匹配声场干涉结构反演海水声速剖面

何利^{①*}, 李整林^{①②}, 张仁和^①, 李风华^①

① 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190;

② 中国科学院声学研究所南海研究站, 海口 570105

*联系人, E-mail: heli@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2012-09-29; 接受日期: 2012-11-27

国家自然科学基金资助项目(11125420, 10974218)

摘要 浅海波导中不同号简正波的干涉, 使得声场具有稳定干涉结构, 表现为声强的距离-频率图上出现明暗相间的条纹. 本文基于 2010 年南海海洋声学层析专题实验, 研究了匹配声场干涉结构反演海水声速剖面方法的可行性和有效性. 首先对实验中测量的水文资料进行了分析, 提取了海水声速剖面经验正交函数. 数值模拟的研究了海水声速剖面起伏对声场干涉结构的影响. 分析了实验期间水平阵记录的声学信号, 提取了近 9 个小时 524 个具有较高信噪比的有效声信号. 构建了匹配声场干涉结构反演海水声速剖面的代价函数. 把海水声速剖面用前三阶经验正交函数表示, 用匹配声场干涉结构的方法对实验期间海水声速剖面进行了反演, 并把反演结果与实测结果进行了比较, 验证了反演方法的有效性和稳定性.

关键词 声速剖面, 声场干涉结构, 水平接收阵

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Wi

doi: 10.1360/132012-817

海水声速剖面是影响海洋中声传播的关键因素之一. 如何针对不同应用条件进行声速剖面有效获取是人们一直关注的重点研究课题. 除了通过现场实际测量手段获取海水声速剖面外, 利用声场特性反演声速环境也是一种重要的手段, 对水下探测系统的实际应用具有重要意义. 比如: 对一些离岸远距离布设的水下探测系统, 不可能进行随时现场测量, 而声学反演技术则可为其长期工作提供大范围的水体环境信息, 有利提高其探测性能.

海水声速剖面的声学反演最初是由 Munk 和

Wunsch 提出, 他们基于射线声学的微扰法, 假定一个背景参考声速, 利用声波到达时间扰动与声速扰动的近似线性关系求出声速^[1]. LeBlanc 等证明, 经验正交函数 EOF 是描述声速剖面最有效的基函数, 大大减少了海水声速剖面的表示参数, 使匹配场反演海水声速剖面成为可能^[2]. Tolstoy 首次将匹配场处理方法应用于海洋声层析, 此后, 匹配模式、匹配多途到达时间、匹配波束、匹配时延以及信号峰值匹配方法反演海水声速剖面相继出现^[3-14].

现有海水声速剖面声学反演方法大都利用声场

引用格式: 何利, 李整林, 张仁和, 等. 匹配声场干涉结构反演海水声速剖面. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: s112-s120

He L, Li Z L, Zhang R H, et al. Sound speed profile inversion by matching the acoustic intensity striations in shallow water (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: s112-s120, doi: 10.1360/132012-817

相位信息. 由于简正波的干涉效应, 浅海声场强度呈现稳定的频率-距离明暗条纹相间结构, 条纹的斜率可通过波导不变性描述. 当海洋信道随时间起伏时, 波导不变量会发生变化, 人们已尝试利用波导不变性进行海底声参数反演以及海洋信道起伏的监测等^[15-17].

本文提出匹配声场干涉结构反演海水声速剖面的方法. 对 2010 年南海海洋声学层析专题实验中同步测量的声学及海洋环境参数数据进行了分析, 数值模拟的研究了海水声速剖面起伏对声场干涉结构的影响, 提取了海水声速剖面经验正交函数, 验证了匹配声场干涉结构反演海水声速剖面方法的有效性和稳定性.

1 实验概况与海水声速剖面的经验正交函数表示

2010 年 6 月, 中科院声学所声场声信息国家重点实验室在我国南海浅海海域进行了一次海洋声学层析专题实验, 实验设备布置如图 1 所示. 潜标发射换能器位于海底以上 7–8 m, 每隔 1 分钟连续发射 6 次 1 s 的 160–250 Hz 线性调频信号. 在距离声源 40 km 的海底部设 70 阵元潜标水平阵接收声信号, 阵长 210 m. 图 2 给出实验期间水平阵某一通道接收的一段信号, 图 2(a)是原始信号, 其中低频石油勘探信号太强, 掩盖了声信号; 用 6 s 的源信号对图 2(a)中信号进行脉冲压缩, 得到图 2(b)所示信号, 可见经脉冲压缩后信噪比得到明显提高, 本时间段内发射的三次声学信号清晰可见, 每次信号经脉冲压缩后由 11 个具有不同幅度相同时间结构的信号组成, 其中第 6 个信号是源信号与接收声信号全匹配相关的结果, 其相关值最高, 幅度最大, 本文用来反演海水声速剖面; 图 2(b)中第一次声信号中第 6 个信号的放大如图 2(c)所示. 实验期间, 在声源和水平接收阵附近, 分别布设垂直温度链测量水温随时间的变化. 测量结果由图 3 给出, 其中图 3(a)是接收阵附近温度链测量结果, 图 3(b)是声源附近温度链测量结果, 起始时间是 2010 年 6 月 7 日 22:30 (GMT). 图 3 中白线标注时间段的声学信号信噪比较高, 图 4 给出这 5 个时间段 (垂直黑线标记其间隔) 水平阵第 8 通道记录声信号振幅随频率和时间的变化, 可以看出声信号振幅谱随时间有明显的变化, 引起这种变化的主要原因是海

图 1 实验设备部设图

Figure 1 Experiment configuration.

图 2 实验期间水平阵某一通道接收的一段声信号

(a) 原始接收信号; (b) 脉冲压缩后声信号; (c) 图(b)中第一次声学信号中第 6 个信号的放大

Figure 2 Received signals from one channel. (a) Original signals; (b) received LFM signals after pulse compress; (c) the expanding of the sixth pulse compressed signal of the first acoustic signal shown in (b).

水声速剖面起伏.

利用实验期间测量的水文资料, 提取海水声速剖面 EOF. 图 5(a)中的灰线是图 3 中所有海水温度计算得到的海水声速剖面, 表示为以下矩阵形式:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{K1} & c_{K2} & \cdots & c_{KN} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中 N 为时间采样点数, K 为深度采样点数. 对声速剖面按时间求平均即对 $\mathbf{C}$ 按列求平均可得不同深度

图3 实验期间温度链测量海水温度随时间的变化

(a) 接收阵附近温度链测量结果; (b) 声源附近温度链测量结果

Figure 3 The temperature profiles measured from two temperature chains. (a) Temperature profiles at source site; (b) temperature profiles at receiver site. In which the start time was 22:30 (GMT), June 7, 2010 and the white lines indicated the time period with higher SNR.

的平均声速 $\bar{C} = [\bar{c}_1 \bar{c}_2 \cdots \bar{c}_k]^T$, 如图 5(a) 中黑线所示. 公式(1)中不同时间的声速剖面减去平均声速剖面得

图5 提取的海水声速剖面的经验正交函数

(a) 海水声速剖面样本(灰线)及其平均海水声速剖面(黑线); (b) 海水声速剖面起伏; (c) 前 15 阶 EOF 所能表示海水声速剖面起伏的能量百分比; (d) 前三阶经验正交函数

Figure 5 EOF analysis for the observed water column SSPs. (a) SSPs (gray lines) and the averaged SSP (black line); (b) residual SSPs; (c) percent of total fit energy with limited sets of EOFs; (d) first three EOFs.

图4 高信噪比时间段声信号振幅谱随时间的变化

Figure 4 The amplitude spectrum of the signals with higher SNR at the time periods shown in Figure 3.

到不同时间的声速起伏矩阵:

$$\Delta C = C - \bar{C}, \quad (2)$$

由图 5(b) 给出. 声速起伏的协方差矩阵 $R = \Delta C \Delta C^T$, 对它进行特征值分解:

$$R F = D F, \quad (3)$$

其中 D 为特征值矩阵, $d_{ij} = \lambda_i \delta_{ij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, M$), λ_i 为矩阵 R 的特征值, F 是 R 的特征向量组成的矩阵, 表示为 $F = [f_1(z) \ f_2(z) \ \cdots \ f_k(z)]^T$. 特征值 λ_i 对应的特

征向量 $f_i(z)$ 即为第 i 阶 EOF. 任一海水声速剖面可以用前 M 阶 EOF 近似表示:

$$c(z) = \bar{c}(z) + \sum_{i=1}^M a_i f_i(z), \quad (4)$$

图 5(c) 给出前 15 阶 EOF 所能表示海水声速剖面起伏的能量百分比, 可见, 前三阶 EOF 可以表示将近 90% 的声速剖面起伏, 所以此海域海水声速剖面可用前三阶 EOF 近似表示, 图 5(d) 给出前三阶经验正交函数.

2 海水声速剖面起伏对声场干涉结构的影响

在海洋波导中声波以简正波叠加的形式传播, 不同号简正波将发生干涉, 使得声场具有稳定干涉结构, 表现为声强的距离-频率图上出现明暗相间的条纹. 由简正波理论, 当收发距离为 r 、接收器深度为 z 时, 频率域声压信号的 $P(\omega, r, z)$ 可表示为^[18]

$$P(\omega, r, z) = \sum_l A_l(\omega, r, z) e^{i[\mu_l r + \frac{\pi}{4}]}, \quad (5)$$

其中 μ_l 是第 l 号简正波的水平波数, $A_l(\omega, r, z)$ 是第 l 号简正波的振幅, 可表示为

$$A_l = \phi_l(z) \phi_l(z_s) / \sqrt{\mu_l r}, \quad (6)$$

z_s 是声源深度, ϕ_l 是第 l 号简正波的本征函数. 声强可表示为

$$I(\omega, r, z) = \sum_l A_l^2 + \sum_{l \neq k} A_k A_l \exp\{i[\mu_k(\omega) - \mu_l(\omega)]r\}. \quad (7)$$

当角频率、距离变化较小时, 声强表示为

$$I(\omega + \Delta\omega, r + \Delta r, z) = \sum_l A_l^2 + \sum_{l \neq k} A_k A_l \exp\left\{i[\mu_k(\omega) - \mu_l(\omega)]r + i\omega\left[\frac{1}{v_k^p(\omega)} - \frac{1}{v_l^p(\omega)}\right]\Delta r + i r\left[\frac{1}{v_k^g(\omega)} - \frac{1}{v_l^g(\omega)}\right]\Delta\omega\right\}, \quad (8)$$

其中 v_l^p , v_l^g 分别为第 l 号简正波的相速度、群速度. 考虑任意 k, l 两号简正波的干涉, 当

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta r} = \beta_{kl} \frac{\omega}{r}, \quad (9)$$

其中

$$\beta_{kl} = -\frac{\frac{1}{v_k^p} - \frac{1}{v_l^p}}{\frac{1}{v_k^g} - \frac{1}{v_l^g}}, \quad (10)$$

即得

$$I(\omega + \Delta\omega, r + \Delta r, z) \approx I(\omega, r, z). \quad (11)$$

β_{kl} 描述了声强的距离-频率图上第 k, l 两号简正波干涉条纹的斜率, 由公式(10)可知, 它蕴含着声信道信息.

本文利用 2010 年 6 月南海海洋声学层析专题实验测量的水文数据, 数值模拟的研究海水声速剖面时间起伏对声场干涉结构的影响. 图 6(a) 是实验期间发射点温度链实测的三条海水声速剖面, 图 6(b) 到 (d) 分别是三条海水声速剖面用 KRAKENC 程序^[19] 计算得到水平阵接收声场强度的距离-频率结构, 其中收发距离 40 km, 水平阵阵长 210 m, 频率 160-250 Hz. 可以看出, 海水声速剖面起伏明显的影响了声强的距离-频率条纹分布结构. 声强的距离-频率干涉结构是由声场中简正波两两干涉综合而成, 为进一步说明海水声速剖面对声场干涉结构的影响, 本文用实验中观测到的一段有明显起伏的海水声速剖面, 数值计算了简正波两两干涉产生条纹的 β 值. 图 7(a) 是图 3(b) 中第 4 到 11 小时的海水温度剖面计算得到的海水声速剖面, 可以看出此段时间内有孤立子内波经过. 用图 7(a) 中各个时刻的海水声速剖面, 通过公式(10) 计算所有号简正波两两干涉的 β 值, 频率 175-225 Hz. 不失一般性, 本文给出第 2 号简正波与第 1, 4, 5 号简正波干涉条纹的 β 值, 如图 7(b)-(d) 所示. 可以看出, 声场中各号简正波间干涉条纹变化与海水声速剖面起伏具有很强的一致性.

3 匹配声强干涉结构反演海水声速剖面算法及实验结果

基于水平阵接收声场强度的距离-频率条纹结构, 构建反演海水声速剖面的代价函数, 表示为

$$\text{Costf}(\mathbf{a}) = 1 - \left| \sum_{q=1}^N \sum_{j=1}^{M_f} (A_q^m(f_j) A_q^c(\mathbf{a}, f_j))^2 \right| K^{-1}, \quad (12)$$

其中, $\mathbf{a}$ 是待反演参数组, N 是水平接收阵阵元个数, M_f 指频率点数:

$$A_q^m(f_j) = |P_q^m(f_j)| - \sum_{j=1}^{M_f} |P_q^m(f_j)| (NM_f)^{-1}, \quad (13)$$

$$A_q^c(\mathbf{a}, f_j) = |P_q^c(\mathbf{a}, f_j)| - \left(\sum_{q=1}^N \sum_{j=1}^{M_f} |P_q^c(\mathbf{a}, f_j)| \right) (NM_f)^{-1}, \quad (14)$$

P_q^m, P_q^c 分别是第 q 阵元的实测声场和拷贝声场. K 是

图6 海水声速剖面起伏对声强距离-频率条纹结构的影响

(a) 实验期间发射点测量的三条海水声速剖面; (b) 使用(a)中直线所示海水声速剖面计算的声强距离-频率条纹结构; (c) 使用(a)中虚线所示海水声速剖面计算的声强距离-频率条纹结构; (d) 使用(a)中点线所示海水声速剖面计算的声强距离-频率条纹结构

Figure 6 The influence of SSP fluctuation on acoustic intensity range-frequency striations. (a) the SSPs measured during the experiment at the source site; (b) the simulated acoustic intensity range-frequency striations by the SSP shown in (a) by solid line; (c) The simulated acoustic intensity range-frequency striations by the SSP shown in (a) by dashed line; (d) the simulated acoustic intensity range-frequency striations by the SSP shown in (a) by dotted line.

图7 海水声速剖面起伏对声场中简正波间干涉条纹斜率的影响

(a) 图3(b)中由第4到11小时的水温计算得到的海水声速剖面; (b) 用(a)中对应时刻海水声速剖面计算得到的第1, 2阶简正波干涉条纹的 β 值; (c) 用(a)中对应时刻海水声速剖面计算得到的第2, 4阶简正波干涉条纹的 β 值; (d) 用(a)中对应时刻海水声速剖面计算得到的第2, 5阶简正波干涉条纹的 β 值

Figure 7 The effect of SSP fluctuation on the slope of the striation caused by interference between acoustic modes. (a) the SSPs calculated by the temperature profiles from the 4th to 11th hour shown in Figure 3(b); (b) the calculated β values of the striations caused by the interference between the first and the second normal modes using the corresponding SSPs shown in (a); (c) the calculated β values of the striations caused by the interference between the second and the fourth normal modes using the corresponding SSPs shown in (a); (d) the calculated β values of the striations caused by the interference between the second and the fifth normal modes using the corresponding SSPs shown in (a).

归一化系数, 满足:

$$K = \sqrt{\sum_{q=1}^N \sum_{j=1}^{M_f} (A_q^m(f_j))^4 \sum_{q=1}^N \sum_{j=1}^{M_f} (A_q^c(\alpha, f_j))^4}. \quad (15)$$

反演海水声速剖面的流程如图 8 所示, 拷贝场计算中所用声速剖面通过公式(4)用 EOFs、平均海水声速剖面 and 待反演参数组计算. 匹配器的代价函数如公式(12)所示, 为提高计算速度同时避免局部极小值, 本文采用并行化的网格全局搜索算法, 对待反演参数在一定范围内进行全局网格搜索, 找到使代价函数取得最小值的最优参数组, 把最优参数组带入公式(4)得到反演的海水声速剖面. 反演中所用拷贝声场如公式(5)和(6)所示, 用 KRAKEN 程序^[19]计算. 图 9 给出数值模拟的代价函数对前两阶经验正交函数系数的模糊度表面. 其实测声场由 KRAKEN 程序计算,

图 8 反演流程

Figure 8 The flowchart of the inversion.

图 9 前两阶经验正交函数的模糊度表面

Figure 9 The EOF1-EOF2 ambiguity surface.

频带范围 160–250 Hz, 频率间隔 1 Hz, 设水平不变海洋环境, 海深 94.5 m, 海水声速剖面用如图 5(a)中黑线所示平均声速剖面, 单层海底, 声学参数分别为: 声速 1585 m/s, 密度 1.8 g/cm³, 衰减 0.11 dB/λ. 由图 9 可见, 搜索结果与真值一致, 代价函数具有较好的收敛性.

分析图 3 中白线标记时间段水平阵接收声信号, 提取空间-频率域的声场振幅, 用公式(12)所示代价函数反演海水声速剖面. 把海水声速剖面通过公式(4)用图 5(d)所示前三阶 EOF 表示, 前三阶 EOF 的系数作为待反演量, 搜索范围如表 1 所示. 反演中使用的信号频带范围 175–220 Hz, 频率间隔 1 Hz. 海底采用具有沉积层的两层模型, 海底声学参数由本次实验之前的一次实验得到, 具体列出如下: 沉积层声速 1585 m/s, 密度 1.6 g/cm³, 衰减 0.11 dB/λ; 基底声速 1650 m/s, 密度 1.8 g/cm³, 衰减 0.14 dB/λ. 声源到接收阵的声传播路线上海底相对平缓, 平均海深 98.2 m, 考虑到潮汐的影响, 反演中也对海水深度进行了 ±2 m 的小范围搜索. 反演结果如图 10 和 11 所示, 图 10 给出图 3 中第 5 个时间段也就是第 25 到 26 小时信号的反演结果与实测结果的比较, 实线是反演结果, 虚线是直接测量结果, No. 是信号序列号, 这里只给出偶数序列信号反演结果, Δc 指反演声速剖面与实测声速剖面的标准差. 图 11 是所有信号(共 524 个)反演结果, 图 11(a)是每个信号的反演结果与实测结果的标准差, 图 11(b)是所有信号反演标准差的柱状分布图, 524 个信号中 440 个信号反演误差小于 1 m/s.

4 总结

基于 2010 年 6 月南海海域海洋声学层析专题实验中测量的水文和声学同步数据, 研究匹配声场干涉结构反演海水声速剖面方法. 对实验中观测的水文资料进行了分析, 提取了此海域声速剖面的经验正交函数(EOF). 数值模拟了海水声速剖面起伏对声

表 1 待反演参数搜索范围

Table 1 Search bounds of the first three EOFs.

反演参数	参数标识	下边界	上边界
第一阶 EOF 系数	EOF1	-35	25
第二阶 EOF 系数	EOF2	-15	15
第三阶 EOF 系数	EOF3	-8	8

图 10 第 25 到第 26 小时信号反演海水声速剖面与实际测量海水声速剖面的比较
Figure 10 Comparison of the inversion results with data measured during the 25th to 26th hour.

图 11 全部信号反演海水声速剖面与对应时刻实测声速剖面的标准差
(a) 每个信号反演标准差; (b) 所有信号反演标准差的柱状图分布
Figure 11 The STDs of all inversion results (a) and their distribution (b).

场干涉结构的影响, 证明了匹配声场干涉结构反演海水声速剖面的可能性. 构建了匹配声场干涉结构反演海水声速剖面的代价函数. 对实验中水平阵记录的实验数据进行了分析, 提取了 524 个较高信噪比

信号反演海水声速剖面, 把反演结果与实测结果进行了比较, 计算了反演标准差. 结果表明, 反演结果与实测结果符合得较好, 524 个信号中有 440 个信号反演标准差小于 1 m/s.

致谢 感谢海上实验的全体工作人员, 是他们的辛勤劳动为本文提供了可靠的实验数据.

参考文献

- 1 Munk W, Worcester P, Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography. New York: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995. 6–58
- 2 LeBlanc L R, Middleton F H. An underwater acoustic sound velocity data model. *J Acoust Soc Am*, 1980, 67(6): 2055–2062
- 3 Tolstoy A, Diachok O, Frazer L N. Acoustic tomography via matched field processing. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89(3): 1119–1127
- 4 Tolstoy A. Linearization of the matched-field processing approach to acoustic tomography. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91(2): 781–787
- 5 Shang E C. Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory. *J Acoust Soc Am*, 1989, 85(4): 1531–1537
- 6 Skarsoulis E K, Athanassoulis G A, Send U. Ocean acoustic tomography based on peak arrivals. *J Acoust Soc Am*, 1996, 100(2): 797–813
- 7 Taroudakis M I, Markaki M G. On the use of matched-field processing and hybrid algorithms for vertical slice tomography. *J Acoust Soc Am*, 1997, 102(2): 885–895
- 8 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]
- 9 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]
- 10 Zhang Z B, Ma Y L, Yan S F. The effect of sediment Parameters on sound speed profile using time differences of acoustic ray arrivals in shallow water (in Chinese). *Appl Acoust*, 2002, 21(3): 11–17 [张忠兵, 马远良, 鄢社锋. 浅海中沉积层参数对多途到达时差反演声速剖面的影响. *应用声学*, 2002, 21(3): 11–17]
- 11 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]
- 12 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): 1–4
- 13 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]
- 14 Yu Y X, Li Z L, He L. Matched-field inversion of sound speed profile in shallow water using parallel genetic algorithm. *Chin J Oceanology Limnology*, 2010, 28(5): 1080–1085
- 15 Rouseff D, Petnikov V J. Effect of shallow water variability on the waveguide invariant distribution. *Acoust Soc Am*, 2009, 125(4): 2703
- 16 Zhou S H, He L, Ren Y, et al. Autocorrelation-function-based estimation approach and variability of waveguide invariant in fluctuated shallow water. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131(4): 3451
- 17 Kuz'kin V M. Frequency shifts of the sound field interference pattern in a shallow sea. *Acoust Phys*, 1999, 45: 224–229
- 18 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational Ocean Acoustics. New York: Springer, 2011. 337–452
- 19 Porter M B. The KRAKEN Normal Mode Program. SACLANT Undersea Research centre, 1995

Sound speed profile inversion by matching the acoustic intensity striations in shallow water

HE Li^{1*}, LI ZhengLin^{1,2}, ZHANG RenHe¹ & LI FengHua¹

¹ State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² Haikou Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Haikou 570105, China

Estimating the sound speed profile by matching the acoustic intensity striation using a mounted horizontal line array is investigated. Due to constructive and destructive interference between normal modes, the acoustic intensity manifests range-frequency striation structure in shallow water. Using the environment and acoustic data measured during a tomography experiment conducted in the South China Sea in June, 2010, the possibility and validity of inverting for the water column sound speed profile by matching the acoustic intensity striations are studied. The results show that the fluctuation of the sound speed profile has obvious influence on the acoustic intensity striations. The acoustic data recorded in an experiment conducted in the South China Sea in June 2010 are analyzed to invert for the sound speed profiles. The sound speed profile is represented by Empirical Orthogonal Functions (EOFs) to reduce the unknown parameters. The estimates agree well with the measured sound speed profiles and most of the standard deviations are less than 1 m/s.

sound speed profile, acoustic intensity striations, horizontal line array

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Wi

doi: 10.1360/132012-817