

一种新的浅海目标方位估计方法

侯云山, 黄建国, 张立杰, 金勇

(西北工业大学航海学院, 710072, 西安)

摘要: 针对平面波假设下的目标方位估计方法对浅海中声源的定位存在偏差的问题, 提出了一种新的浅海目标方位估计方法. 采用可以反映浅海中声的远距离传播现象的简正波声场理论, 把观测点处的声压看成是若干阶简正波的叠加, 在平坦硬质海底和白高斯噪音的条件下, 构造出了均匀线列阵的接收信号的矩阵方程形式, 然后通过详细的数学推导给出了方位角的最大似然估计来完成对该方程的求解. 该方法比经典的匹配场处理方法形式简洁、计算量小, 比平面波条件下的信号子空间方法估计偏差小. 仿真数据表明: 随着信号入射方向和阵列法线夹角的增大, 平面波假设下的 MUSIC 方法的估计偏差随之线性增加, 而新方法的估计偏差并不显著增加; 随着信噪比的增加, 平面波假设下的 MUSIC 方法的偏差始终是 2° 左右, 而新方法估计偏差很小且趋于 0. 湖上试验结果验证了新方法可以有效实现浅海目标波达方向的渐近无偏估计.

关键词: 方位估计; 简正波声场理论; 均匀线列阵

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)10-1295-05

A Novel Bearing Estimation Method for Shallow Water Targets

HOU Yunshan, HUANG Jianguo, ZHANG Lijie, JIN Yong

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of biased bearing estimation of shallow water targets under plane-wave assumption, a novel bearing estimation method for shallow water target localization is proposed. The method adopts the normal modes sound wave theory which can truly reflect the phenomenon of numerous reflections from the bottom and great losses of acoustic energy accompanying sound propagation. The sound pressure at observation point is regarded as the superposition of some normal modes. Under the condition of flat solid seabed and white Gaussian noise, the received signal equation in matrix form is constructed for uniform linear array. The maximum likelihood bearing estimation is given as the solution of the equation by detailed mathematical derivation. Compared with classical matched field techniques, the proposed method is concise and costs much less in computational complexity. Compared with plane-wave subspace methods, the proposed method has less estimation bias. Simulation results show that while the bias of the plane-wave MUSIC grows linearly with the increase of incident angle relative to array normal, the bias of the proposed method doesn't grow evidently and that while the bias of the plane-wave MUSIC doesn't decrease too much and maintains about 2° with the increase of signal-to-noise ratio(SNR), the bias of the proposed method is quite small and approaches 0. Lake experiments validated the capability of the proposed method of reaching asymptotically unbiased bearing estimates of shallow water targets.

Keywords: bearing estimation; normal modes; uniform linear array

阵列信号处理的高分辨技术一直是国内外十分关注的研究热点,其中目标方位估计的高分辨技术是国内外研究的重点.该项技术的突破对声纳、雷达、地质勘探、生物医学工程等均有重要意义.

当前对平面波条件下的窄带信号波达方位估计方法的研究已日臻完善,涌现出多种多样的方位估计方法^[1].在人们迄今所熟知的各种能量形式中,声音在海洋中具有最强的传播能力.利用水声探测实现水下目标的方位估计已被广泛应用于人类海洋活动中,如航空声纳的水下目标探测和方位估计、通讯、导航等.

但是,浅海中声波的多模态传播使得现有的平面波波达方向估计技术对声源方位估计存在偏差^[2],如波束形成^[3]、MUSIC^[4]、ESPRIT^[5]和最大似然方法^[6]等得到的方位估计值均为有偏估计,且偏差随声源方位角度(相对于阵列法线方向)和声波模态数目的增大而增大.

为了实现浅海中目标的准确探测和估计,有必要建立符合水下声传播特点的阵列信号模型,并研究该模型下的目标检测和方位估计问题.一些科研工作者在新模型的建立^[7-11]和新模型下新的测向方法^[12-17]方面做了大量的研究,其中匹配场处理方法^[15-17]可以得到很好的无偏方位估计,但是这种方法要求具有许多先验信息,并且还有计算量巨大的缺点,因此难于在工程实践中广泛应用.

本文针对浅海声场特点,采用可以正确反映浅海中声的远距离传播导致多次的界面反射和能量衰减现象的简正波理论^[8]和最大似然估计,提出一种形式简洁的目标方位估计方法.与平面波条件下的窄带信号波达方位估计方法相比,本文方法具有估计偏差小且偏差不随信号入射方向变化而显著增加,以及随着信噪比的增加可以得到声源方位的渐进无偏估计的特点.与匹配场模型处理方法相比,本文方法具有形式简洁、便于使用和计算量小等优点.计算机仿真和 underwater 试验均表明,本文方法可以准确地估计水下目标的方向.

1 简正波阵列信号模型

把浅海看作水深为常数 H 和声速均匀的水层,点声源位于水下 z_0 处,则其远场声场在点 (r, z) 处的声压可近似表示为有限阶简正波的叠加,即

$$p(r, z) \approx \sum_{l=1}^L p_l(r, z) \quad (1)$$

式中: r 表示距声源的距离; z 表示观察点深度 ($0 \leq z \leq H$); $p_l(r, z)$ 表示第 l 阶简正波,其表达式为

$z \leq H$); $p_l(r, z)$ 表示第 l 阶简正波,其表达式为

$$p_l(r, z) = -j \left(\frac{2\pi}{\xi_l r} \right)^{1/2} Z_l(z) Z_l(z_0) \cdot \exp(-j(\xi_l r - \pi/4)) \quad (2)$$

其中 $Z_l(z)$ 称为本征函数.对于硬质海底,有

$$p_l(r, z) = -\frac{2}{H} j \left(\frac{2\pi}{\xi_l r} \right)^{1/2} \sin(\alpha_l z) \sin(\alpha_l z_0) \cdot \exp(-j(\xi_l r - \pi/4)) \quad (3)$$

式中: ξ_l 和 α_l 分别为波数矢量 k 沿水平方向和垂直方向的分量, ξ_l 被称为第 l 阶简正波的水平波数.由式(3)可以看出,每一阶简正波是沿深度 z 方向作驻波分布、沿水平 r 方向传播的波.

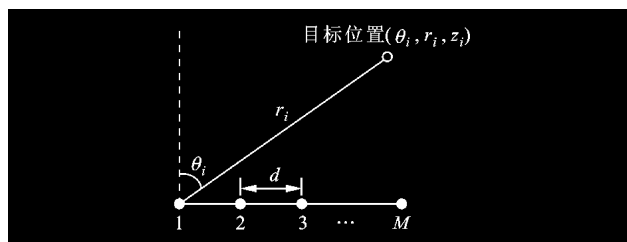
假设浅海中的阵列为 M 元均匀线列阵,阵元间距为 d ,水平布放于水下 z_a 处,如图1所示.有 D 个互不相关的远场信号,中心频率为 f_0 ,分别位于距阵列为 r_i 的水下 z_i 处,入射方位角为 θ_i ($i=1, 2, \dots, D$),那么第 m 个阵元的输出可表示为

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^D \sum_{l=1}^L p_{li}(r_i, z_a) \eta_l(t) \exp(j2\pi f_0 t) \cdot \exp(j(m-1)d\xi_l \sin(\theta_i)) + w_m(t) \quad (4)$$

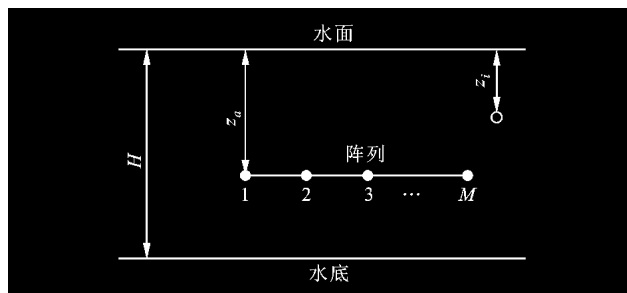
式中: $i \in (1, \dots, D)$; $m \in (1, \dots, M)$; $l \in (1, \dots, L)$; $p_{li}(r, z)$ 为第 i 个信号的第 l 阶简正波; $w_m(t)$ 是第 m 个阵元上的高斯加性白噪声; $\eta_l(t)$ 为基带信号幅度,它受信源和信道浮动影响是一个慢变随机过程,其方差代表信号强度.

将 M 个阵元在特定时刻接收的信号排列成一个列矢量,可得

$$\mathbf{X} = \mathbf{BPS} + \mathbf{W} \quad (5)$$



(a)俯视图



(b)侧视图

图1 信号源和接收阵列的几何结构

式中: $\mathbf{B} \in \mathbf{C}^{M \times LD}$ 为阵列流形矩阵, $\mathbf{B} = [\mathbf{A}(\theta_1), \dots, \mathbf{A}(\theta_D)]$, 其中 $\mathbf{A}(\theta_i) = [\mathbf{a}(\xi_1, \sin\theta_i), \dots, \mathbf{a}(\xi_L, \sin\theta_i)]$, $\mathbf{a}(\xi_l, \sin\theta_i) = [1, \exp^{j d \xi_l \sin\theta_i}, \dots, \exp^{j(M-1)d \xi_l \sin\theta_i}]^T$; $\mathbf{P} \in \mathbf{C}^{LD \times D}$ 为简正波矩阵, 其中 $\mathbf{P} = \text{diag}[\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_D]$, $\mathbf{P}_i = [p_{1i}, \dots, p_{Li}]^T$; $\mathbf{X} = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$ 为阵列输出向量; $\mathbf{S} = [\eta_1(t), \dots, \eta_D(t)]^T$ 为信号幅度向量; $\mathbf{W} = [w_1(t), \dots, w_M(t)]^T$ 为噪声向量。

将式(5)与文献[1]中平面波的阵列模型比较, 可以发现, 本文模型的阵列流型矩阵不仅和目标的方位有关, 还取决于目标和阵列的相对位置。

2 最大似然方位估计

本文使用最大似然估计方法来求解式(5)。为了表述方便, 将式(5)重新记为

$$\mathbf{X} = \mathbf{D}(\theta)\mathbf{S} + \mathbf{W} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{D}(\theta) = \mathbf{B}\mathbf{P}$ 。对于未知的确定信号模型和阵元噪声为 0 均值白噪声的条件, 根据式(6), 阵列输出服从 M 阶高斯分布, 即 $\mathbf{X} \sim \mathbf{N}(\mathbf{D}(\theta)\mathbf{S}, \delta^2 \mathbf{I}_M)$ 。显然, 输出矢量 N 次快拍的联合概率密度函数为

$$f(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_N) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\det(\pi \delta^2 \mathbf{I}_M)} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\delta^2} \|\mathbf{X}_i - \mathbf{D}(\theta)\mathbf{S}\|^2\right) \quad (7)$$

式中: $\|\cdot\|$ 定义为 Euclidean 范数。对式(7)两边取负对数, 可得

$$-\ln f = -MN \ln(\pi \delta^2) - \frac{1}{\delta^2} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{X}_i - \mathbf{D}(\theta)\mathbf{S}\|^2 \quad (8)$$

式中: f 为关于未知参数 $\theta, \delta^2, \mathbf{S}$ 的多维非线性函数。对式(8)直接求解计算量相当大, 为此采用分离变量的方法^[18], 首先得到未知参数 $\delta^2, \mathbf{S}$ 的确定性最大似然估计分别为

$$\hat{\delta}^2 = \frac{1}{M} \text{tr}(\mathbf{P}_D^\perp \hat{\mathbf{R}}) \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{D}^+ \mathbf{X} \quad (10)$$

式中: $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹; $\mathbf{P}_D^\perp$ 表示矩阵 $\mathbf{D}$ 的正交投影矩阵, $\mathbf{P}_D^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{D}(\mathbf{D}^H \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^H$; $\mathbf{D}^+ = (\mathbf{D}^H \mathbf{D})^{-1} \cdot$

$\mathbf{D}^H$; $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{X}(k) \mathbf{X}^H(k)$ 。将式(9)、式(10)代入式(8), 可以得到参数 θ 的最大似然估计为

$$\hat{\theta}_{\text{ML}} = \arg \min_{\theta} \{ \text{tr}(\mathbf{P}_D^\perp \hat{\mathbf{R}}) \} = \arg \max_{\theta} \{ \text{tr}(\mathbf{P}_D \hat{\mathbf{R}}) \} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{P}_D = \mathbf{D}(\mathbf{D}^H \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^H$, 令 $\gamma = \text{tr}(\mathbf{P}_D \hat{\mathbf{R}})$ 。

对于一个给定的模型, 最大似然估计方法已经被证明是一种渐进无偏估计^[19], 但这个模型是否符合实际环境, 还要由实验数据来检验。

3 性能分析与仿真

对本文方法和基于平面波假设的 MUSIC 方法在浅海中的方位估计性能进行仿真对比。声场环境为硬底均匀浅海声场, 水深 $H = 100$ m, 声速 $c = 1500$ m/s, 信号载波频率 $f_0 = 50$ kHz, 声源位于水下 51 m 处。阵列为 10 元均匀线列阵, 阵元间距为载波频率半波长, 阵列水平布放于水下 51 m 处。以下各图均为 100 次独立实验的统计结果。

随着信号方位角的增大, 估计偏差 $\epsilon = E\{|\theta - E(\theta)|\}$ 和均方根误差 $\eta = (E\{|\theta - E(\theta)|^2\})^{1/2}$ 的变化曲线分别如图 2 和图 3 所示。图中 0° 方向为阵列法线方向, 信噪比为 8 dB。由图中曲线不难看出, 随着信号入射方向偏离阵列法线方向, MUSIC 方法的方位估计偏差越来越大, 且呈线性增长的趋势, 而本文方法的方位估计偏差很小, 且不随信号入射方向变化而显著增加。

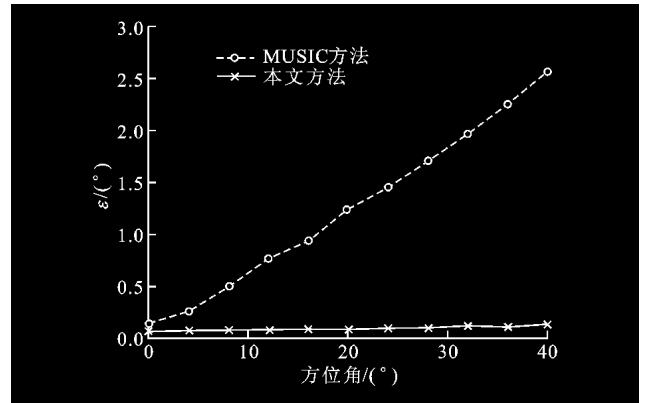


图 2 浅海 DOA 估计偏差随信号方位角变化关系图

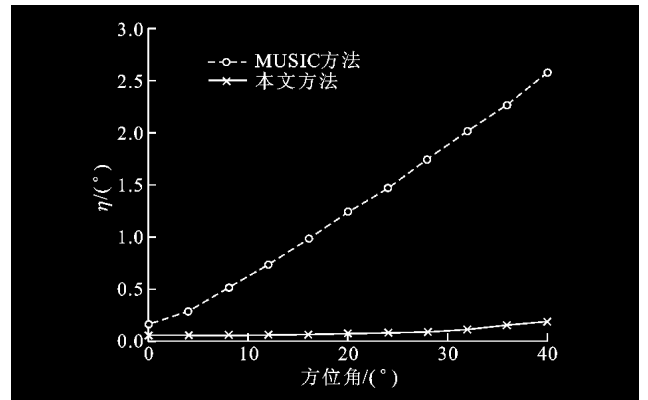


图 3 浅海 DOA 估计均方根误差随信号方位角变化关系图

固定信号入射方向为 30° , 本文方法和 MUSIC 方法的方位估计偏差和均方根误差与信噪比的关系如图 4 和图 5 所示. 可以看出: 增加信噪比并不能消除 MUSIC 方位估计偏差, 随着信噪比的增加 MUSIC 方位估计始终存在较大偏差, 且该偏差无减小趋势, 其方位估计偏差值恒定为 2° ; 与此相反, 本文的方位估计偏差随信噪比的增加趋近于 0.

实验结果表明, 本文方法可以获得浅海目标的渐进无偏方位估计, 而基于平面波假设的 MUSIC 方法获得的浅海目标的方位是有偏差的.

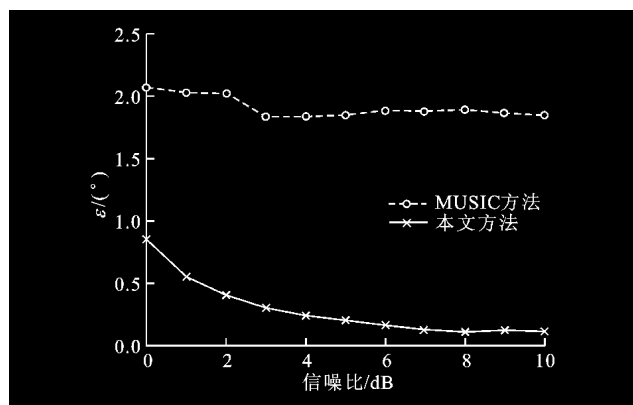


图4 浅海 DOA 估计偏差随信噪比变化关系图

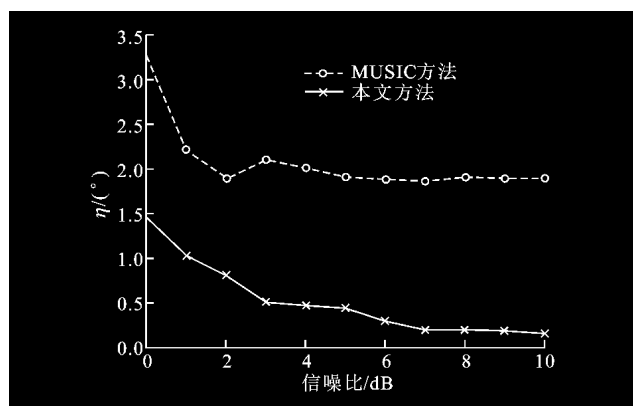


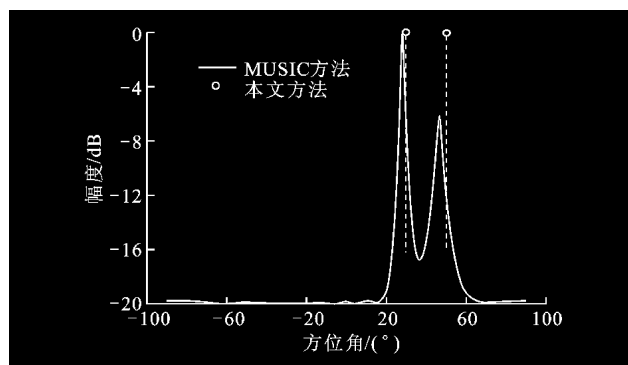
图5 浅海 DOA 估计均方根误差随信噪比变化关系图

4 湖上试验验证

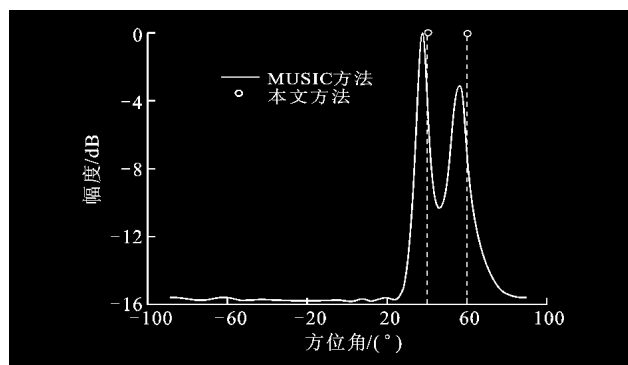
对水下目标探测系统来说, 进行海洋试验是必要的. 但是, 由于海洋中不同时间和地点气温和海况的影响以及复杂的环境噪声, 所得数据的时效性比较强, 受到的限制也比较多, 耗费的资金很多, 因此一般只用于系统测试的最后环节, 而湖试作为海试前的重要环节, 可以利用铺设好的设备对目标和探测系统进行全面的监控, 有利于试验数据的获取和系统各种参数的调整. 因此, 我们选取水深和面积达到浅海标准的千岛湖进行了水下试验.

为了验证本文提出的方法在实际水声环境中的

有效性, 2006 年 10 月我们在浙江省千岛湖进行了湖上试验, 试验地点水深约 30 m, 接收声纳基阵为 10 元水平均匀线列阵, 阵元间距为中心频率 f_0 ($f_0 = 6$ kHz) 的半波长. 2 个独立声靶发射信号. 接收阵和声靶均置于水下 8 m, 声靶和接收阵距离 50 m. 在试验过程中, 将 2 个声靶分别置于船头的左右两舷, 通过旋转接收阵列法线方向来获得不同的信号方位角. 图 6 给出了当信号方位角相对于接收阵列法线方向分别为 $[30^\circ, 50^\circ]$ 和 $[40^\circ, 60^\circ]$ 时, 基于平面波假设的 MUSIC 得到的空间谱估计和本文方法所得结果的对比情况. 图 7 给出了这 2 种情况下的本文方法的空间角谱图. 图中 x 轴和 y 轴分别是 2 个目标的角度搜索范围 θ_1 和 θ_2 , z 轴是式 (11) 中出现的 $\gamma = \text{tr}\{\mathbf{P}_{D(\theta)} \hat{\mathbf{R}}\}$. 不难看出, 本文方法得到了信号波达方向的无偏估计, 克服了因浅海中声波的多模态传播造成的信号方位估计偏差.



(a) 2 个信号真实方位角分别为 30° 和 50°

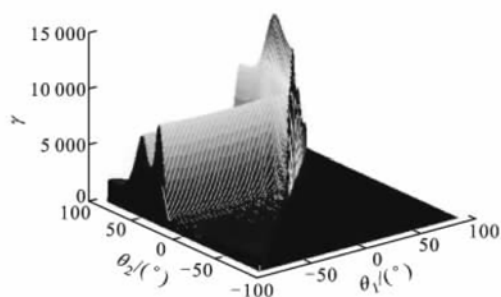


(b) 2 个信号真实方位角分别为 40° 和 60°

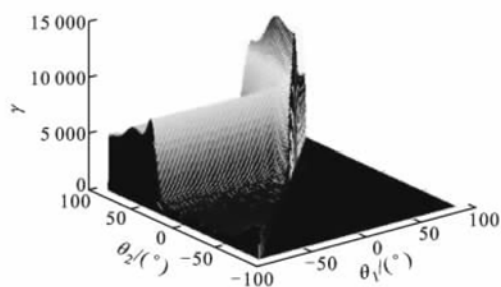
图6 湖试所得的方位估计空间谱

5 结束语

本文提出了一种新的形式简洁的浅海目标方位估计方法. 该方法采用了可以反映浅海中声的远距离传播导致多次的界面反射和能量衰减现象的简正波声场理论和最大似然估计. 计算机仿真和千岛湖上试验结果均表明, 该方法可以有效克服因声波



(a) 2个信号真实方位角为 30°和 50°



(b) 2个信号真实方位角为 40°和 60°

图7 湖试中本文方法的空间角谱

多模态传播导致的方位估计偏差,实现浅海中信号波达方向的无偏估计。

参考文献:

- [1] KIM H, VIBERG M. Two decades of array signal processing research [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4):67-94.
- [2] IVAKIN A. A model of narrow-band normal-mode reverberation in shallow water [J]. J Acoust Soc Am, 2007, 122(5): 3091-3092.
- [3] CAPON J. High resolution frequency wave number spectrum analysis [J]. IEEE Proc, 1969, 57(8): 1408-1418.
- [4] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans on AP, 1986, 34(3): 276-280.
- [5] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. ESPRIT—a subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise [J]. IEEE Trans on ASSP, 1986, 34(10): 1340-1342.
- [6] BOHME J F. Estimation of source parameters by maximum likelihood and nonlinear regression [C]// Proceedings of ICASSP. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1984: 2296-2299.
- [7] BREKHOVSKIKH L M, LYSANOV Y. Fundamentals of ocean acoustics [M]. 3rd ed. New York, USA: Springer, 2003:103-105.
- [8] ROUSEFF D. Statistics of normal-mode amplitudes in shallow water [J]. J Acoust Soc Am, 2003, 113(4): 2186-2204.
- [9] BUCKINGHAM M J, GIDDENS E M. On the acoustic field in a Pekeris waveguide with attenuation in the bottom half-space [J]. J Acoust Soc Am, 2006, 119(1): 123-142.
- [10] ISAKSON M J, YARBROUGH R A, WILSON P S. Finite-element modeling of long range, range-dependent acoustic propagation in shallow water [J]. J Acoust Soc Am, 2007, 122(5): 3074-3089.
- [11] IVAKIN A. A model of narrow-band normal-mode reverberation in shallow water [J]. J Acoust Soc Am, 2007, 122(5): 3091-3092.
- [12] NAIDU P S, RAO B P. Performance analysis of subspace based method for source localization in shallow water [J]. Signal Processing, 1996, 48(3): 175-182.
- [13] NAIDU P S, SHANKAR H U. Broadband source localization in shallow water [J]. Signal Processing, 1999, 72(1): 107-116.
- [14] BECKER K M, FRISK G V. High-resolution modal mapping in a complex shallow-water environment [J]. J Acoust Soc Am, 1999, 105(2): 1310-1324.
- [15] TOLSTOY A. Matched field processing for underwater acoustics [M]. Singapore: World Scientific, 1993: 103-105.
- [16] BOGART C W, YANG T C. Source localization with horizontal arrays in shallow water: spatial sampling and effective aperture [J]. J Acoust Soc Am, 1994, 96(3): 1677-1686.
- [17] SNELLEN M, SIMONS D G. An evaluation of the accuracy of shallow water matched field inversion results [J]. J Acoust Soc Am, 2001, 109(2): 514-527.
- [18] CHEN J C, HUDSON R E, Yao K. Maximum-likelihood source localization and unknown sensor location estimation for wideband signals in the near-field [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(8): 1843-1854.
- [19] STOICA P, NEHORAI A. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(5): 720-741.

(编辑 刘杨)