声源深度对浅海匹配场层析的影响

牛海强^{①②*}, 李整林^{①③}, 何利^①, BADIEY Mohsen^④

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 中国科学院大学, 北京 100049;

③ 中国科学院声学研究所南海研究站, 海口 570105;

④ College of Earth, Ocean, and Environment, University of Delaware, Newark, Delaware 19716, USA

*联系人, E-mail: nhq@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2012-09-29; 接受日期: 2012-11-01

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10974218, 11125420)

摘要 许多浅海实验已经表明匹配场层析是进行海水声速剖面反演的一种有效方法. 利用新泽西附近海域浅海实验(SWARM95)中不同深度的气枪声源的信号, 分析了声源深度对匹配场反演声速剖面的影响. 为了减少待反演的参数, 声速剖面用经验正交函数(EOFs)表示. 由于在所研究的时间段内声传播的路径与内波的传播方向基本垂直, 所以沿声传播方向上的声速剖面接近水平不变. 将匹配场反演得到的平均声速剖面与实际测量值作对比, 发现位于温跃层之上的声源的反演结果要优于位于温跃层之下的声源的反演结果. 出现这种现象的原因是在负声速梯度的条件下, 位于跃层下的声源可有效激发低号简正波, 而主要能量的低号简正波主要在跃层下传播. 相比之下, 跃层之上的声源可主要激发高号简正波, 而这些高号的简正波具有较大的掠射角, 在整个水体中传播, 因此携带了水体更多的信息.

关键词 声层析, 匹配场反演, 经验正交函数, 简正波

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Wi, 43.30.Bp

doi: 10.1360/132011-1230

利用声学手段监测海洋环境一直是水声研究的热点之一. 海洋声层析的概念首先是由 Munk 和 Wunsch^[1]在 1979 年提出来的, 通过测量射线的传播时间来获取海洋环境的信息. 之后, 基于模态到达时间^[2]或信号峰值到达时间^[3]的方法被应用到海洋声层析中. 这些方法都是线性反演的方法, 其局限性在于需要确定信号准确的到达结构. 与这些基于传播时间的反演方法相比, 匹配场层析的方法可以应用在更加普遍的环境下. 匹配场方法的原理是将数值计

算得到的拷贝场与测量得到的实测场构成代价函数, 通过寻找代价函数的最大值来估计待反演的参量. 许多浅海实验已经表明了匹配场方法反演声速剖面的有效性^[4-8]. 在实际的海洋波导环境中, 声源的深度不同导致激发有效简正波的能量不同, 进而对匹配场声层析的性能也会产生一定的影响. 本文通过理论研究和实验数据分析了不同声源深度下匹配场层析的性能.

新泽西附近海域的一次浅海实验中一段时间内

引用格式: 牛海强, 李整林, 何利, 等. 声源深度对浅海匹配场层析的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: s131-s137

Niu H Q, Li Z L, He L, et al. Effect of source depth on shallow water tomography (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: s131-s137, doi: 10.1360/132011-1230

温度链测量得到的海洋水文数据显示: 沿声传播路径上的声速剖面在距离方向上变化缓慢. 实验的声源为位于不同深度的气枪, 所以该时间段内的实验数据可很好地用于研究水平不变环境下声源深度对匹配场反演声速剖面的影响. 本文首先从温度链记录的数据中提取经验正交函数, 然后利用该时间段内的 66 个气枪声源的信号进行声速剖面反演, 给出声源位于不同深度时的反演结果, 并将反演结果与对应的实测声速剖面作对比, 然后给出声源深度不同造成反演结果不同的解释.

1 SWARM95 实验概况及海水声速剖面的经验正交函数表示

1995 年夏季, 美国多个海洋与声学研究单位在新泽西浅海大陆坡附近进行了一次大型的随机介质中的声传播实验. 这次实验的主要目的是研究浅水波导中声场与线性内波和非线性内波的相互作用. 此次实验获取了大量高质量的物理海洋学和声学数据. 文献[9]对 SWARM95 实验进行了详细的综述. 本文关注的是其中沿大陆架等深线方向的一个子实验, 传播路径上平均海深 71 m. 实验设备的布设情况如图 1 所示. 图 1 中圆圈为 16 个阵元垂直接收阵布放位置, 垂直阵深度分布在 14.9–67.4 m 范围, 每个水听器之间垂直间隔约 3.5 m^[9]. 实验中三条温度链的位置在图 1 中分别用三角形和矩形表示, 每个温度传感器的采样周期是 60 s. 实验船(R/V Cape Hatteras)在接收阵西南方向约 14.96 km, 从 1995 年 7

月 31 日至 1995 年 8 月 5 日实验船在该站点停留了共 6 天, 其位置在图 1 中用星号表示. 在该段时间内, 发射了两种形式的信号: 线性调频信号和气枪信号. 悬挂在声源下方的单个监测水听器接收到的气枪信号表明气枪发射的声脉冲信号具有很好的一致性^[10], 本文主要用其中的气枪声源信号.

图 2(a)给出时间段 8 月 4 日 18:58~20:35 气枪声源的深度. 从图 2(a)中可看出, 前 28 分钟气枪声源位于标称深度 10 m 处, 19:54 之后声源位于标称深度 30 m 处. 图 2(b)给出声源深度 10 m 时接收到的气枪信号实例, 图 2(c)给出声源深度 30 m 时接收到的气枪信号的实例, 声源距离接收阵的水平距离为 14.96 km. 比较图 2(b)和图 2(c)可见, 与文献[11]类似, 声源位于跃层之上激发高号简正波, 其传播速度较快.

图 1 SWARM95 实验设备布放图
Figure 1 Experiment geometry in SWARM95.

图 2 (a) 气枪声源的深度随时间的变化(横坐标第一个点对应时刻 18:58); (b) 声源深度 10 m 时接收到的气枪信号实例; (c) 声源深度 30 m 时接收到的气枪信号实例

Figure 2 (a) The source depths during two different periods; (b) One sample of signals produced by the airgun at 10 m; (c) One sample of signals produced by the airgun at 30 m.

本文分别利用 18:58–19:26 和 19:54–20:30 两个时间段接收到的气枪信号反演海水声速剖面.

图 3 给出了从 8 月 4 日 12:00 至 8 月 5 日 12:00 根据 3 条温度链记录的温度数据得到的海水声速剖面. 图 3 中从上到下分别对应温度链 T307, T309, T598. 根据温度链的 GPS 位置数据和记录的温度数据(即不同温度链等温度层随时间变化序列的互相关)可确定出内波到达各温度链相对时间延迟, 进而估计出内波的波速为 1.08 m/s, 内波的传播方向大约是北偏西 56°.

为了减少匹配场反演的参数搜索空间, 待反演

的环境数据应用尽量少的参数表征. EOFs 是一种有效地表征声速剖面的基函数. 任一声速剖面可用前 M 阶 EOF 近似表示为

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

其中 $\bar{c}(z)$ 为平均声速, $f_i(z)$ 为第 i 阶经验正交函数. 这样反演声速剖面就转化为反演前 M 阶 EOF 的系数. 从温度链 T598 记录的长时间温度数据提取出的前三阶 EOF 如图 4(a)所示. 图 4(b)为前 n 阶 EOF 所能表示声速剖面起伏的能量百分比, 由图中可见前三阶 EOF 能够表示约 90% 的声速剖面的起伏, 因此待反

图 3 三条温度链测量得到的海水声速剖面随时间变化

(a) 温度链 T307; (b) 温度链 T309; (c) 温度链 T598

Figure 3 The SSPs measured by the three thermistor strings. (a) String 307; (b) String 309; (c) String 598.

图 4 由温度链提取出的海水声速剖面的经验正交函数

(a) 前三阶 EOF; (b) 前 n 阶 EOF 所能表示声速起伏的能量百分比

Figure 4 The extracted EOFs (a) The first three EOFs; (b) Percent of total energy.

演的海水声速剖面可用前三阶 EOF 近似表示.

2 SWARM95 实验海水声速剖面反演

匹配场反演的代价函数使用宽带相干处理器^[12], 即在参数域中寻找一组 EOF 系数 α_0 使得代价函数

Costf(α)=1−∑Np=1∑Nq=p+1∑Mfj=1Dpq(fj)Mpq∗(α,fj)K−1 (2)

达到最小. 公式(2)中, $D_{pq}(f)$ 为两个阵元实际接收声信号的归一化互功率谱, 即

Dpq(f)=Dp(f)Dq∗(f)/|Dp(f)Dq(f)|, (3)

$D_p(f)$ 为第 p 个水听器接收的复声压. $M_{pq}(f)$ 为根据海洋环境参数由声场模型数值计算的两个阵元接收声信号的归一化互功率谱, 表示为

Mpq∗(f)=Mp∗(α,f)Mq(α,f)/|Mp(α,f)Mq(α,f)|, (4)
 $M_p(\alpha, f)$ 是第 p 个水听器处的理论计算的复声压. α 表示待反演的参数组, N 为水听器阵的阵元数, M_f 为频率的点数, 上标“*”表示复数共轭. K 为归一化系数, 满足

K=(∑Np=1∑Nq=p+1∑Mfj=1|Dpq(fj)|2)1/2
×(∑Np=1∑Nq=p+1∑Mfj=1|Mpq(fj)|2)1/2. (5)

考虑到气枪信号能量主要集中在低频, 所以反演中使用的信号频带范围为 20–100 Hz, 海底采用图 5 所示两层海底模型, 即海底包括沉积层和基底, 沿大陆架方向的海深基本保持不变, 约为 71 m, 由 GPS 的数据可计算得到收发距离为 14.96 km. 海深和收发距离均为实验测量数据. 根据文献[13], 选取的海底参数见表 1. 将前三阶 EOF 的系数作为待反演量, 匹配场采用的全局搜索算法为遗传算法, 每代总人口数为 60, 共遗传 300 代, 并通过多次平行计算确保代价函数收敛于最小值. 前三阶 EOF 系数的搜索范围见表 2.

对 18:58–19:26 和 19:54–20:30 两个时间段共 66 个气枪信号进行匹配场反演, 得到 66 组 EOF 系数的值. 其中前 33 组为利用位于温跃层之上声源(深度 10 m)信号反演的结果, 后 33 组为利用位于温跃层之下声源(深度 30 m)信号反演的结果. 图 6 给出利用两种不同深度的声源反演得到的前三阶 EOF 系数的结果.

图 5 海洋环境模型

Figure 5 Model of ocean environment.

表 1 匹配场反演使用的海底参数

Table 1 Parameters of sea floor for matched-field inversions

海底参数	参数标识	数值
沉积层厚度(m)	d	60.0
沉积层密度(g/cm ³)	ρ_{sed}	1.86
沉积层衰减系数(dB/λ)	α_{sed}	0.135
沉积层声速(m/s)	c_{sed}	1708
基底密度(g/cm ³)	ρ_{sub}	2.66
基底衰减系数(dB/λ)	α_{sub}	0.59
基底声速(m/s)	c_{sub}	1928

表 2 前三阶 EOF 系数的搜索范围

Table 2 Parameter search boundaries

反演参数	参数标识	下边界	上边界
第一阶 EOF 系数	EOF1	−100	100
第二阶 EOF 系数	EOF2	−40	40
第三阶 EOF 系数	EOF3	−40	40

从图 6 可看出, 利用不同深度的声源进行匹配场声速反演会得到不同的结果, 利用位于温跃层之上的声源反演得到的结果较为稳定.

3 反演结果的对比及解释

根据公式(1)和反演得到的图 6 中的 EOF 系数值, 可以重构出海水声速剖面. 恢复出的 66 个声速剖面由图 7 给出, 其中: 黑色竖线左侧的前 33 个声速剖面为使用跃层上(深度 10 m)声源反演结果, 而竖线右侧 33 个声速剖面为使用跃层下(深度 30 m)声源反演结果. 为了比较两种不同深度声源反演结果的优劣, 将声速剖面的反演结果与实测声速剖面作对比, 这里实测声速指的是信号发射时间段内声传播路径上的声速剖面的平均值. 对于每一个气枪信号, 根据信号的发射时刻和内波的传播波速、方向, 均可以计算出

图 6 反演得到的前三阶 EOF 系数(图中实线为 10 m 处声源的反演结果, 虚线为 30 m 处声源的反演结果)

(a)(d)第一阶 EOF 系数; (b)(e)第二阶 EOF 系数; (c)(f)第三阶 EOF 系数

Figure 6 The inverted first three-order EOF coefficients (The solid lines indicate results inverted by the sources at depth of 10 m; the dashed lines indicate results inverted by the sources at depth of 30 m). (a)(d) EOF coefficient of 1st order; (b)(e) EOF coefficient of 2nd order; (c)(f) EOF coefficient of 3rd order.

相应的声传播路径上的平均声速剖面. 图 8 给出温度链实测的 66 个气枪信号所分别对应的平均声速剖面的值. 由于声传播的路径与内波的传播方向几乎垂直, 故声传播路径方向上的声速剖面变化缓慢, 不同气枪信号所对应的平均声速值相差很小. 从图 8 可见声传播路径上的海水声速剖面平均值在研究的时间段内基本保持不变.

为了进一步分析不同深度声源的匹配场反演误差, 将图 7 所示的重构出的声速剖面与图 8 所示的实

图 7 匹配场反演恢复的声速剖面

(a) 10 m 处声源反演的声速剖面; (b) 30 m 处声源反演的声速剖面

Figure 7 SSPs inverted by matched-field tomography. (a) SSPs inverted by sources at depth of 10 m; (b) SSPs inverted by sources at depth of 30 m.

图 8 温度链实测的气枪信号对应的声传播路径上的声速剖面平均值

Figure 8 The mean SSPs along the acoustic signal propagation path measured by the thermistor string.

测平均声速剖面作差并取绝对值, 得到 66 个声速剖面对应的反演误差. 图 9 所示为海水声速的反演误差, 其中图 9(a)为由跃层上(深度 10 m)声源反演得到的声速误差, 图 9(b)为跃层下(深度 30 m)声源反演得到的声速误差. 由图 9 可见, 由 10 m 深度处的声源反演得到的声速误差的最大值为 6 m/s, 而由 30 m 深度处的声源反演得到的声速误差的最大值达 15 m/s. 图 9 所示的 66 次反演的声速误差表明, 位于温跃层之上声源的匹配场反演精度优于位于温跃层之下声源的反

图9 匹配场反演的声速误差

(a)跃层上(深度 10 m)声源反演的声速误差; (b)跃层下(深度 30 m)声源反演的声速误差

Figure 9 SSP errors for matched-field tomography. (a) SSP errors inverted by sources at depth of 10 m; (b) SSP errors inverted by sources at depth of 30 m.

演结果. 其主要原因是负声速梯度的环境条件下, 声源深度不同使得激发声场中各号简正波的能量组成不同, 即: 较浅的声源激发的高号简正波具有更多的能量, 而这些高号的简正波具有较大的掠射角, 与整个水体的作用次数多, 所以携带了水体更多的信息, 对声速更加敏感, 使得匹配场反演的性能更好. 而跃层下声源主要激发的低号简正波能量比例较大, 这些低号简正波的对应的掠射角较小, 并主要在跃层下传播, 对温跃层变化不敏感.

4 总结

利用新泽西浅海大陆坡 SWARM95 实验中的声学和水文数据研究了声源深度对浅海声层析性能的影响. 为减少待反演的参数, 由温度链长时间记录的温度数据提取了多阶经验正交函数(EOFs), 并且最终使用前三阶 EOFs 来表示此海域的声速剖面. 利用垂直阵接收到的 2 组不同声源深度的 66 个气枪信号进行了海水声速剖面的声学反演, 并将反演结果与实测的平均声速剖面作对比, 结果表明声源位于温跃层之上给出的反演声速剖面更稳定且比声源位于温跃层之下反演结果的误差更小. 造成这种反演结果差异的本质原因是不同深度声场激发的不同号简正波能量比例不同, 这些简正波传播速度对温跃层敏感深度不同.

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 H, Wunsch C. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring. *Deep-sea Res*, 1979, 26(A): 123–161
- 2 Taroudakis M I, Papadakis J S. A modal inversion scheme for ocean acoustic tomography. *J Comput Acoust*, 1993, 1(4): 395–421
- 3 Skarsoulis E K, Athanassoulis G A, Send U. Ocean acoustic tomography based on peak arrivals. *J Acoust Soc Am*, 1996, 100(2): 797–813
- 4 Tolstoy A, Diachok O, Frazer L N. Acoustic tomography via matched field processing. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89(3): 1119–1127
- 5 Tolstoy A. Linearization of the matched-field processing approach to acoustic tomography. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91(2): 781–787
- 6 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
- 7 He L, Li Z L, Zhang R H, et al. Sound velocity profile of the East China Sea expression by EOF and inversion by MFP. *Prog Nat Sci*, 2006, 3(16): 351–355 [何利, 李整林, 张仁和, 等. 东中国海声速剖面经验正交函数表示以及匹配场反演. *自然科学进展*, 2006, 16(3): 351–355]
- 8 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]
- 9 Apel J R, Badiey M, Chiu C S, et al. An overview of the 1995 SWARM shallow-water internal wave acoustic scattering experiment. *IEEE*

- J Ocean Eng, 1997, 22: 465–500
- 10 Badiy M, Mu Y, Lynch J, et al. Temporal and azimuthal dependence of sound propagation in shallow water with internal waves. IEEE J Ocean Eng, 2002, 27(1): 117–129
 - 11 Li Z L, Zhang R H, Badiy M, et al. Arrival time fluctuation of high order normal modes caused by solitary internal waves (in Chinese). Acta Acust, 2011, 36(6): 559–567 [李整林, 张仁和, Badiy M, 等. 孤立子内波引起的高号简正波到达时间起伏. 声学学报, 2011, 36(6): 559–567]
 - 12 Westwood E K. Broadband matched-field source localization. J Acoust Soc Am, 1992, 91(5): 2777–2789
 - 13 Jiang Y M, Chapman N R, Badiy M. Quantifying the uncertainty of geoacoustic parameter estimates for the New Jersey shelf by inverting air gun data. J Acoust Soc Am, 2007, 121(4): 1879–1894

Effect of source depth on shallow water tomography

NIU HaiQiang^{1,2*}, LI ZhengLin^{1,3}, HE Li¹ & BADIEY Mohsen⁴

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Haikou Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Haikou 570105, China;

⁴ College of Earth, Ocean, and Environment, University of Delaware, Newark, Delaware 19716, USA

Matched-field tomography (MFT) has been proved to be an efficient method in retrieving the sound-speed profile (SSP) in shallow water. The effect of source depth on MFT for SSPs in shallow water is examined by using the airgun signals at different depths in SWARM95 experiment. To reduce the unknown parameters, the SSPs are represented by empirical orthogonal functions (EOFs) in MFT. As the acoustic signal propagation path was nearly perpendicular to the direction of the internal wave, the SSP along the acoustic signal propagation path was almost range-independent. The inverted mean SSPs are compared with the experimental measurements. Inversion using the sources above the thermocline obtains a better performance than those using sources below the thermocline. The explanation is that, in the environment with negative velocity gradient, the shallower source excites more energy of higher-order normal modes, which are with larger grazing angles and carry more information of whole water column.

acoustic tomography, matched-field inversion, empirical orthogonal function, normal mode

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Wi, 43.30.Bp

doi: 10.1360/132011-1230