

声速剖面对不同深度声源定位的影响

苏林 马力 宋文华 郭圣明 鹿力成

Influences of sound speed profile on the source localization of different depths

Su Lin Ma Li Song Wen-Hua Guo Sheng-Ming Lu Li-Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024302 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单载波频域均衡中的水声信道频域响应与噪声估计

Frequency domain response estimation of underwater acoustic channel and noise estimation for single-carrier frequency domain equalization

物理学报.2014, 63(19): 194304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194304>

二进制偏移载波调制的零相关窗水声同步技术研究

Underwater acoustic synchronization telemetry research based on binary offset carrier modulated signal with zero correlation window

物理学报.2014, 63(10): 104301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104301>

基于压缩拷贝场向量的空域滤波器设计

Spatial filter design based on compressed replica vectors

物理学报.2014, 63(10): 104302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104302>

一种更具普适性的浅海不确定声场快速算法

A fast and more universal algorithm for an uncertain acoustic field in shallow-water

物理学报.2014, 63(8): 084301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084301>

基于多径分集的啁啾扩频正交频分复用水声通信系统

Chirp spread spectrum of orthogonal frequency division multiplexing underwater acoustic communication system based on multi-path diversity receive

物理学报.2014, 63(4): 044302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044302>

声速剖面对不同深度声源定位的影响*

苏林^{1)2)3)†} 马力¹⁾²⁾ 宋文华¹⁾²⁾³⁾ 郭圣明¹⁾²⁾ 鹿力成¹⁾²⁾

1)(中国科学院声学研究所, 北京 100190)

2)(中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年5月5日收到; 2014年7月11日收到修改稿)

在对一次试验数据进行匹配场定位处理时发现, 选取声速剖面有轻微失配的情形下, 水面弱声源显现, 水下强声源反而消失. 基于该现象研究了声速剖面失配不同深度声源定位的影响. 首先通过仿真试验排除海上试验中不确定因素的影响, 进一步得出深处声源定位受声速剖面失配影响较大的结论, 并针对夏季负跃层情形进行跃层深度失配的仿真, 初步得出在跃层下边界以下 10 m 附近处的声源对声速剖面失配最敏感. 最后从简正波的角度进行理论分析, 分两点对这一现象进行了合理解释.

关键词: 声速剖面失配, 匹配场定位, 水动力简正波, 简正波

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.64.024302

1 引言

匹配场定位是基于实际测量信号与数值预报声场信号相匹配的原理对目标距离和深度进行估计的. 海洋环境参数的准确获取是水下被动定位成功与否的关键, 当海洋波导参数信息足够精准时能够得到很好的效果, 但是受海洋环境监测和预报能力的限制, 海洋环境参数失配会使得匹配场定位性能下降, 因此匹配场定位的失配问题一直是国内外学者研究的热点.

目前, 对于海深、海底声速、沉积物的衰减和密度等对匹配场定位的影响已有较为一致的结论. DelBalzo 等^[1] 讨论了与距离无关的海深的不正确估计对匹配场处理器的影响, 得出海深失配较小时, 匹配场定位确定的声源位置产生有规律变化, 海深估计过大时, 得到的声源位置要比实际的声源位置偏远、偏浅; Feuillade 等^[2] 随后又报告了他们对这一研究的实验结果, 证明精确确定海深和沉积物声速非常重要, 相比之下, 处理器对沉积物的衰减和密度则不那么敏感. Feuillade 等^[3] 1989 年对

于代表夏季和冬季声速变化的声速失配的研究, 分析了浅海、深沉积层波导的情况, 他们发现, 夏季剖面的变化导致处理器性能急剧下降, 冬季剖面的变化造成的处理器性能下降很小. Hamson 和 Heitmeyer^[4] 利用线性处理器考察了浅海高频情况, 他们的结论与 DelBalzo 等和 Feuillade 等的结论类似, 匹配场处理器对沉积物的衰减很不敏感, 他们同时提出正确地确定声速是个关键问题. 但是由于声速剖面涉及参数较多且时空变化复杂, 声速剖面对声源定位影响的研究还较少, 尚未得到规律性的结论. Tolstoy^[5] 研究了深海太平洋环境下阵元数、阵元布放深度不同时匹配场定位对声速剖面失配的敏感性, 并给出了阵元布放最佳深度, 此时对声速剖面失配敏感性最小. Smith 等^[6] 研究了四种匹配场处理器在声速剖面失配时的性能, 其中, 最大似然处理器和多约束处理器对声速剖面失配较为敏感, 扇区聚焦约束处理器和线性处理器性能较为稳定.

本文依托于一次匹配场定位试验, 充分采集了发射点和接收阵处的声速剖面数据, 利用失配的

* 国家自然科学基金 (批准号: 11004214, 11274338) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tiancai612@163.com

声速剖面进行定位时, 较强的水下声源反而无法定位, 改用精确时刻的接收阵处声速剖面后, 消失声源显现. 针对该现象进一步仿真研究了不同深度声源的匹配场定位对声速剖面失配的敏感性. 试验和仿真结果都表明, 在夏季负跃层情形下, 跃层以下的声源对声速剖面失配更加敏感. 最后对这一现象给出了物理解释.

2 水面水下双声源匹配场定位

2.1 试验概况

2013年夏季在中国南海进行了一次匹配场定位的综合试验, 信号发射采用两个发射换能器. 发射端设置如图1所示, 发射船吊放一浅一深两个声源, 行驶至各站点进行定点发射, S1为鱼唇弯张换能器, S2为内凹弯张换能器, 其中S2发射响应稍大. 吊放深度分别为7, 50 m. 两声源同时发射相同强度的多频组合信号, 其中浅处声源频率成分为615, 666, 732, 789 Hz, 深处声源频率成分为605, 652, 715, 756 Hz. 接收阵为32元均匀垂直线列阵, 阵元间隔为1.5 m. 定点传播距离约为2.4 km.

声速剖面数据在发射站点和接收阵处均进行采集. 其中发射站点采用温盐深仪(CTD)测量, 由于发射船抛锚时间短, 只选取11个时刻, 在发射船船舷处收放CTD测得11条完整的声速剖面; 接收阵处声速剖面采取布放温度链的方式, 温度链布放深度在15—82 m之间, 温度探头每隔一分钟采集一次温度数据.

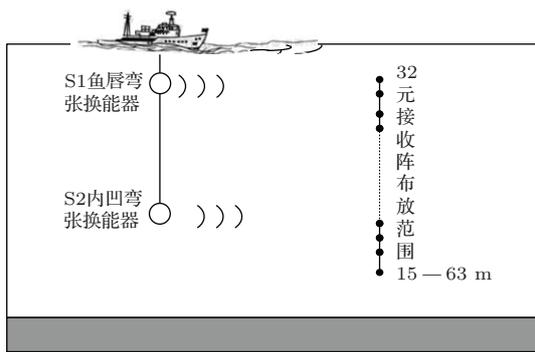


图1 发射、接收端布放示意图

2.2 宽带匹配场定位处理器

对于传统的匹配场处理声源定位, Bartlett [7] 处理器形式为

$$D(r, z; f) = |\mathbf{V}^H \mathbf{X}|^2$$

$$= \mathbf{V}^H \left(\frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L \mathbf{X}_{\ell} \mathbf{X}_{\ell}^H \right) \mathbf{V}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{V}(r, z; f)$ 表示拷贝声场向量, $\mathbf{X}_{\ell}(r_s, z_s; f)$ 表示测量声场向量, L 是估计测量声场互谱矩阵 (cross spectral matrix) 所取的快拍数, 上角标“H”表示共轭转置; (r_s, z_s) 表示目标声源的水平距离和深度位置, (r, z) 是对应的空间搜索点位置, f 是接收声信号分析频率. 函数 $D(r, z)$ 称为声源定位模糊度函数, 当搜索点位置与目标声源位置一致时, 该模糊度函数原则上取最大值, 从而指示出目标声源位置. 对于宽带信号, 可以采用非相干的宽带处理 [8] 形式

$$\tilde{D}(r, z) = \frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} D(r, z, f_j). \quad (2)$$

相对于单频处理来说, 宽带处理可以显著地降低旁瓣高度, 改善目标声源探测和定位效果. 文中用到的匹配场处理器均为 (2) 式表示的宽带非相干匹配场处理器.

2.3 数据处理结果

底质参数的选取综合以往经验数据和反演结果, 取两层海底, 海深为94 m, 沉积层厚度10 m, 沉积层声速为 $1575 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 密度为 $1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 衰减为 $0.2 \text{ dB}/\lambda$, 海底声速为 $2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 密度为 $1700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 衰减为 $0.2 \text{ dB}/\lambda$. 由于发射点处声速剖面只做了几个时刻的采集, 故选取临近时刻的剖面近似, 如图2中实线所示.

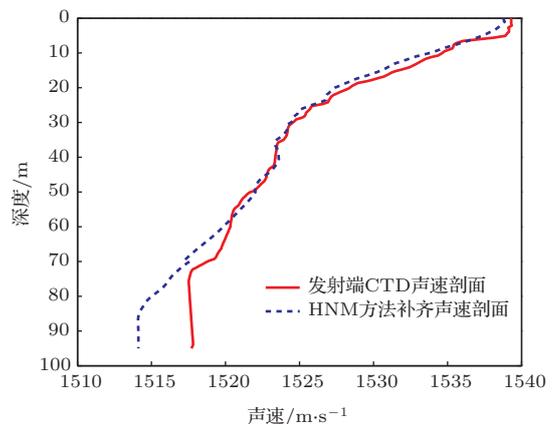


图2 原始声速剖面与重构声速剖面对比

截取10 s的阵列接收信号, 滤波后其频谱如图3所示, 可以看到八根清晰的线谱, 根据发射信

号信息可知, 虚线框内为声源S2 (较深处声源) 发射的频率成分.

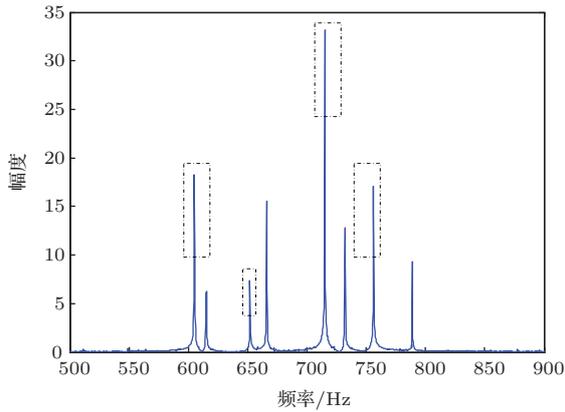


图3 接收信号频谱

利用发射点处声速剖面进行宽带非相干匹配场定位, 距离搜索范围为100—5000 m, 步长为20 m, 深度搜索范围为1—90 m, 步长为0.5 m. 得到如图4所示的距离深度模糊度平面, 浅处声源清晰可见, 对比声源的标称位置, 定位距离和深度都很精准: 实际距离为2.4 km, 定位结果为2.48 km, 距离相对误差为3%; 实际深度为7.5 m, 定位结果为8 m, 相对全海深误差为0.5%. 但深处声源无法分辨.

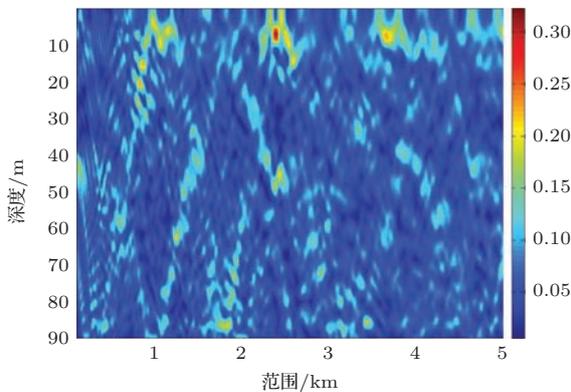


图4 (网刊彩色) 宽带非相干匹配场定位模糊平面

从海洋环境参数失配的角度分析原因, Feuilade等^[2]及后来很多学者的研究一致表明沉积物密度、衰减等对定位影响不大, 海深、海底声速则对声源定位影响较大, 但一定程度的失配只会引起声源定位位置的偏移. 本次实验能够较为精确地定位水面声源, 水下强声源的消失极有可能与声速剖面的失配有关.

由于发射站点声速剖面采样过少, 而接收阵处

温度链数据每分钟进行更新, 考虑改用接收阵处剖面进行定位. 由于温度链布放深度为15—82 m, 海深为94 m, 需要补齐上下端的温度数据. 目前的研究^[9]大多利用经验正交基函数方法表示声速剖面, 但经验正交函数的获取依赖于大量历史数据, 不同季节、不同数据量获得的经验正交函数可能会差异很大. 本文利用宋文华等^[10]提出的基于水动力方程提取声速剖面正交基函数的方法对温度链数据进行补齐. 由于篇幅限制, 具体求解过程参考文献^[10]. 补齐温度链数据选取指定时刻的声速剖面, 如图2中虚线所示.

用HNM方法重构的接收阵处声速剖面重新定位, 同样, 距离搜索范围为100—5000 m, 步长为20 m, 深度搜索范围为1—90 m, 步长为0.5 m. 得到模糊度平面如图5所示, 浅处声源仍然清晰可见, 同时, 50 m处的声源得以显现.

由海试数据初步认定, 首次定位失败与声速剖面失配有关, 猜测是因为深处声源的定位对声速剖面失配较为敏感.

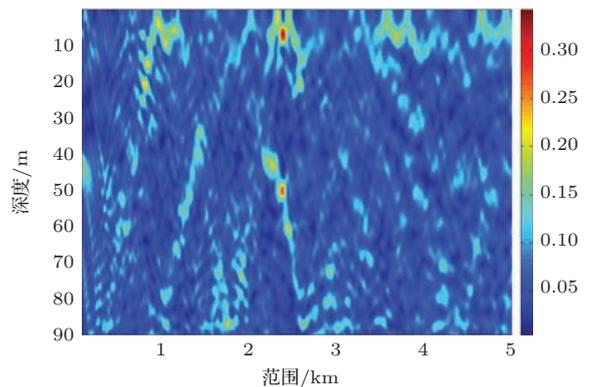


图5 (网刊彩色) 声速剖面修正后的匹配场定位模糊平面

3 声速剖面选取对水面水下双声源匹配场定位的影响

3.1 海上试验的仿真重现

上一节中得到水下声源定位对声速剖面失配较为敏感的结论. 然而由于海洋环境较为复杂, 海上试验存在多种不确定因素的影响, 有必要对海上试验进行仿真重现.

海洋环境参数与海试环境一样, 上下两个声源源级相同. 保持所有环境参数精准, 测量场和拷贝场声速剖面均采用图2中虚线, 即接收阵处剖面, 得到完全无失配情形下的模糊度平面, 如图6所示,

两个声源均清晰可见. 仿真声速剖面失配的情形, 保持其他海洋环境参数精准, 测量场声速剖面依然采用图2中虚线, 不同的是拷贝场采用图2中实线, 即声速剖面轻微失配, 得到如图7所示模糊度平面, 出现了与海试数据处理中一致的现象, 深处声源消失了, 浅处声源可以进行准确定位.

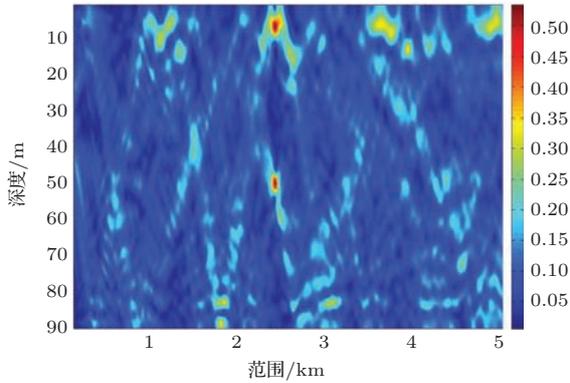


图6 海洋环境参数完全匹配时双声源定位模糊度平面

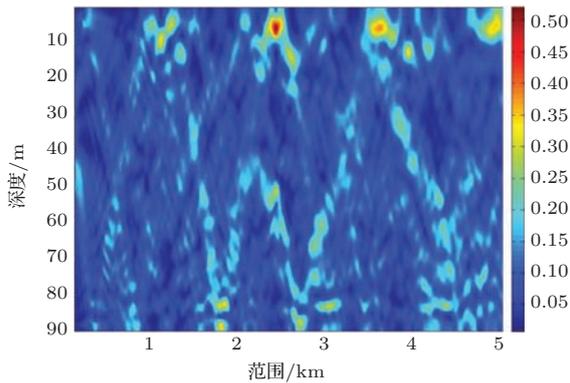


图7 (网刊彩色) 声速剖面失配时双声源定位模糊度平面

3.2 不同深度声源对声速剖面失配的敏感性

3.1的仿真试验再一次验证了上一节的结论, 即深处声源的定位对声速剖面失配较为敏感. 这个结论较为笼统, 多深处的声源才算是“深处声源”呢? 因此有必要研究不同深度声源的定位对于声速剖面失配的敏感性差异规律. 对声速剖面的变化进行充分的量化研究是个比较大的课题, 本文先针对南海典型夏季负跃层情况, 简单研究跃层深度失配对不同深度声源定位的影响.

假设跃层深度在10—50 m, 跃层上下边界声速相差 $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 如图8, 实线表示测量场使用的声速剖面. 失配分两种情况, 第一种是跃层深度减小

5 m, 如图8中点划线, 图9(a)为对应该失配情形时不同深度声源定位的峰值相关系数, 在60 m附近声源相关系数达到最小值, 小于60 m范围内, 声源深度越深, 定位失配越严重. 第二种失配情形是跃层深度减小15 m, 如图8中虚线, 图9(b)为对应该失配情形时不同深度声源定位的峰值相关系数, 在56 m附近声源相关系数达到最小值, 与图9(a)相似, 声源深度在小于56 m范围内, 声源深度越深,

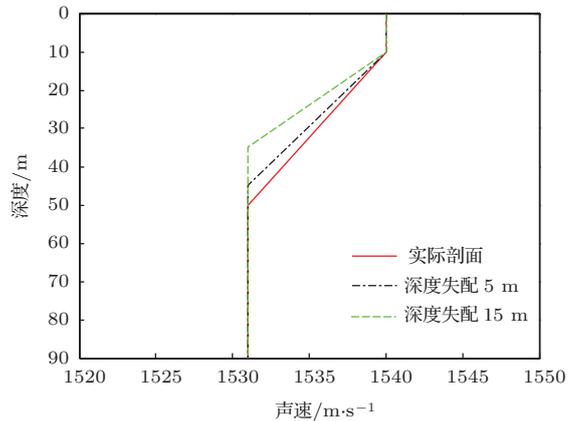


图8 (网刊彩色) 原始声速剖面与失配剖面对比

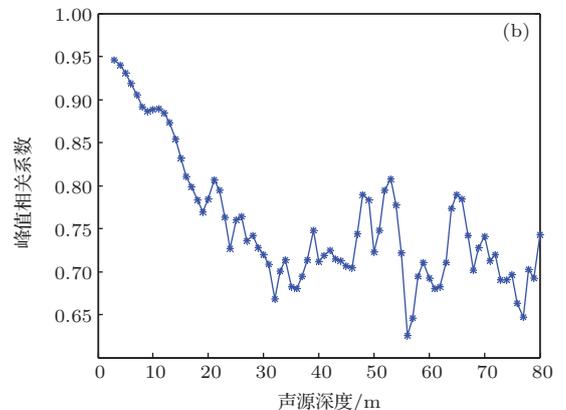
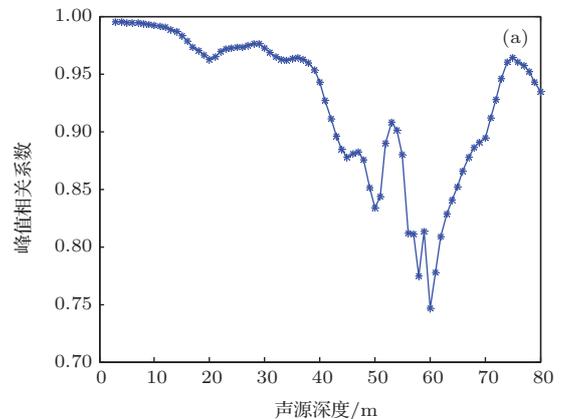


图9 跃层深度失配时不同深度声源定位的峰值相关系数 (a) 跃层深度失配5 m; (b) 跃层深度失配15 m

定位失配越严重. 对比图9(a)和(b), 声速剖面失配较严重时, 定位失配也越大. 可以推出, 对于夏季负跃层情形, 在跃层拐点以下10 m附近为失配最严重的深度, 我们称之为“拐点深度”, 在拐点深度以上, 随着声源深度增加, 定位效果越来越差, 即对失配的敏感性越来越大.

仿真试验和海上试验的结果都表明, 较深处的声源定位需要更加精准的声速剖面数据, 即浅处声源的定位对声速剖面敏感度小于深处声源. 尝试从波动声学的角度给出物理解释.

频域声压 $p(r_n, z_n)$ 是 Helmholtz 方程的解, 其中假设海水密度是常数 [11].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2(z)} p(r, z) = -\frac{\delta(r)\delta(z-z_s)}{2\pi r}. \quad (3)$$

假设声源为各向同性的简谐声源, 时间因子为 $e^{-i\omega t}$, 利用分离变量法解声波方程. 深度解转化为

Sturm-Liouville 本征值问题, 本征函数 $\Phi_m(z)$ 描述了第 m 号简正波的模式形状, 本征值 k_{rm} 为水平波数. 考虑远场近似, (r, z) 处声压的简正波表达式

$$p(r, z) = \frac{i}{\sqrt{8\pi\rho}} e^{-i\pi/4} \times \sum_{m=1}^M \Phi_m(z) \Phi_m(z_s) \frac{e^{ik_{rm}r}}{\sqrt{rk_{rm}}}, \quad (4)$$

其中 ρ 为海水密度, M 为简正波个数. 首先, 不同号简正波对声速变化的敏感程度不同, 通过简正波声场计算软件 KRAKEN 得到不同声速剖面下各号简正模式的垂直分布 $\Phi_m(z)$, 如图 10 所示, 实线和虚线分别对应于图 2 中两条声速剖面下前 14 号模式的垂直分布. 显然, 低号简正模式下两个声速剖面的模式形状差别较大, 而高号简正模式的模式形状函数在不同声速剖面下相差不大. 说明声速剖面的变化对低号简正波的影响要大于高号简正波.

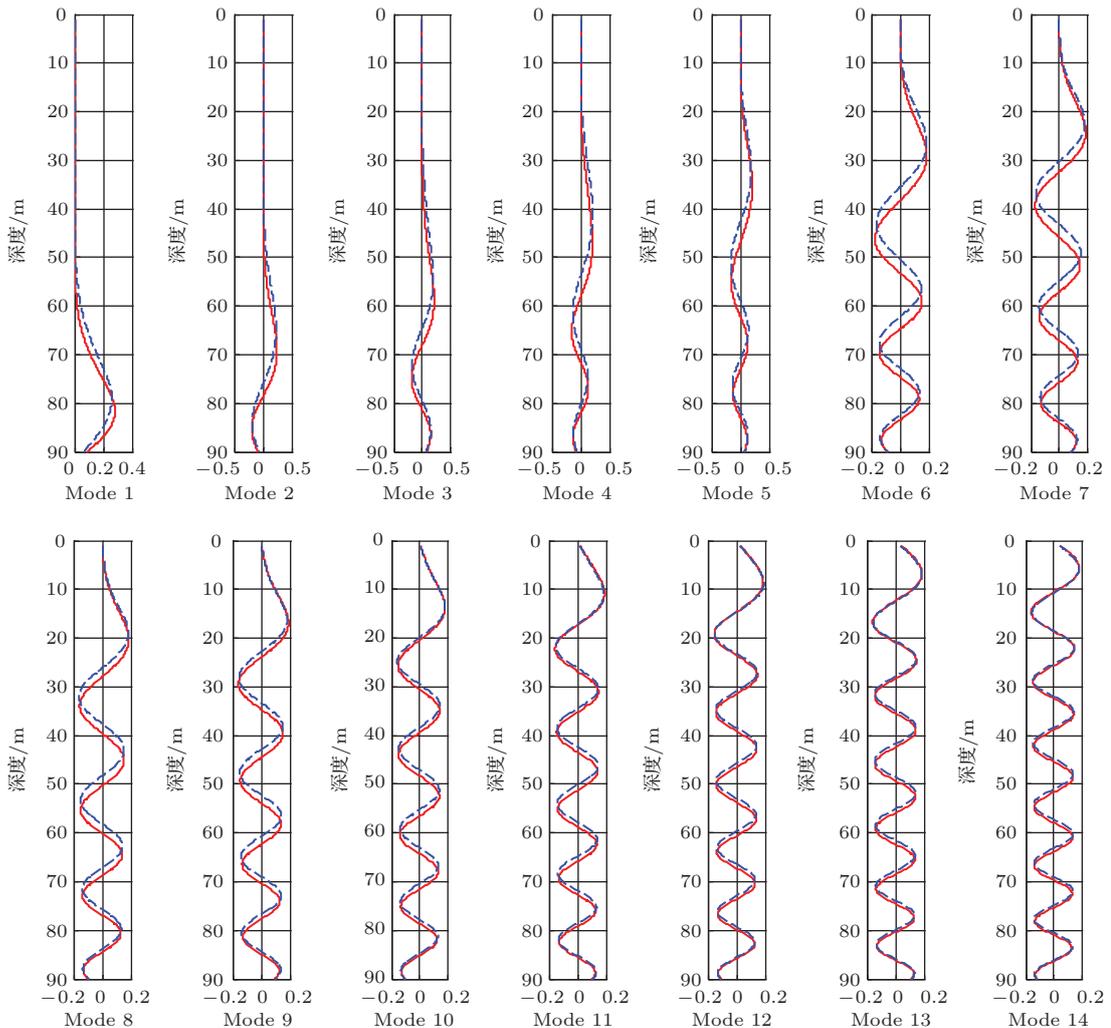


图 10 (网刊彩色) 声速剖面变化对不同号简正波的影响

第二,分析仿真试验中两个深度声源激发的各号筒正波系数,如图11所示,7 m处的声源只激发高号筒正波,低号筒正波系数几乎为零,50 m处声源激发各号筒正波幅度基本相等.图12给出了各号筒正波在不同深度下的激发系数 $\Phi_m(z_s)$,低号筒正波在浅处的激发系数几乎为零,前几号筒正波(1—3号)只有50 m以下声源才可以激发.

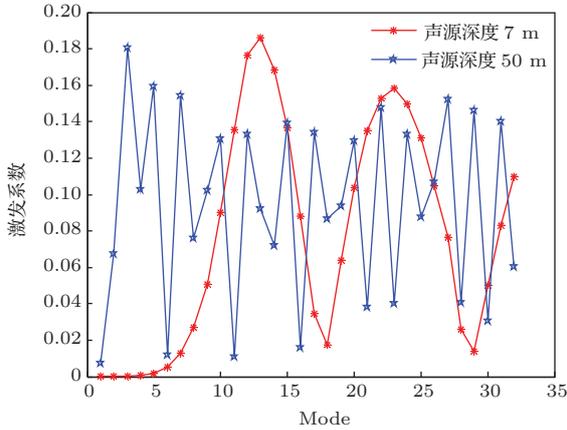


图11 (网刊彩色) 7, 50 m声源各号筒正波激发系数

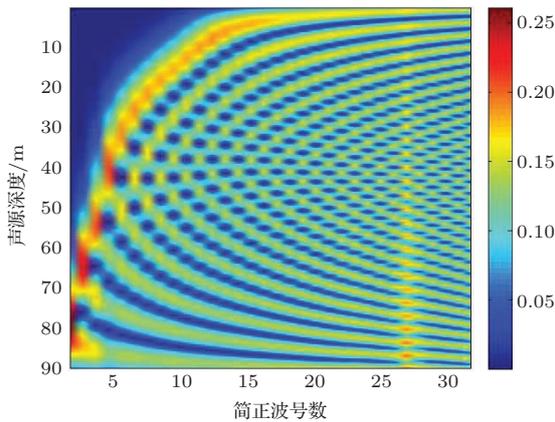


图12 (网刊彩色) 各号筒正波在不同深度的激发系数

以上分析表明:低号筒正波对声速剖面变化敏感;低号筒正波只有深处声源被激发.也就是说,深处声源激发的声场中,低号筒正波起主要作用,又因为低号筒正波对声速剖面变化敏感,故而导致深处的声源产生的声场对声速剖面变化也较为敏感.这就解释了定位试验中出现的水面弱声源定位成功而水下强声源消失的现象.

3.3 水平变化环境下声速剖面的选取

以上分析表明,声速剖面对匹配场定位的影响很大,对不同深度声源的定位影响也有差别,由此

引出时空非均匀分布的声速剖面选取的问题.本文选取试验期间的海洋环境进行仿真计算进而简单说明.为了仿真声速剖面随距离的非均匀变化,选取试验期间不同时刻的20个声速剖面在声源和接收阵之间均匀分布,分别记做 ssp1, ssp2, ssp3, ..., ssp20.

仿真分两种情形进行,第一种是 ssp1 作为发射处声速剖面, ssp20 作为接收处声速剖面;第二种是 ssp20 表示发射处声速剖面, ssp1 表示接收处声速剖面.这样可以排除声速剖面形状的影响,只考虑声速剖面位置的作用.分别选取每个声速剖面作为水平均匀声速剖面条件的等效进行匹配场处理,由于20个剖面差别不太大,基本都可以对声源进行准确定位,统计峰值相关系数的变化,如图13所示,纵坐标表示用第*i*个剖面等效时的峰值相关系数,实线为第一种情形的统计,虚线为第二种情形的统计.由图可知,在两种情形下,均在使用接收处声速剖面进行等效时获得最大峰值相关系数.说明在该仿真条件下,声速剖面时空变化较小时,选取接收处声速剖面进行等效定位效果较好,这也与前面的仿真和试验结果一致.

需要指出的是,时空变化条件下声速剖面的选取是一个比较大的研究课题,原则上需要对复杂海洋环境下声速剖面的时空非均匀分布进行重构并通过遍历搜索寻优,本节给出的结论只适应于文中给出的海洋环境和声速剖面时空变化较小的情形,普适性的选取原则有待深入研究.

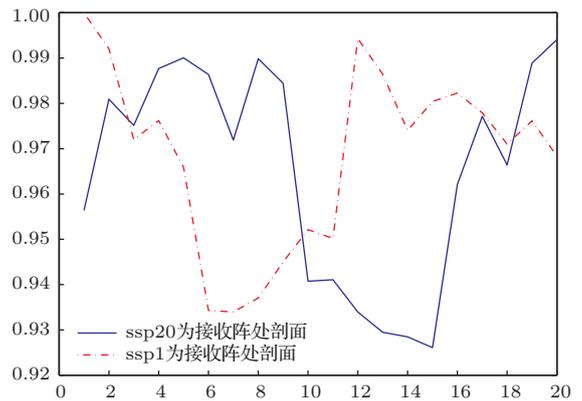


图13 不同声速剖面进行等效时的峰值相关系数

4 结论

匹配场被动定位对环境参数的敏感性早有研究,其中海深、海底声速、沉积层密度等对匹配场定位的影响机理和规律已有较为统一的结论,相对来

说, 声速剖面的时空变化更为复杂. 它对定位的影响机理也比较复杂. 本文从海上试验和仿真试验得出结论, 深处声源的定位对声速剖面变化更为敏感, 并用简正波理论从两个方面给予解释: 低号简正波对声速剖面变化敏感、低号简正波只有深处声源被激发. 最后针对文中所给的海洋环境和声速剖面时空变化较小的情形, 得出声速剖面选取的非普适性规律, 使用接收处声速剖面进行等效时定位效果较好.

参考文献

- [1] DelBalzo D R, Feuillade C, Rowe M M 1988 *J. Acoust. Soc. Am.* **83** 2180
- [2] Feuillade C, Kinney W A, DelBalzo D R 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 423
- [3] Feuillade C, DelBalzo D R, Rowe M M 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **85** 2354
- [4] Hamson R M, Heitmeyer R M 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 1951
- [5] Tolstoy A 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **85** 2394
- [6] Smith G B, Chandler H A, Feuillade E C 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 2617
- [7] Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalevsky P N 1993 *IEEE J. Oceanic Eng.* **18** 401
- [8] Soares C, Sergio M J 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **113** 2587
- [9] Li J, Yang K D, Lei B, He Z Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084301 (in Chinese) [李佳, 杨坤德, 雷波, 何正耀 2012 物理学报 **61** 084301]
- [10] Song W H, Hu T, Guo S M, Ma L, Lu L C 2014 *Acta Acust.* **39** 11 (in Chinese) [宋文华, 胡涛, 郭圣明, 马力, 鹿力成 2014 声学学报 **39** 11]
- [11] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (2nd Ed.) (Berlin: Springer) p339

Influences of sound speed profile on the source localization of different depths*

Su Lin^{1)2)3)†} Ma Li¹⁾²⁾ Song Wen-Hua¹⁾²⁾³⁾ Guo Sheng-Ming¹⁾²⁾ Lu Li-Cheng¹⁾²⁾

1) (*Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Key Laboratory of Underwater Acoustics Environment, Beijing 100190, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 5 May 2014; revised manuscript received 11 July 2014)

Abstract

It is found in the data processing of matched field source localization experiment that in the case of the slight mismatch of sound speed profile, the louder source below disappears while the weaker source above comes out. Based on the experimental phenomenon, the influences of the sound speed profile on the source localization of different depths are investigated. Firstly, the simulation is conducted in order to extract the influence of the uncertain factors in the sea test, from which it is further concluded that the deeper source is greatly affected. Then another simulation about the mismatch of the depth of the thermocline is conducted in the typical shallow-water negative gradient environment, from which a preliminary conclusion is drawn that the most sensitive depth to the mismatch of the sound speed profile is around 10 meters below the lower boundary thermocline. Finally, this phenomenon is reasonably explained through a theoretical analysis from two aspects of the normal mode theory

Keywords: sound speed profile mismatch, matched field processing, hydrodynamic normal mode, normal mode

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d

DOI: [10.7498/aps.64.024302](https://doi.org/10.7498/aps.64.024302)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11004214, 11274338).

† Corresponding author. E-mail: tiancai612@163.com