

浅海中水平线列阵深度对匹配场定位性能的影响*

张同伟[†] 杨坤德 马远良 黎雪刚

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2009 年 7 月 9 日收到; 2009 年 8 月 24 日收到修改稿)

以浅海声传播模型为基础, 通过计算机仿真观察到以下物理现象: 浅海中海底水平线列阵的匹配场定位性能优于其他深度水平线列阵. 利用简正波建模方法揭示了这一现象的物理机理. 按照简正波理论, 各号模式的形状是海水深度的函数. 通过比较不同深度上各号模式幅度的变化, 发现海底模式幅值接近零的模式号数明显小于其他深度. 这说明海底水平线列阵可以对更多号模式进行采样, 进而获得更多的目标声源信息, 取得更好的匹配场定位效果.

关键词: 水平线列阵, 匹配场定位, 基阵深度

PACC: 4330, 9210V

1. 引 言

垂直线列阵不仅是理论分析和仿真计算的逻辑起点, 而且在定点实验中也是最容易实施的, 因此水声实验主要选择垂直线列阵作为声接收基阵. 此外, 从测量的角度看, 浅海波导中垂直线列阵可以跨越大部分波导, 甚至整个波导^[1,2], 并能对绝大多数简正波模式充分采样. 在定点实验中, 垂直线列阵比较典型的布放方式有两种: 一端锚系于海底另一端悬挂于一浮体上, 或者一端悬挂于抛锚的舰船载体上另一端配一重物. 显然, 垂直线列阵的布放方式限制了其机动性及使用范围. 此外, 系留垂直线列阵的最大缺点是阵列倾斜失配会极大削弱匹配场的处理性能. 匹配场处理^[3-5]在实际声纳系统中的应用一般需要水平线列阵. 水平线列阵通常有两种形式: 海底水平线列阵和拖曳水平线列阵.

水平线列阵的孔径可以远大于海水深度, 因此可以用大孔径水平阵实现目标声源的匹配场定位. Bogart 和 Yang^[6]比较了全水域垂直线列阵和几种不同孔径海底水平线列阵的匹配场定位性能. Tantum 和 Nolte^[7]对水平线列阵匹配场处理中影响其定位性能的基阵参数(阵元数和孔径)进行了详

细讨论, 并基于简正波传播模型给出了水平线列阵的设计准则. 近年来, 拖曳线列阵和海底水平线列阵的匹配场反演^[8-14]也引起了人们的极大兴趣.

现有文献的研究仅仅是针对某一特定深度的水平线列阵, 主要是分析基阵孔径和阵元数的影响, 而对影响水平线列阵空间采样能力的另一个重要因素——水平线列阵的深度在文献中尚未见报道. 本文以浅海声传播模型为基础, 通过计算机仿真观察到以下物理现象: 在基阵孔径和阵元数满足要求的前提下, 浅海中海底水平线列阵的匹配场定位性能优于其他深度水平线列阵. 利用简正波^[15-18]建模方法和数值计算模型揭示了这一现象的物理机理. 简正波模式形状函数是海水深度的函数, 且第 m 号模式具有 m 个零点. 如果水平线列阵深度恰好与某号模式形状函数零点穿过的深度重合, 则该号模式不会对水平线列阵的接收声场有贡献, 因而该号模式所包含的目标声源信息也将丢失. 通过比较不同深度上各号模式幅度的变化, 发现海底模式幅值接近 0 的模式号数明显小于其他深度. 这说明海底水平线列阵可以对更多号模式进行采样, 获得更多的目标声源信息, 因此可以取得更好的匹配场定位效果.

* 国家自然科学基金(批准号:10774119), 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-08-0455), 陕西省自然科学基金研究计划(批准号: SJ08F07), 声场声信息国家重点实验室基金和西北工业大学基础研究基金资助的课题.

[†] E-mail: walternwpu@hotmail.com

2. 理论模型

2.1. 简正波传播模型

设海水密度为常数 ρ , 由位于 $\mathbf{r}_0 = (0, z_s)$ 的单频点声源激励, 在 $\mathbf{r} = (r, z)$ 处产生的声场 $p(\mathbf{r})$ 满足 Helmholtz 方程

$$\nabla^2 p(r, z) + k^2(r, z)p(r, z) = -4\pi\delta(r)\delta(z - z_s), \quad (1)$$

式中 $k(r, z) = \omega/c(r, z)$, z 取向向下为正方向, ω 为声源角频率. 简正波理论将声压场表示成简正波展开或叠加的形式, 并通过求解满足一定边界条件的波动方程来获取其本征值和本征函数. 在柱坐标下由方程(1)可得到声场的简正波解表达式^[16]

$$p(r, z) = \frac{ie^{-i\pi/4}}{\rho \sqrt{8\pi r}} \sum_{m=1}^M \Phi_m(z_s) \Phi_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}}, \quad (2)$$

其中 M 为模式号数, 本征函数 Φ_m 和本征值 k_m 分别表示第 m 号模式的形状函数和水平波数. 这样, 给定模式形状函数在声源和接收器深度的幅度及相应的水平波数, 则任意位置的声源在接收基阵处的声压场就可以很容易计算得到.

2.2. 水平线列阵的线性匹配场处理

本文的目的是研究水平线列阵布放深度对匹配场定位性能的影响, 更关心不同深度水平线列阵的空间采样能力而不是特定处理器的性能, 因此匹配场处理器选用最基本的线性处理器.

匹配场目标定位, 是基于水听器阵列采集的信号场数据与声场模型预测的在设定目标位置的数据向量(拷贝场向量)之间的相互匹配, 在预期目标位置区域内进行搜索, 达到匹配时获得目标的位置估计. 基阵的拷贝场向量可以运用已有的声场模型软件求出数值解^[15, 19], 并且将所有的拷贝场向量进行归一化, 使其范数为 1. 线性匹配场处理器又称常规处理器或 Bartlett 处理器, 它将测量场数据与搜索位置的拷贝场向量直接求相关. Bartlett 处理器的输出功率^[3, 4]实质是该相关幅度的二次方

$$B_{\text{Bart}}(r, z) = \left| \mathbf{p}_{\text{rplc}}^H(r, z) \mathbf{p} \right|^2 = \mathbf{p}_{\text{rplc}}^H(r, z) \mathbf{R} \mathbf{p}_{\text{rplc}}(r, z), \quad (3)$$

其中 \mathbf{p} 为接收数据响应向量, \mathbf{p}_{rplc} 为基阵加权向量, \mathbf{R} 为接收数据协方差矩阵, 上标 $(\cdot)^H$ 为共轭转置. 为分析问题的方便, 下面仅就信号场和拷贝场的相关幅度进行讨论. 令

$$B(r, z) = \mathbf{p}_{\text{rplc}}^H(r, z) \mathbf{p} = \sum_{n=1}^N p_{\text{rplc}}^*(r_n, z_n; r, z) p(r_n, z_n; R, z_s), \quad (4)$$

式中 N 为水听器阵列的阵元数, (r_n, z_n) 表示水听器阵列第 n 号阵元的坐标, (r, z) 表示搜索网格的坐标, (R, z_s) 表示目标声源的位置坐标. 上标 $(\cdot)^*$ 表示相位共轭.

对于等间距布放的水平线列阵, 各阵元与目标声源的水平距离为

$$R_n = \sqrt{(R + \Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2},$$

其中 $\Delta_n = (n - 1)d$, n 为阵元号数, d 为阵元间距, R 为目标声源与第 1 号阵元的水平距离, θ 为水平线列阵与目标声源方位的夹角(见图 1), 当目标声源位于水平线列阵的端射方向时 $\theta = 0^\circ$. R 和 d 保持不变时, 各阵元与目标声源的水平距离随 θ 的增大而减小. 因此端射方向水平线列阵的等效孔径最大, 随着目标声源逐渐偏离端射方向, 其等效孔径也相应的减小. 同样可以得到, 水平线列阵各阵元与匹配场搜索位置的水平距离 $r_n =$

$\sqrt{(r + \Delta_n \cos\beta)^2 + (\Delta_n \sin\beta)^2}$, 其中 r 为匹配场搜索位置与第 1 号阵元的水平距离, β 为水平线列阵与匹配场搜索方位的夹角. 当匹配场定位的搜索方位与目标声源方位一致时, 有 $\theta = \beta$. 水平线列阵深度为 z_a . 本征函数 Φ_m 通常只包含实部, 即 $\Phi_m \simeq \Phi_m^*$. 水平波数 k_m 的虚部与模式衰减系数相对应, 虚部越大, 模式衰减越快. 因此, 含有较大虚部的水平波数对应的模式对远场几乎没有贡献. 此外, 水平波数的虚部远小于其实部(约 3—4 个量级), 因此有 $k_m \simeq k_m^*$. 由(2)和(4)式可得

$$B(r, z) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^M \frac{\Phi_m(z) \Phi_m(z_a) \Phi_j(z_a) \Phi_j(z_s)}{8\pi\rho^2 \sqrt{R_n r_n}} \times \frac{e^{i[k_{vj} R_n - k_{vm} r_n]}}{\sqrt{k_m k_{vj}}}. \quad (5)$$

显然, (5)式无法像垂直线列阵那样利用模式正交性进行简化. 假定匹配场定位的搜索方位与目标声源方位一致, 即 $\theta = \beta$. 将上式分解为对角项($m = j$)和非对角项($m \neq j$)项

$$B(r, z) = [B(r, z)]_{m=j} + [B(r, z)]_{m \neq j}, \quad (6a)$$

$$[B(r,z)]_{m=j} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\Phi_m(z) \Phi_m^2(z_a) \Phi_m(z_s)}{8\pi\rho^2 k_{vm}} \times \frac{\exp(ik_{vm}(\sqrt{(R+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2} - \sqrt{(r+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2}))}{4\sqrt{((R+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2)((r+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2)}}, \quad (6b)$$

$$[B(r,z)]_{m \neq j} = \sum_{n=1}^N \sum_{j \neq m}^M \sum_{m=1}^M \frac{\Phi_m(z) \Phi_m(z_a) \Phi_j(z_a) \Phi_j(z_s)}{8\pi\rho^2 \sqrt{k_{vm} k_{vj}}} \times \frac{\exp(ik_{vj} \sqrt{(R+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2} - ik_{vm} \sqrt{(r+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2})}{4\sqrt{((R+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2)((r+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2)}}. \quad (6c)$$

在目标声源距离上, $r = R$, (6b) 和(6c)式可以作进一步简化

$$[B(r,z)]_{m=j} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\Phi_m(z) \Phi_m^2(z_a) \Phi_m(z_s)}{8\pi\rho^2 k_{vm}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(R+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2}}, \quad (7a)$$

$$[B(r,z)]_{m \neq j} = \sum_{n=1}^N \sum_{j \neq m}^M \sum_{m=1}^M \frac{\Phi_m(z) \Phi_m(z_a) \Phi_j(z_a) \Phi_j(z_s)}{8\pi\rho^2 \sqrt{k_{vm} k_{vj}}} \times \frac{\exp(i(k_{vj} - k_{vm}) \sqrt{(R+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2})}{\sqrt{(R+\Delta_n \cos\theta)^2 + (\Delta_n \sin\theta)^2}}. \quad (7b)$$

当阵元数足够多和水平线列阵的孔径足够大时, (7b)式中的复相位因子使非对角项的实部和虚部均含有正负值,并可使最终求和的实部和虚步各自消去,从而可使非对角项趋向于0. 尽管非对角项可以自对消,但对角项含有额外因子 $\Phi_m^2(z_a)$, 它是水平线列阵深度的函数. 在目标声源深度 $z = z_s$, 所有加和项都是正值,但他们的幅度受到额外因子 $\Phi_m^2(z_a)$ 的调制. 显然,这种模式幅度调制是很重要的. 例如,当基阵深度 z_a 恰好与某号模式幅度函数零点穿过的深度重合时, $\Phi_m^2(z_a) = 0$, 这就导致该号模式对水平线列阵的匹配场定位没有贡献. 由于对角项中的额外因子是水平线列阵深度的函数,在基阵孔径和阵元数满足要求的前提下,因此水平线列阵的布放深度将直接影响到其匹配场定位性能.

2.3. 匹配场定位性能的评价指标

为了量化水平线列阵的匹配场定位性能,采用正确定位指数和输出信干比两个指标. 正确定位指数定义为 $10\log(N+1)$, N 为模糊平面内大于真实目标声源位置附近(距离方向 ± 100 m, 深度方向 ± 5 m)最大值的网格点数,若 N 等于0,表示定位成功,若 N 大于0表示定位失败. 输出信干比定义为:在正确定位的前提下,最大输出功率(通常归一化为0 dB)减去所有网格点输出功率从小到大排序后位于75%的值,若定位失败,输出信干比无意义,

设定为0 dB.

3. 仿真实验及结果

3.1. 仿真条件

用仿真数据进行实验. 图1给出了一个水平分层的浅海环境. 水深100 m,声速剖面为典型的夏季剖面,靠近海面0—15 m为等声速1520 m/s;负跃层在15—30 m之间,声速相应的由1520 m/s线性减小到1505 m/s;下部30—100 m又为等声速1505 m/s. 沉积层上表面声速1530 m/s,下表面声速1580 m/s,沉积层密度 $\rho_1 = 1.5 \text{ g/cm}^3$,沉积层衰减系数

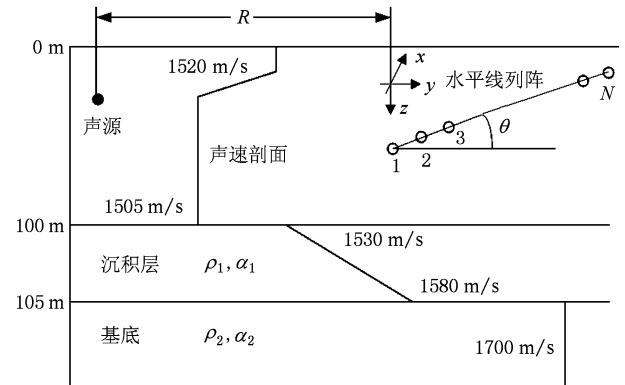


图1 仿真实验环境参数模型

$\alpha_1 = 0.1 \text{ dB}/\lambda$, 沉积层厚度 5 m. 基底声速 1700 m/s, 基底密度 $\rho_2 = 1.7 \text{ g}/\text{cm}^3$, 基底衰减系数 $\alpha_2 = 0.3 \text{ dB}/\lambda$.

假设整个海洋环境不随时间变化. 由于设定的声学条件属于与距离无关的情况, 从目标声源到水平线列阵的传输响应可以很方便的利用简正波程序进行计算, 例如可采用 KRAKEN 模型软件. 假定目标声源位于水平线列阵的端射方向. 水平线列阵第 1 号阵元与目标声源的水平距离最短. 如果目标声源位于其他方向上, 则水平线列阵的等效孔径和阵元间距都将相应减小.

500 Hz 单频声源在该海洋环境中能够激发 32 号简正波. 水平线列阵的阵元数为 31, 以 50 m 等间距布放, 则基阵孔径为 1500 m. 目标声源与水平线列阵第 1 号阵元的水平距离为 7 km. 设目标声源的声压级为 $P_{n0} = 0 \text{ dB}$, 并且将其看作点声源. 图 2 给出了四个不同深度(20, 40, 75, 100 m)水平线列阵各阵元的接收声压. 由图可见, 水平线列阵不同阵元上的接收声压有很大的起伏. 假设海洋环境的背景噪声为高斯白噪声, 仿真过程中取 100 m 深的水平线列阵第 1 号阵元(7000 m 处)的输出信噪比为 12 dB. 由于海洋背景噪声级是一定的, 不同深度上各阵元的输出信噪比也将相应调整.

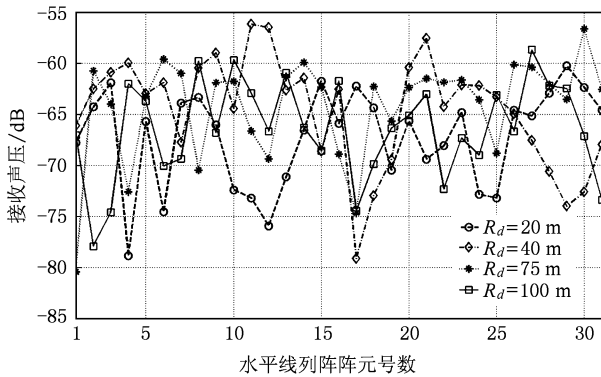


图 2 不同深度水平线列阵各阵元的接收声压

假设匹配场搜索区域为与基阵间隔 2—12 km 及水下 1—100 m 范围内. 将该搜索区域按水平方向和垂直方向划分网格, 水平搜索步长为 20 m, 深度搜索步长为 0.5 m, 采用 KRAKEN 软件计算各搜索网格点的拷贝场向量.

3.2. 水平线列阵深度对匹配场定位性能的影响

将目标声源放置于跃变层下部 40 m, 改变水平

线列阵深度观察其匹配场定位性能. 水平线列阵深度从 1 m 依次增加到 100 m, 步长为 0.1 m, 在这个过程中保持各阵元在同一水平面内, 且目标声源始终位于水平线列阵的端射方向. 在搜索区域内运用 Bartlett 处理器进行匹配场处理, 得到不同深度水平线列阵的匹配场定位性能曲线如图 3 所示, 其中图 3(a) 为正确定位指数, 图 3(b) 为输出信干比. 从图中可以看出, 对于所有深度水平线列阵, 正确定位指数均为 0, 即模糊平面上的最大值点均出现在目标声源位置附近, 这意味着水平线列阵深度对匹配场的正确定位没有影响; 位于海面、跃变层中部和海底的水平线列阵匹配场定位的输出信干比大于其他深度, 其中海底水平线列阵的输出信干比最大, 比其他深度水平线列阵的输出信干比大 3 dB 以上. 因此, 海底水平线列阵的匹配场定位性能是最优的.

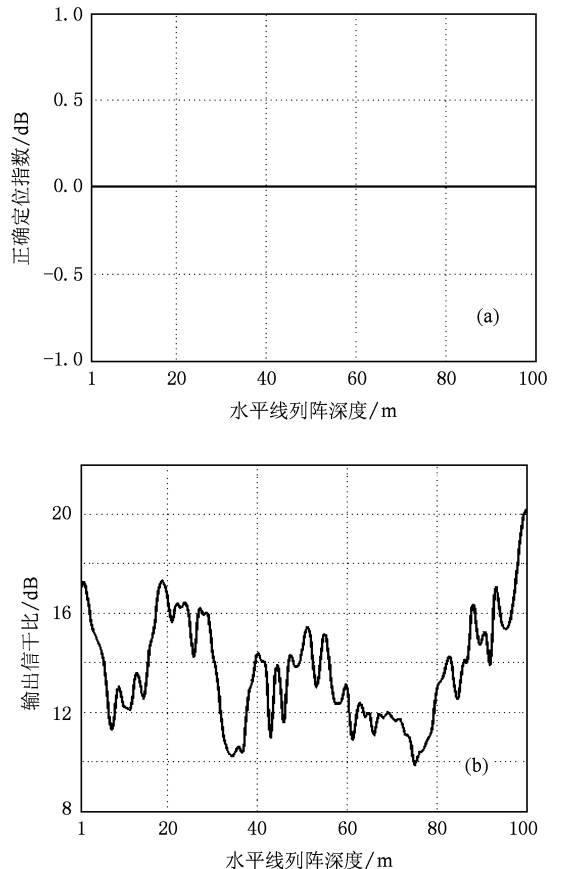


图 3 不同深度水平线列阵的匹配场定位性能曲线 (a) 正确定位指数; (b) 输出信干比

为了对水平线列阵的输出信干比有一个直观理解, 图 4 给出了三个不同深度水平线列阵的匹配场定位性能模糊平面, 其中图 4(a), (b), 和 (c) 对

应的水平线列阵的深度分别为 49 m, 79 m, 和 100 m. 目标声源深度均为 40 m, 与水平线列阵的距离均为 7 km. 由图 4(a), (b) 可见, 当水平线列阵的深度分别为 49 m 和 79 m 时, 尽管模糊平面的峰值出现在目标声源位置, 但模糊平面上存在大量的强旁瓣. 由图 3(b) 得到这两个深度水平线列阵的输出信干比分别为 13.8 dB 和 11.3 dB. 由图 4(c) 可见, 当水平线列阵的深度为 100 m 时, 模糊平面的峰值出现在目标声源位置. 与图 4(a), (b) 相比, 该深度的水平线列阵有效地抑制了模糊平面上的强旁瓣.

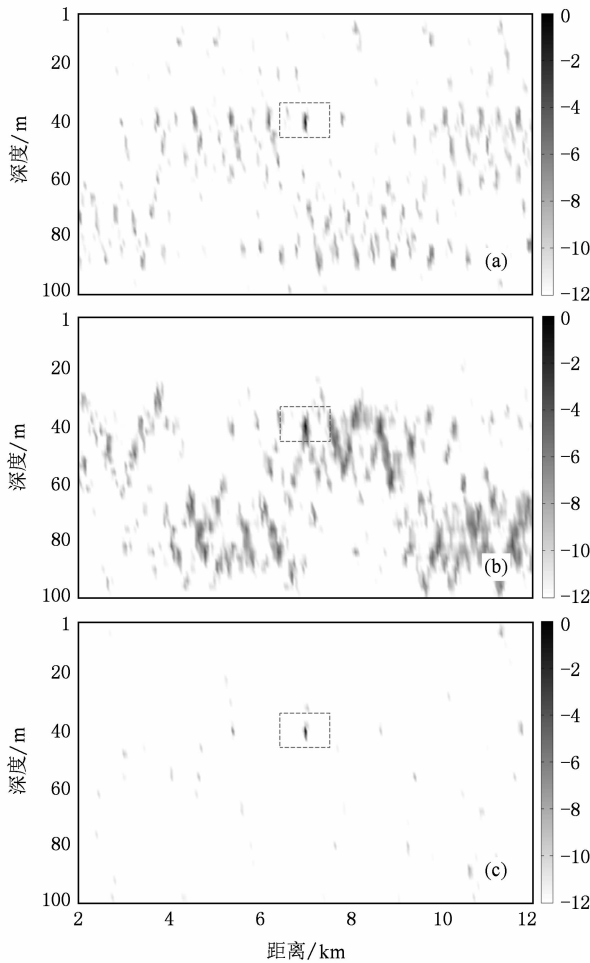


图 4 不同深度水平阵的匹配场定位性模糊平面(归一化)
(a) 49 m; (b) 79 m; (c) 100 m

图 5 给出了 500 Hz 单频声源激发的前 20 号简正波模式, 其中各号模式均做了归一化处理. 粗实线对应于各号模式的形状函数. 目标声源深度为 40 m. 由图可见, 模式形状是海水深度的函数, 对于某一深度的水平线列阵(65 m), 一些号数(2, 7, 9, 10, 13, 16, 18 号)的模式幅度为 0 或接近 0. 这就意味着位于该深度的水平线列阵几乎不可能对这些号数

的模式进行(充分)采样, 因而它们包含的目标声源信息也会丢失.

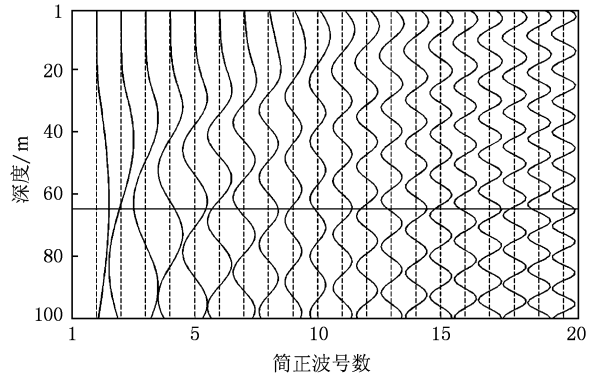


图 5 500 Hz 单频声源激发的前 20 号简正波模式

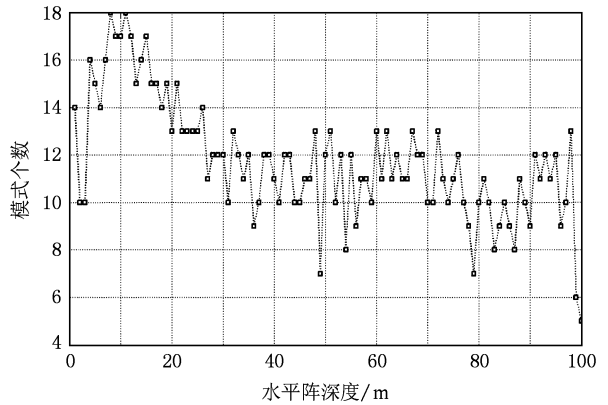


图 6 模式幅度小于最大值一半的模式号数

图 6 给出了不同深度(1—100 m)上各号模式幅度小于最大值一半的模式号数. 由图 6 可见海底深度上的模式号数明显小于其他深度. 与其他深度相比, 有更多号模式对海底声场有贡献, 因此海底水平线列阵可以对更多号模式进行采样, 进而获得更多的目标声源信息. 这就揭示了海底水平线列阵的匹配场定位性能优于其他深度水平线列阵定位性能的物理机理. 同时注意到 49 m 和 79 m 两个深度上的模式号数(均为 7)相对其他深度也较少. 但由图 3 和图 4 可知, 位于这两个深度的水平线列阵的匹配场定位性能明显弱于海底水平线列阵. 下面对这一现象进行解释, 图 7 给出了 49 m, 79 m 和 100 m 三个不同深度对应的各号模式幅值. 由图 7 可见, 49 m 和 79 m 深度上分别有两个低号模式幅值非常接近于 0, 这使得上述两个深度上至少有两号模式包含的声源信息丢失, 尽管 100 m 深度上有

5 号模式幅度小于最大值的一半,但这 5 号模式幅度均不接近 0,其中第 1 号模式幅度最小为 0.2.由此可见,49 m 和 79 m 深度上的水平线列阵的模式采样能力均弱于海底水平线列阵,因此这两个深度上的水平线列阵的匹配场定位性能比海底水平线列阵差.

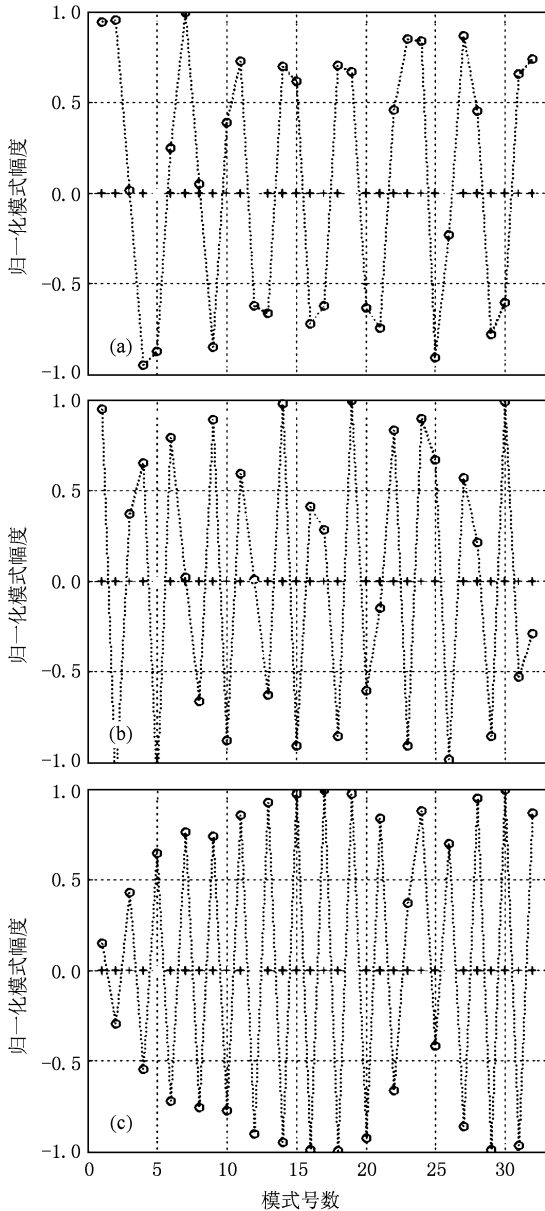


图 7 不同深度上模式幅度随模式号数的变化 (a) 49 m; (b) 79 m; (c) 100 m

3.3. 海底水平线列阵的匹配场定位性能

将水平线列阵布放于海底,深度为 100 m. 针对图 1 所示的海洋环境,将目标声源分别放置于海水表层(10 m),跃变层(25 m),和海水下部(75 m)三

个典型深度.图 8 给出了三个不同深度目标声源对应的匹配场定位模糊度平面(归一化).

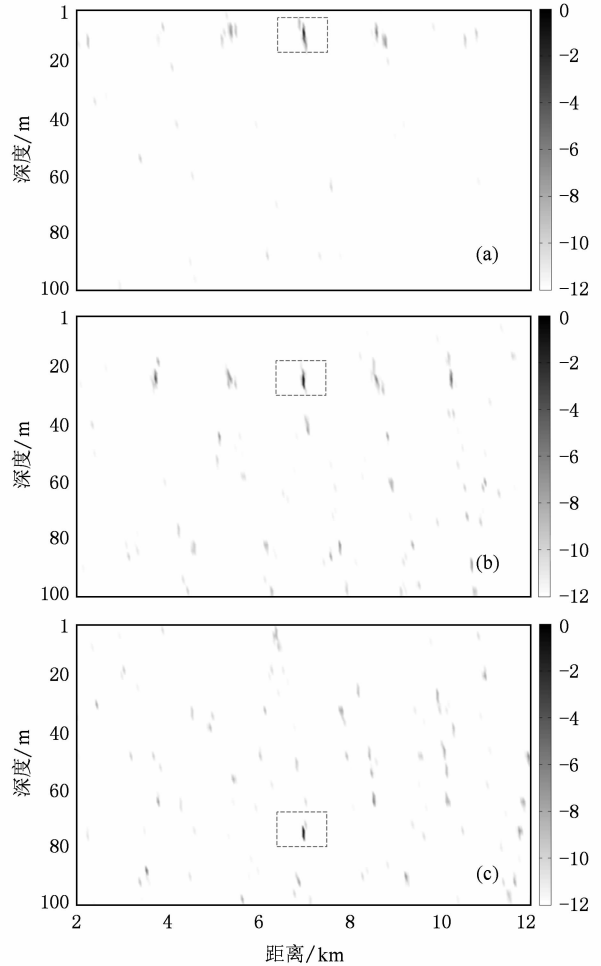


图 8 海底水平线列阵的匹配场定位模糊度平面(归一化) (a) 10 m; (b) 25 m; (c) 75 m

由图可见,海底水平线列阵均能对上述三种典型深度上的目标声源实现了良好的匹配场定位.当目标声源深度为 10 m 和 25 m 时,在目标声源深度上,与目标声源距离为 1.6 km 整数倍的位置出现了较强的旁瓣.任意两号模式在声源深度上的距离相关项^[21,22]为

$$\exp[i(k_m r - k_n R)] + \exp[i(k_n r - k_m R)]. \quad (8)$$

当 $r = R$, 上式在 $r = 2n\pi/(k_m - k_n)$ 处取最大值.因此在目标声源深度上的距离模糊间距为 $2\pi/(k_m - k_n)$, 即模式干涉距离.其中 7,8 号模式的模式干涉距离为 1.6 km.由于本文的仿真条件为典型夏季声速剖面,当声源深度位于跃变层以上时,前 6 号模式幅值在声源深度上均十分接近 0,它们对声场的贡献很弱,这使得 7,8 号模式干涉比较明显.

4. 结 论

本文研究了浅海波导中水平线列阵的匹配场定位性能,得到水平线列阵深度是影响其匹配场定位性能的重要因素,并且发现海底水平线列阵的匹配场定位性能最优.利用简正波传播模型计算得到各号简正波,通过比较不同接收深度上各号模式幅度的变化,揭示了海底水平线列阵的匹配场定位性能强于其他深度水平线列阵的物理机理.其根本原因是:在实际海洋环境中,海底声学边界条件既不可能是绝对软的,也不可能是绝对硬的.无论声速剖

面和海底地声参数如何变化,总有部分声能量透射入海底.这样各号模式在海底总是存在一定拖尾,即各号模式幅度均大于0,而在其他深度,一般有若干号模式幅度接近于0.因此在基阵孔径和阵元数满足要求的前提下,布放于海底的水平线列阵可以对各号模式进行充分采样,获得相应的目标声源信息,实现良好的匹配场定位.

采用同样的处理方法,仿真分析了不同声速剖面 and 不同海底参数等情况下水平线列阵深度对其匹配场定位性能的影响,得到了相似的结果.限于篇幅,仿真结果不再赘述.

-
- [1] Yang K, MA Y 2009 *Acta Phy. Sin.* **58** 1798 (in Chinese) [杨坤德、马远良 2009 物理学报 **58** 1798]
- [2] Li Z, Zhang R, Yan J P, Zhao H, Li F 2003 *Acta Acustica* **28** 425 (in Chinese) [李整林、张仁和、鄢锦、彭朝辉、李风华 2002 声学学报 **28** 425]
- [3] Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalevsky P N 1993 *IEEE J. Oceanic Eng.* **18** 401
- [4] Tolstoy A 1993 *Matched field processing for underwater acoustics* (Singapore: World Scientific) p14
- [5] Yang K 2008 *Matched-Field Processing for Underwater Acoustic Array Signals* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press) p165 (in Chinese) [杨坤德 2008 水声阵列信号的匹配场处理 (西安:西北工业大学出版社) 第165页]
- [6] Bogart C W, Yang T C 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **96** 1677
- [7] Tantom S L, Nolte L W 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **107** 2101
- [8] Siderius M, Nielsen P L, Gerstoft P 2003 *IEEE J. Oceanic Eng.* **28** 424
- [9] Barlee R M S, Chapman N R, Wilmut M J 2005 *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** 773
- [10] Tollefsen D, Wilmut M J, Chapman R 2005 *IEEE J. Oceanic Eng.* **30** 764
- [11] Tollefsen D, Dosso S E, Wilmut M J 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **120** 221
- [12] Tollefsen D, Dosso S E 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 788
- [13] Yang K, Ma Y, Sun C, Miller J H, Potty G R 2004 *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** 964
- [14] Yang K, Chapman N R, Ma Y 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 833
- [15] Zhang R, Li F 1999 *Science in China, Ser. A* **42** 739
- [16] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2000 *Computational Ocean Acoustics* (New York: American Institute of Physics) p67
- [17] Yu Y, Hui J, Zhao A, Sun G, Teng C 2008 *Acta Phy. Sin.* **57** 5742 (in Chinese) [余赟、惠俊英、赵安邦、孙国仓、滕超 2008 物理学报 **57** 5742]
- [18] Zhang R 1975 *Acta Phy. Sin.* **24** 200 (in Chinese) [张仁和 1975 物理学报 **24** 200]
- [19] Porter M B 1991 *The KRAKEN normal mode program* (La Spezia, Italy: SAACLANT Underwater Acoustic Research Centre)
- [20] Yang K, Ma Y 2006 *Acta Acustica* **31** 399 (in Chinese) [杨坤德、马远良 2006 声学学报 **31** 399]
- [21] Weston D E 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **68** 282
- [22] Hamson R M, Heitmeyer R M 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 1950

The performance of matched-field localization with a horizontal line array at different depths in shallow water^{*}

Zhang Tong-Wei[†] Yang Kun-De Ma Yuan-Liang Li Xue-Gang
(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)
(Received 9 July 2009; revised manuscript received 24 August 2009)

Abstract

The performance of matched-field localization with a horizontal line array (HLA) at different depths in shallow water is investigated by normal mode modeling and computer simulation. It is observed that the matched-field localization performance of a bottom-mounted HLA is better than that of a HLA at other depths in shallow water. The normal mode modeling is used to explain this result. According to the normal mode theory, the mode shape is a function of water depth. The absolute values of the modes at different depths are compared. It is shown that the number of modes whose absolute values close to zero is smaller at the bottom than at other depths. It means that the HLA deployed at the bottom can sample more modes, obtain more information of the source and achieve better localization performance.

Keywords: horizontal line array, matched-field localization, array depth

PACC: 4330, 9210V

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10774119), the Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-08-0455), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. SJ08F07), the Foundation of National Laboratory of Acoustics, and the NPU Foundation for Fundamental Research.

[†] E-mail: walternwpu@hotmail.com