed depth.

由仿真计算结果可知海底深度失配对反演精度不会有很大的影响, 因此不予考虑.

实验数据处理时, 假设声速剖面在实验阶段随水平距离和时间不变, EOF 选取图 3 中的前 3 阶. 在二维空间和三维空间分别搜索特征声线, 用每组信号的最快特征声线的传播时间作为代价函数反演声速剖面, 并对多组信号的反演结果取平均, 反演结果与误差如图 13 所示, 为方便对比, 图中深度只截止到 150 m.

在三维空间中搜索如图 13 中所示的三条声速剖面条件下的声源与浮标 A 上 19 m 水听器之间的最快特征声线, 如图 14 所示. 从图 14 可以看出, 考虑了水平偏转时的反演声速所对应的最快特征声线轨迹更接近于实测情况. 在二维空间中搜索特征声线时声速剖面反演的最大误差为 4.227 m/s, 均方根误差为 2.308 m/s, 而在三维空间中, 对应的误差分别为 2.538 m/s 和 1.327 m/s. 以上结果都充分说明考虑了不平整海底反射所带来的水平偏转能减小声传播时间计算的误差, 进而提高声速剖面反演的精度.

5 结论

本文首先介绍了一种三维浅海环境下基于声传播时间的声速剖面反演方法, 仿真计算了反演算法的性能, 并通过实验数据的处理反演了南中国海某海域的声速剖面; 同时, 根据实验的需求, 研制了一

图 13 反演结果与误差

Figure 13 The results and errors of SSP inversion.

图 14 最快特征声线轨迹

Figure 14 Trajectories of the fastest eigen-rays.

套能用于海洋环境考察的声纳浮标, 可以得出以下结论:

(1) 改进的 Spar 型浮标结构在四级海况下具有较好的稳定性, 能为声速剖面反演提供实时的、可靠的实验数据.

(2) 3 阶 EOF 能使得声速剖面反演达到较高的精度, 继续增加阶数能提高精度, 但是效果不明显; 较小的海底深度失配对反演结果影响很小.

(3) 考虑不平整海底反射所带来的声线的水平偏转能使基于声传播时间的声速剖面反演的精度得到有效地提高.

参考文献

- 1 Munk W H, Wunsch C. Ocean acoustic tomography A: Scheme for large scale monitoring. *Deep-Sea Res*, 1979, 26: 123–161
- 2 Tang J F, Yang S E. Sound speed profile in ocean inverted by using travel time (in Chinese). *J Harbin Eng Univ*, 2006, 27(5): 733–737 [唐俊峰, 杨士莪. 由传播时间反演海水中的声速剖面. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(5): 733–737]
- 3 Philippe R, Ion I, Barbara N, et al. Travel-time tomography in shallow water: Experimental demonstration at an ultrasonic scale. *J Acoust Soc Am*, 2011, 130 (3): 1232–1241
- 4 Shang E C. Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory. *J Acoust Soc Am*, 1989, 85(4): 1531–1537
- 5 Li F H, Zhang R H. Inversion for sound speed profile by using a bottom mounted horizontal line array in shallow water. *Chin Phys Lett*, 2010, 27(8): 84303
- 6 He L, Li Z L, Peng Z H, et al. Inversion for sound speed profiles in the northern of South China Sea (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 49–57 [何利, 李整林, 彭朝晖, 等. 南海北部海水声速剖面声学反演. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 49–57]
- 7 Voronovich A G, Shang E C. Numerical simulations with horizontal-refraction modal tomography. Part I: Adiabatic propagation. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101(5): 2636–2643
- 8 Skarsoulis E K, Athanassoulis G A. Ocean acoustic tomography based on peak arrivals. *J Acoust Soc Am*, 1996, 100(2): 797–813
- 9 Yang T C, Yates T. Matched beam Processing: Applications to a horizontal line array in show water. *J Acoust Soc Am*, 1998, 104(2): 1216–1300
- 10 Zhang Z B, Ma Y L, Yang K D, et al. Inversion for sound speed profile in shallow water using matched-beam processing (in Chinese). *Acta Acust*, 2005, 30(2): 103–107 [张忠兵, 马远良, 杨坤德, 等. 浅海声速剖面匹配波束反演方法. 声学学报, 2005, 30(2): 103–107]
- 11 Kotera yama W, Nakamura M, Yamaguchi S. Underwater vehicles and buoy systems developed for ocean observations in the research institute for applied mechanics. In: *Proceedings of the Fifth 2002 ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, 2002, 11: 13–20
- 12 Zhu G W. The development of sea section detection buoy technique (in Chinese). *Meteorolog Hydrolog Marine Instrument*, 2004, 6(2): 1–6 [朱光文. 海洋剖面探测浮标技术发展. 气象水文海洋仪器, 2004, 6(2): 1–6]
- 13 Zhang W, Yang S E, Tang Y F, et al. A method of seeking eigen-rays in shallow water with an irregular seabed (in Chinese). *Harbin Eng Univ*, 2011, 32(12): 1544–1548 [张维, 杨士莪, 汤云峰, 等. 不平整海底环境下的浅海本征声线求解方法. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(12): 1544–1548]
- 14 Wang S Q. A new method of three-dimensional eigenray-tracing (in Chinese). *Acta Acust*, 1992, 17(2): 155–157 [王恕铨. 求三维本征声线的一种新方法. 声学学报, 1992, 17(2): 155–157]
- 15 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006. 112
- 16 Shen Y H, Ma Y L, Tu Q P. Inversion of sound speed profile for shallow-water environment with experimental verification (in Chinese). *J Northwestern Polytechnical Univ*, 2000, 18(2): 212–215 [沈远海, 马远良, 屠庆平. 浅水声速剖面的反演方法与实验验证. 西北工业大学学报, 2000, 18(2): 212–215]
- 17 Yang C J, Liu Q, Huang Z. One method of improving quantum- behaved particle swarm optimization (in Chinese). *Comput Tech Automation*, 2009, 28(1): 100–103 [杨传将, 刘清, 黄珍. 一种量子粒子群算法的改进方法. 计算技术与自动化, 2009, 28(1): 100–103]
- 18 Irish J D, Paul W, Shaumeyer J N, et al. Next generation ocean observing buoy. *Sea Technol*, 1999, 40(5): 37–43

Inversion of sound speed profile in three-dimensional shallow water based on transmission time

ZHANG Wei^{*}, YANG ShiE, HUANG YiWang & LEI YaHui

Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Horizontal deflection often occurs when a ray propagates in shallow water with an irregular sea bottom, which makes it difficult to determine eigen-ray trajectory and transmission time. A new method for seeking eigen-ray in three dimensions was proposed and sound speed profile (SSP) was inverted in three-dimensional shallow water using the fastest eigen-ray transmission times to form the cost function. In order to satisfy long-time monitoring of SSP, a kind of sonobuoy was developed with the function of DGPS, short wave radio controlling and data transmission and experiment was implemented in the South China Sea. It is indicated that the sonobuoy has high reliability and stability in rough sea condition. The precision of SSP inversion can be enhanced dramatically by considering horizontal deflections of eigen-ray. In addition, the influence of small mismatch of seabed depth on precision of inversion can be neglected.

SSP inversion, transmission time, horizontal deflection, shallow water, sonobuoy

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Cq, 43.30.Zk, 43.30.Wi

doi: 10.1360/132012-831