



海洋声学专刊·论文

深海海底反射区声源定位中的周期相似结构

陈连荣^{①②*}, 彭朝晖^①, 王光旭^①, 刘国勤^③^① 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 100190;^③ 海军驻上海江南造船(集团)有限责任公司军事代表室, 上海 201913

*联系人, E-mail: chenlianrong@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(批准号: 10974218, 11125420)资助项目

摘要 深海声源定位一直以来都是海洋声学的研究热点. 利用基于 Bartlett 处理器的匹配场定位技术, 对 2011 年 10 月南中国海宽带爆炸声实验中垂直短阵接收的声信号进行声源定位. 结果显示, 在某一限定的搜索距离范围内, 当实际收发距离在 40 km 以内时能够比较准确地定位. 当收发距离大于 40 km 时, 有很大一部分信号定位的距离出现了错误. 此时, 定位结果图中出现双峰结构, 两峰之间的距离大约 30 km. 通过简正波理论分析表明: 排除了环境参数的失配因素, 由于海域存在周期相似性声场结构是导致定位结果中出现双峰现象的主要原因, 理论推导和匹配场定位结果的现象吻合较好.

关键词 深海声源定位, 匹配场, 周期相似结构

PACS: 43.60.Kx, 43.30.Bp, 43.30.Cp

doi: 10.1360/132012-813

匹配场定位作为一种经典的水声定位方法, 自提出以来就成为海洋声学研究热点之一. 在过去几十年里, 国内外许多专家学者投入这方面的研究. 最早提出匹配场被动定位方法的是 Hinich^[1]. 之后, Bucker^[2]引入了模糊表面的概念, 应用实际的环境模型, 证明了水下声场有足够的信息来进行反演和定位, 他使用的检测因子被人们称为“常规匹配场处理(MFP)”. 之后, 匹配场处理方法得到了深入的研究和发展, 并提出了许多处理算法, 如 Bartlett 方法、最大似然方法、多约束法和区域聚焦方法等^[3-6].

匹配场定位方法在深海和浅海环境均有成功应

用, 其中, 有关深海匹配场定位方面的实验研究很多. Yang^[7]于 1987 年利用模式分解的方法研究在 4000 m 深北冰洋海洋波导中的声源定位问题, 成功地实现了对 260 km 距离低频信号源的定位; Tran 和 Hodgkiss^[8,9]在太平洋东北部 5000 m 的海水波导中进行了 165 km 距离上的匹配场被动定位实验, 实验中采用了一个长 900 m 的垂直阵, 通过实验分析, 发现了由于会聚区的存在和失配因素引起的会聚区模糊问题; Westwood^[10]采用宽带方法对在墨西哥湾深度为 4500 m 的深海区获得的数据进行了处理, 成功获得相距 43 km 内的声源位置.

引用格式: 陈连荣, 彭朝晖, 王光旭, 等. 深海海底反射区声源定位中的周期相似结构. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: s153-s158

Chen L R, Peng Z H, Wang G X, et al. Periodic analogical structure in the source localization in the reflection area of the deep ocean (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: s153-s158, doi: 10.1360/132012-813

2011年10月,中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室在南中国海海域进行了一次深海声传播实验,研究深海环境下利用垂直短阵进行宽带声源定位的问题.实验海区海深变化比较平缓,声速剖面为典型的深海声速剖面,存在着非完全深海声道.海底处的海水声速小于海面处的海水声速,在该环境下海底反射作用对海面附近声场的影响不能忽略.采用频间非相干的宽带 Bartlett 匹配器对实验的宽带爆炸声信号进行匹配场声源定位处理,拷贝场采用基于简正波理论的 KrakenC 模型计算.对定位的结果进行分析,发现定位结果中出现双峰结构,且收发距离在 40 km 以外时有相当一部分定位在错误的峰上.本文拟基于简正波理论,对这一现象,给出分析和解释.

1 实验介绍

宽带爆炸声信号匹配场定位实验于 2011 年 10 月在南中国海海域进行.实验采用双船作业形式,其中中国科学院声学研究所“实验 1 号”科学考察船作为接收船,在指定站点漂泊,中国科学院南海海洋研究所“实验 3 号”调查船作为发射船,沿预定航线航行.实验期间,接收船和发射船的 GPS 位置如图 1 所示.虚线表示发射船的航行轨迹.实验中发射船沿预定航线航行,并投放爆炸声信号源,爆炸声信号爆炸当量 1000 g TNT,爆炸标称深度 100 m.实线表示接收船在海风作用下的漂泊航迹.接收船布放 16 阵元垂直阵接收信号,声信号由 Sony 数字录音机记录,单通道采样频率为 24 kHz.实验期间,发射船对海深进行了测量,海深为 3655 m 左右.同时,接收船对海水水温、盐度、声速等水文参数进行测量,图 2 给出了匹配场计算所用的声速剖面.其中,从海面到海深 2000 m 处的声速数据是由海试中使用的声速仪测量获得的,声道轴在 1150 m 深度处,海面 40 m 深度存在表面声道.一般认为,在深海声道轴以下的声速剖面主要随深度变化,在一定时间内保持稳定,因此在 2000 m 以下的声速剖面由月平均水文数据库数据中获得.

2 垂直阵阵元姿态矫正

实验过程中,海风较大,接收船在风的作用下漂移速度较快,导致船载垂直阵倾斜.图 3 给出 16 个通

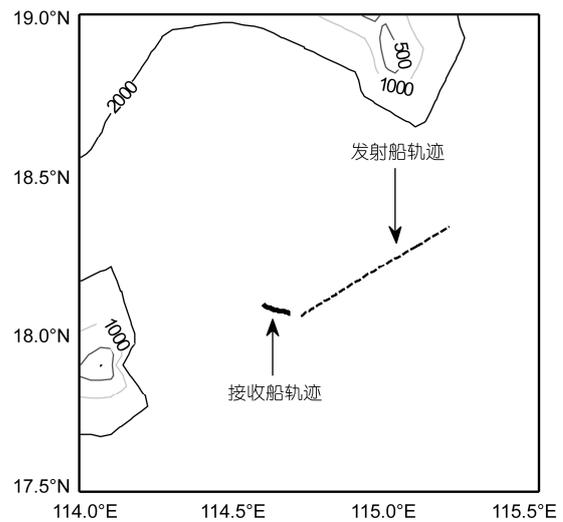


图 1 实验船只航迹图
Figure 1 Tracks of the research ships.

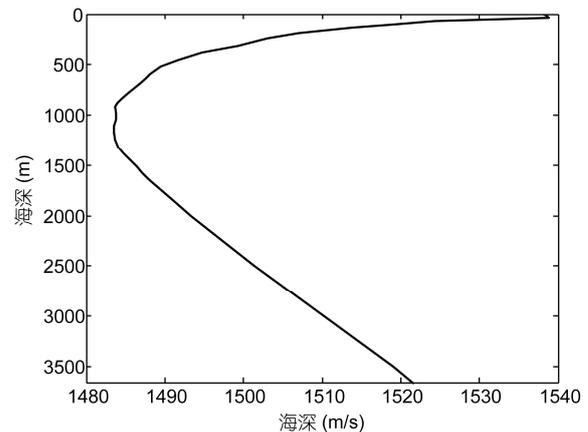


图 2 声速剖面图
Figure 2 Sound speed profile.

道接收的某一爆炸声信号的时域波形图,可以看出,由于阵的倾斜,各个通道接收到信号的时间有明显的相对时延.如果不考虑这一偏移量,计算的拷贝场与实验信号有较大的误差,影响定位结果.

对相邻两个通道之间的时域波形进行如公式(1)的相关处理,

$$\hat{R}_{xy}(m) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} y_n^*, & m \geq 0, \\ \hat{R}_{yx}^*(-m), & m < 0, \end{cases} \quad (1)$$

相关最大值对应的的时间就是两通道信号的相对时延,通过这个延迟和对应深度的声速来计算两个水听器的相对水平偏移.

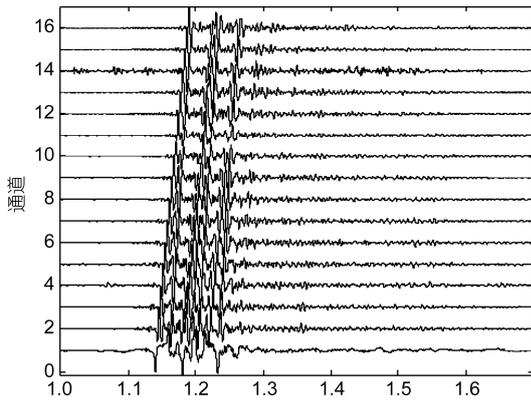


图3 16通道接收信号时域图
Figure 3 Receiving signals of 16 channels.

接收船垂直阵水听器上捆绑多个深度计, 用来测量实验过程中对应的深度, 根据各个水听器和深度计的距离, 通过线性插值方法得到各个水听器在实验过程中的平均深度. 由于实验持续时间较长, 垂直阵倾斜情况随时间变化, 因此在匹配场定位的过程中, 需要对每一个爆炸声信号接收时刻进行阵型校准. 图4给出接收阵在某一次爆炸声信号时的阵元相对位置.

3 匹配场定位处理

单频的 Bartlett 匹配器可以表示为^[11]

$$B_{MF}(r, z, f_j) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N p_i^e(f_j)^* p_i^c(f_j) \right|}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N |p_i^e(f_j)|^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N |p_i^c(f_j)|^2 \right]}}, \quad (2)$$

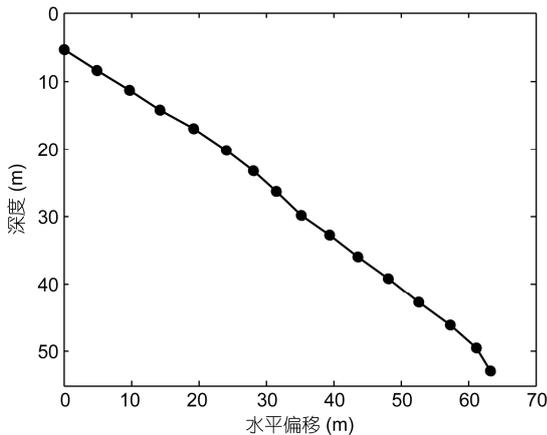


图4 某一时刻接收阵姿态图
Figure 4 Calibrated array shape.

式中 $p_i^e(f_j)$ 为第 i 个水听器接收到的复声压信号谱, $p_i^c(f_j)$ 为理论计算的复声压拷贝场, N 为水听器数, 上标“*”表示复数共轭. 对上式的 B_{MF} 做 M_f 个频点的求和平均即得到频间非相干的宽带 Bartlett 匹配器模糊度表面函数表达式:

$$\bar{B}_{MF}(r, z) = \frac{1}{M_f} \sum_{j=1}^{M_f} B_{MF}(r, z, f_j), \quad (3)$$

频率带宽从 89 Hz 到 112 Hz, 频率间隔 0.5 Hz. 对于水平不变的海洋环境, (2)式中的理论声压 $p_i^c(f_j)$ 可以由简正波理论计算, 表达式如下^[12]:

$$p(r, z) \cong \frac{i}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}} e^{-i\pi/4} \sum \Psi_m(z_s)\Psi_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}}, \quad (4)$$

其中 k_m 是第 m 号简正波对应的本征值, Ψ_m 是相应的第 m 号本征函数.

拷贝场计算所使用的海底参数, 如表1所示.

实验中, 已知爆炸声信号的标称深度是 100 m, 为减少计算量, 定位过程中将声源深度固定在 100 m 处, 只对声源距离进行搜索, 搜索范围从 1 km 到 100 km, 搜索步长 100 m. 这样模糊度表面就简化成一条曲线, 其相关值最大处的距离就是匹配场处理方法的定位距离. 图5给出了在整条航线上所有有效爆炸

表1 拷贝场计算海底参数

	声速 (m/s)	密度 (g/cm ³)	吸收 (dB/λ)
海深(3655-3705 m)	1540	1.6	0.03
海深(3705 m 以下)	1630	1.8	0.1

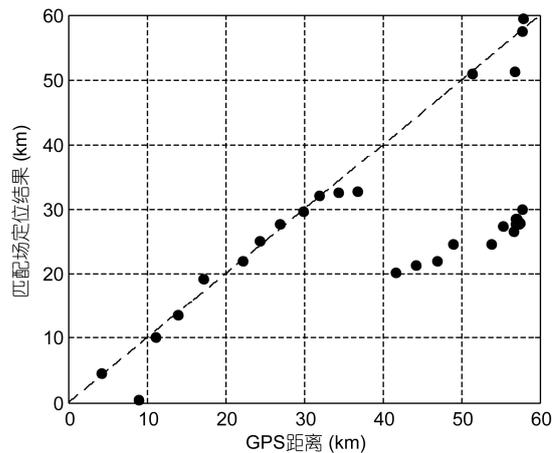


图5 全部声源定位结果图
Figure 5 MFP results of all explosive sources.

声源的定位结果. 从图中可以看出, 当爆炸声信号的收发距离在 40 km 以内时, 基本上可以实现距离上的准确定位, 但是当收发距离大于 40 km 时, 有相当一部分声源都没有定位到准确位置, 而是定在距离准确位置相差大约 30 km 的距离上.

图 6 和图 7 分别给出了两个不同收发距离定位的模糊度曲线, 垂直虚线表示的是实验中通过 GPS 测量得到的两船距离, 圆圈是通过宽带非相干 Bartlett 处理器得到的定位距离. 从两图曲线中都可以发现, 匹配场定位的模糊度曲线上有两个明显的峰. 在这里, 把这种现象称之为“双峰结构”. 实际上, 大部分爆炸声信号声源定位的模糊度曲线都存在着这样的

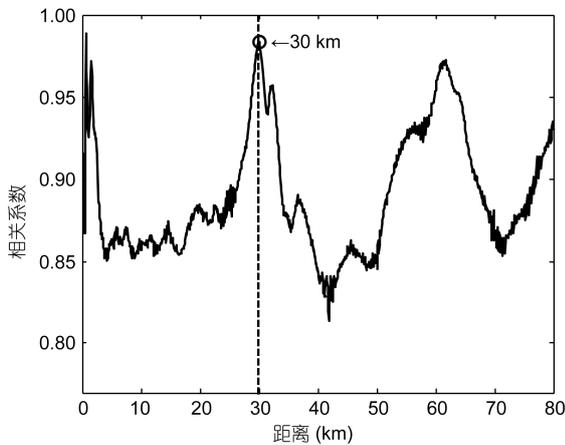


图 6 声源定位模糊度曲线(收发距离小于 40 km)

Figure 6 Ambiguity curve of one explosive source (Source range is less than 40 km).

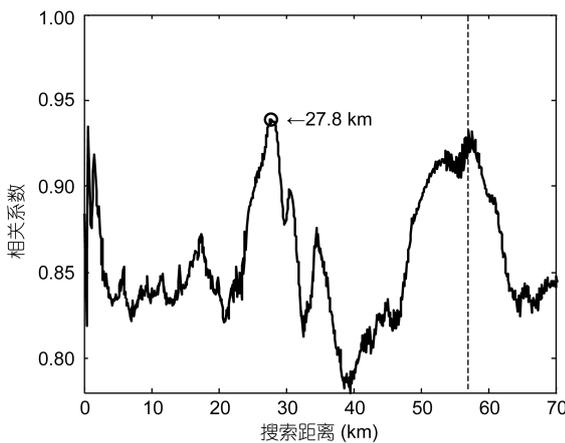


图 7 声源定位模糊度曲线(收发距离大于 40 km)

Figure 7 Ambiguity curve of one explosive source (Source range is more than 40 km).

双峰结构, 并且双峰之间的距离都约 30 km. 图 6 的声信号收发距离在 40 km 以内, 两个峰值分别在 30.0 km 和 60.1 km 距离上, 实际通过 GPS 测量得到的收发距离为 30 km, 匹配场定位结果和 GPS 测量距离基本一致. 图 7 所示的是收发距离大于 40 km 的信号定位结果, 两峰值对应的距离分别是 27.8 km 和 57.0 km, 实际收发距离 57 km, 声源定在了错误的峰上.

4 结果分析和解释

通过上文对实验数据的处理和分析, 认为在实验环境下, 存在着周期性相似的声场结构, 导致在利用匹配场做声源定位时出现双峰结构以及较远距离定位不准的现象. 实验海域存在深海声道轴, 但由于水中海底声速较海面声速小, 并且声源深度较浅, 所以属于非完全的深海波导, 声场结构受海底反射作用的影响不能忽略. 又因为垂直阵布放深度较浅, 在这一确定的深度上只有固定的几号简正波起主要作用, 这些简正波在波导传播中受海底海面反射和自身相互干涉影响, 就形成了一个声场周期性相似结构.

图 8 给出实验海域环境下部分声线的传播轨迹. 虚线表示掠射角比较小的声线, 实线表示掠射角较大的声线, 能够碰到海面和海底. 实验中接收阵较短, 布放深度浅, 最深的水听器大约在 50 m 深度位置. 从图 8 中可以看出, 较小掠射角的声线, 不能达到接收阵深度, 即对各个水听器没有作用. 掠射角较大的声线, 会碰到海底和海面, 能够到达接收阵深度.

对应到简正波理论角度, 从各号本征函数上分

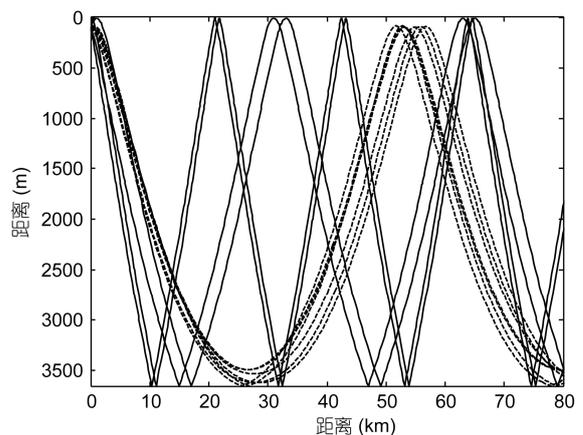


图 8 声线轨迹图

Figure 8 Sound rays traces.

析. 图9是利用简正波理论 KrakenC 计算模型数值计算的结果, 声源频率选择 100 Hz, 为宽带匹配定位时所用的中心频率. 左图的虚线和实线是在该实验环境下, 声源激发的一号和二号本征函数, 同样可以看出低号模态对浅处接收阵深度几乎没有作用. 右图是第 110 号模态的本征函数, 该模态对较浅的深度有有效值. 从两图得出, 在该实验环境下, 高号模态对接收信号起到了主要作用.

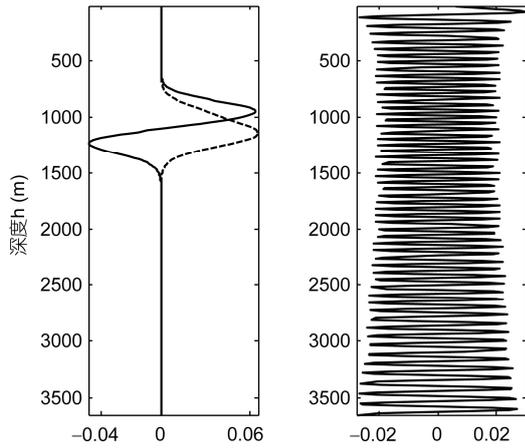


图9 本征函数图

Figure 9 Normal modes functions.

重写(4)式的简正波理论声压表达式如下:

$$p(r, z) \cong \frac{i}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} A_m e^{ik_m r}, \quad (5)$$

其中

$$A_m = \frac{\Psi_m(z_s)\Psi_m(z)}{\sqrt{k_{rm}}}. \quad (6)$$

声强能量的表达式为:

$$I(r, z) = |p(r, z)|^2 = C \left[\sum_m A_m^2 + 2 \sum_{m \neq n} A_m A_n e^{i\pi(k_m - k_n)} \right], \quad (7)$$

其中 C 是常数. 该式右侧由两项组成, 第一项随距离变化缓慢, 可以假设它是恒定的, 而第二项是由于两个不同模态之间的干涉产生的振荡项, 这一项随距离变化有较大的起伏, 就形成了周期性的干涉结构, 干涉结构尺度表达式如下:

$$L = \frac{2\pi}{|k_{rm} - k_m|}. \quad (8)$$

根据(8)式, 可以计算实验环境下起主要作用的简正波干涉的跨度, 也就是声场相似性结构的周期

长度. 接收深度取接收阵的平均深度 30 m, 该深度对应声速为 1538.7 m/s, 所以认为相速度最接近 30 m 深度声速的两号简正波对该垂直阵影响最大. 需要说明的是, 选取平均接收深度是为了简化下面的分析过程. 事实上, 实验过程中采用垂直阵接收, 因此对接收阵每个水听器处声场均是由相速度接近和大于该水听器处海水声速的各号简正波作用的综合. 表 2 给出利用 KrakenC 计算模型得到声源频率为 100 Hz 时某几号简正波对应的相速度.

从表中看出第 109 号和 110 号简正波, 对应的相速度分别是 1538.54 m/s 和 1539.26 m/s, 最接近 30 m 深度的水体声速, 认为这两号简正波对垂直阵的接收信号起到了主要的作用. 带入(8)式得到 $L=33$ km. 图 10 给出与这两号简正波掠射角度相对应的一组声线的轨迹, 从中也可以看出声线跨度约 30 km, 这一结果和前文中定位模糊度曲线的双峰间距吻合较好, 很好地证明了深海受海底反射影响环境中的声场相似性周期结构解释的合理性.

表 2 各号简正波对应相速度

Table 2 Phase speed of each mode

简正波号数	相速度(m/s)
1	1483.8
2	1484.2
...	...
108	1537.8
109	1538.5
110	1539.3
111	1540.0
...	...

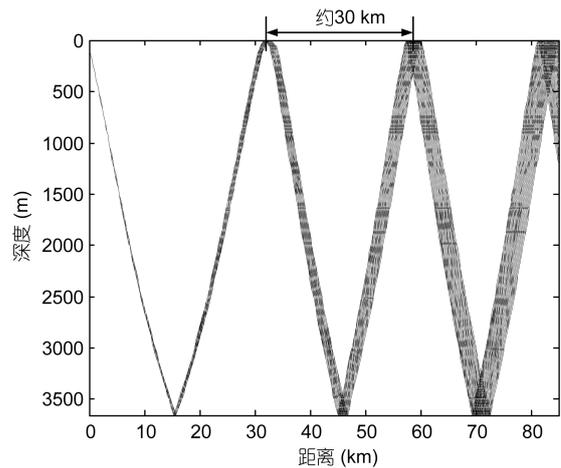


图 10 第 109 号和 110 号简正波对应的声线传播轨迹

Figure 10 Sound rays traces corresponding to the 109th and 110th modes.

5 结论

选用宽带非相干 Bartlett 匹配场处理器, 对 2011 年 10 月南中国海的爆炸声实验进行声源定位研究. 实验发现当收发距离小于 40 km 时能够较准确的定位, 但是当收发距离大于 40 km, 相当一部分都定位在了错误的位置. 并且在大部分的定位结构的模糊度曲线上会出现双峰结构, 且两峰之间有一个较固定的距离, 约 30 km.

文章利用简正波理论证明了在实验海洋环境下

存在着周期性的声场相似性结构. 实验海域属于深海环境, 存在深海声道轴, 但是由于水中海面声速大于海底声速, 所以海底反射对声场的结构也起到了不可忽略的作用, 形成了文章描述的深海中受海底反射区影响的声场周期性结构. 这样的周期性相似结构对于匹配场声源定位有很大的影响, 会导致匹配场处理过程中定位不准. 今后工作中会重点分析这一物理现象, 区分不同周期跨度声场, 改进匹配场声源定位方法.

参考文献

- 1 Hinich M J. Maximum likelihood signal processing for a vertical array. *J Acoust Soc Am*, 1973, 54(2): 499–503
- 2 Bucker H P. Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water. *J Acoust Soc Am*, 1976, 59(2): 368–373
- 3 Fizzl J R. Application of high-resolution processing to range and depth estimation using ambiguity function methods. *J Acoust Soc Am*, 1987, 82(2): 606–613
- 4 Daugherty J R, Lynch J F. Surface wave, internal wave, and source motion effects on matched field processing in a shallow water waveguide. *J Acoust Soc Am*, 1990, 87(6): 2503–2525
- 5 Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalevsky P N. An overview of matched field methods in ocean acoustics. *IEEE J Ocean Eng*, 1992, 18(4): 401–424
- 6 Frichter G M, Byrne C L, Feuillade C. Sector-focused stability methods for robust source localization in matched-field processing. *J Acoust Soc Am*, 1990, 88(6): 2843–2851
- 7 Yang T C. A method of range and depth estimation by modal decomposition. *J Acoust Soc Am*, 1987, 82(5): 1736–1745
- 8 Tran J-M Q D, Hodgkiss W S. Matched-field processing of 200 Hz continuous wave (CW) signals. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89(2): 745–755
- 9 Tran J-M Q D, Hodgkiss W S. Experimental observation of temporal fluctuation at the output of the conventional matched-field processor. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89(5): 2291–2302
- 10 Westwood E K. Broad band matched source localization. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91(5): 2777–2789

Periodic analogical structure in the source localization in the reflection area of the deep ocean

CHEN LianRong^{1,2*}, PENG ZhaoHui¹, WANG GuangXu¹ & LIU GuoQin³

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³ Military Representative Office of the Navy, Shanghai Jiangnan Shipbuilding Group Co. Limited, Shanghai 201913, China

Based on the data collected by a vertical line array (VLA) during an experiment in the South China Sea, October 2011, source localization results of the conventional matched-field processor (MFP) are presented and analyzed. The results indicate that when the measurement distance is less than about 40 km, the MFP is a viable processing technique, while for distances beyond 40 km, a bimodal character emerges in the MFP output. The distance between the two peaks is about 30 km, and many of the source locations are estimated in the wrong peaks. Besides environmental variable mismatch, the existence of a periodic sound field structure formed by the sea bottom reflection in such an environment is proposed to explain the phenomenon. The explanation is verified by an argument based on the normal mode theory, and the result shows reasonable agreement with the MFP output.

deep sea source localization, matched field processing, periodic sound field structure

PACS: 43.60.Kx, 43.30.Bp, 43.30.Cp

doi: 10.1360/132012-813