

基于波束-波数域非相干匹配的浅海运动声源深度估计方法*

周玉媛¹⁾²⁾³⁾ 孙超^{1)2)3)†} 谢磊¹⁾²⁾³⁾ 刘宗伟⁴⁾

1) (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2) (西北工业大学, 陕西省水下信息技术重点实验室, 西安 710072)

3) (西北工业大学青岛研究院, 青岛 266200)

4) (自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061)

(2022年12月12日收到; 2023年2月17日收到修改稿)

浅海波导运动声源定位研究中, 在声源距离未知时估计声源深度一直是个具有挑战性的问题. 现有深度估计方法对声源未知初始距离敏感, 且要求声源运动形成的水平合成孔径长度远大于模态干涉长度. 针对这两个问题, 本文提出一种基于波束-波数域非相干匹配的浅海运动声源深度估计方法, 首先将垂直阵接收声压数据在深度和水平合成孔径方向分别进行波束形成变换到波束-波数域, 波束-波数平面的峰值幅度仅包含与声源深度有关的模态激励, 峰值位置与模态传播角和水平波数相对应; 然后, 在波束-波数平面内提取各峰值幅度, 并与拷贝计算的模态深度函数进行非相干匹配, 实现声源深度估计. 所提方法在波束-波数二维平面内进行模态分离, 消除了声源距离相关项, 提高了模态分辨能力, 可在声源初始距离未知和水平合成孔径长度小于模态干涉长度的情况下实现声源深度估计. 仿真和 SWellEx-96 实验数据处理结果验证了所提方法的优越性能.

关键词: 浅海波导, 运动声源, 深度估计, 波束-波数域

PACS: 43.60.Jn, 43.60.-c, 43.30.Bp

DOI: 10.7498/aps.72.20222361

1 引言

浅海波导环境中目标分类与辨识的研究一直以来备受关注, 其中针对声源深度判别的方法较多, 主要利用水面和水下声源激励声场存在模态强度^[1-4]、相位关系^[5]和干涉结构^[6]等特征差异性进行二元判决. 然而, 深度判别是一种粗糙的目标分类方式, 目标声源深度估计更有利于提高目标辨识准确程度, 是获取水下攻防作战“先机”的重要环节.

物理传播模型在声源深度估计问题中的最早应用是匹配场处理 (matched field processing, MFP)^[7], MFP 将接收声压与声场模型计算的拷贝

声压进行匹配, 估计结果受海面、海底散射和体积衰减等参数影响较大. 相比之下, 匹配模态处理 (matched mode processing, MMP)^[8]将接收声压投影到模态空间, 选取受散射或衰减影响小的模态进行匹配处理, 可降低声场模型失配的敏感度. 对 MFP 或者 MMP 而言, 声源深度和距离估计过程中存在耦合关系, 声源深度估计结果受距离估计精度的影响, 反之亦然. 后来, 学者们将两者解耦, 由二维搜索过程缩减为一维, 实现了对声源深度单独估计. Shang^[9]和 Yang^[10]利用垂直阵模态滤波方法分离和提取各阶模态幅度, 并与拷贝计算的模态深度函数进行匹配, 可实现声源深度估计. 但是, 该类方法要求与水深相当的垂直阵列孔径^[11], 才

* 国家自然科学基金 (批准号: 11904342, 12274348, 11534009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: csun@nwpu.edu.cn

能满足模态采样信息的正交完备性, 确保各阶模态幅度有效估计. 使用单水听器也可估计声源深度, 但由于缺少垂直方向采样信息, 学者们先将阵元域数据进行时频分析以提取模态幅度^[12,13], 后通过模态幅度匹配实现声源深度估计, 此类方法通常要求声源距离已知. 当声源距离未知时, Reeder^[14]利用垂直波数连续谱被声源和接收深度调制的特征, 通过傅里叶变换进行波数谱周期性分析, 估计声源深度. 但波数连续谱能量随距离增大而迅速衰减, 该方法仅限于近场条件下的声源深度估计.

近年来, 学者们基于声源运动产生的水平合成孔径, 发展出多种运动声源深度估计方法^[15-17]. 首先, Yang^[15]提出了基于水平合成孔径波束形成的运动声源深度估计方法, 先将单阵元接收信号变换到波数空间以提取多个波数谱峰幅度, 通过与拷贝模态深度函数进行匹配可实现声源深度估计. 同时 Yang^[15]的研究中进一步发现, 当垂直阵接收深度覆盖声源深度且阵元间距足够密时, 将各阵元上提取的波数谱峰幅度之和的平方作为以阵元深度为自变量的模糊函数, 可在环境参数未知情况下估计声源深度. 但是 Yang^[15]的两种方法对声源初始距离敏感, 且需要对恒定深度和速度移动的声源进行长时间跟踪以获得较大水平合成孔径长度. 在 Yang^[15]工作基础上, Yang 和 Xu^[16]通过距离偏移搜索, 降低了未知初始距离对运动声源深度估计结果的影响. 但是, 波数谱的峰值幅度易受到环境噪声、运动孔径和接收深度等多种因素制约, 导致模态激励估计出现偏差, 因此该类方法要求高信噪比和远大于模态干涉长度的水平合成孔径长度, 才能提高模态分离程度, 最终实现声源深度估计. 后来, Zhang 等^[17]提出了波束强度非相干匹配处理方法 (incoherent matched beam processing, IMBP), 将各距离处的垂直阵波束强度进行非相干平均, 并与拷贝波束强度匹配以实现声源深度估计. 相比 Yang 和 Xu^[16]所提方法, IMBP 方法经波束形成获得了接收深度上的空间增益, 但是当水平合成孔径长度小于模态干涉长度时, 距离平均波束强度表达式中与声源距离有关模态交叉项不可忽略, 此时若声源初始距离与拷贝波束强度使用的初始距离不一致, 该方法将失效.

鉴于实际应用场景中水平合成孔径长度有限以及声源初始距离未知等因素会导致现有的运动声源深度估计方法性能下降, 本文提出了一种基于

波束-波数域非相干匹配的浅海运动声源深度估计方法 (incoherent matched beam-wavenumber processing, IMBWP). 该方法首先将垂直阵接收数据在深度方向波束形成, 波束输出峰值对应模态幅度; 随后将各距离处的波束输出进行水平合成孔径波束形成, 变换到垂直波束-水平波数域 (波束-波数域), 从而消除波束输出中与声源距离有关的相位项; 最后提取波束-波数域峰值幅度并与拷贝模态深度函数匹配, 获得深度估计结果. 不同于 Yang 和 Xu^[16]所提运动声源深度估计方法, IMBWP 方法提取的波束-波数峰值幅度仅包含与声源深度有关的模态激励, 且波束-波数二维平面内的模态分离程度更高, 对于较短水平合成孔径长度 (小于模态干涉长度), IMBWP 方法估计误差更小. 除此之外, IMBWP 方法利用水平合成孔径波束形成, 消除了波束输出中与距离有关项, 当声源初始距离未知时仍可以估计声源深度.

本文其他部分安排如下: 第 2 节首先建立水平匀速运动声源声场模型, 然后以该模型为基础, 推导了波束-波数域输出表达式, 并给出基于波束-波数域非相干匹配的运动声源深度估计方法原理; 第 3 节仿真检验 IMBWP 方法在不同声源深度上的估计性能, 讨论声源运动产生的水平合成孔径长度和未知初始距离对 IMBWP 方法性能的影响, 并与 IMBP 方法进行对比; 第 4 节将利用 SWellEx-96 实验数据验证 IMBWP 方法的优越性能; 第 5 节给出相关结论.

2 波束-波数域非相干匹配估计运动声源深度

2.1 水平匀速运动声源的声场模型

如图 1 所示, 位于 (r_1, z_s) 声源以恒定径向速度 v 朝向远离固定接收垂直阵的方向进行水平运动 (声源反方向运动亦然). 垂直阵各阵元所在接收深度为 z_1, z_2, \dots, z_N , 将持续接收运动声源辐射的声压信号. 将声源运动形成的水平合成孔径长度 Δr 等间隔划分成 L 段, 则 $\Delta r = r_L - r_1 = (L - 1)dr$, 其中水平间距 dr 是在时长 dt 内声源移动的相对距离, 即 $dr = vdt$.

设声源辐射信号频率为 f , 接收深度处声速为 c , 由于只有声源运动而接收阵固定, 则声源运动产生的多普勒效应对接收声场的影响主要表现为频率偏移 $\Delta f = fv/c$, 而不会产生波数偏移^[18].

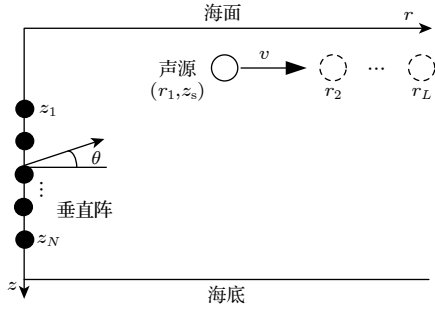


图 1 垂直阵和水平运动声源位置示意图

Fig. 1. Vertical array and the position of the horizontal moving source.

在距离无关的浅海波导环境和远场条件下, 根据简正波理论^[19], 深度为 z_s 的简谐声源在距离 r 和深度 z 处激发的声场可表示为

$$p(r, z, z_s) = Q \sum_{m=1}^M \frac{1}{\sqrt{k_{rm}r}} \phi_m(z_s) \phi_m(z) e^{-ir(k_{rm} - i\alpha_m)}, \quad (1)$$

式中, Q 是常数, M 是传播模态个数, $\phi_m(\cdot)$, k_{rm} 和 α_m 分别表示第 m 阶模态的模态深度函数、水平波数和衰减系数. 当水平合成孔径长度 Δr 远小于声源初始距离 r_1 时, 衰减损失在声源水平移动方向上的变化可忽略, 存在近似关系 $e^{-r_l \alpha_m} \approx e^{-r_1 \alpha_m}$, $l = 1, 2, \dots, L$.

根据图 1 建立的声源水平匀速运动场景, 结合 (1) 式, 可将垂直阵第 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 个阵元接收的第 $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ 段接收数据在频点 f_d ($f_d = f + \Delta f$) 处声压表示为各阶模态幅度加权之和:

$$p(r_l, z_n, z_s) \approx \phi^T(z_n) \mathbf{a}(r_l, z_s), \quad (2)$$

式中, 上角标 T 表示转置, 加权系数 $\phi(z_n)$ 是由 M 阶模态深度函数 $\phi_m(\cdot)$ 在接收深度 z_n 处的幅值组成向量:

$$\phi(z_n) = [\phi_1(z_n), \phi_2(z_n), \dots, \phi_M(z_n)]^T, \quad (3)$$

$\mathbf{a}(r_l, z_s)$ 是由 M 阶模态幅度组成向量,

$$\mathbf{a}(r_l, z_s) = [a_1(r_l, z_s), a_2(r_l, z_s), \dots, a_M(r_l, z_s)]^T, \quad (4)$$

其第 m 个元素:

$$a_m(r_l, z_s) = \frac{\gamma_m}{\sqrt{k_{rm}r_l}} \phi_m(z_s) e^{-ir_l k_{rm}}, \quad (5)$$

包含了与 z_s 相关的模态激励 $\phi_m(z_s)$, $\gamma_m = Qe^{-r_1 \alpha_m}$ 为实数.

由 (2) 式知, 任意位置处接收声压 $p(r_l, z_n, z_s)$ 中仅各阶模态幅度 $\mathbf{a}(r_l, z_s)$ 包含声源深度 z_s . 此外, 由 (5) 式可知, 各阶模态幅度是由声源深度相关的

模态激励和声源距离相关的相位项共同组成. 因此, 为了独立实现运动声源的深度估计, 需从声压表达式中提取与深度有关各阶模态幅度信息, 同时去除与各声源距离 r_1, r_2, \dots, r_L 有关的相位项, 从而消除未知距离对声源深度估计的影响.

本文将在 2.2 节和 2.3 节先后进行垂直深度方向波束形成和水平合成孔径波束形成, 获得仅与声源深度相关的波束-波数域输出, 进而在 2.4 节通过波束-波数域非相干匹配估计运动声源深度.

2.2 垂直深度方向波束形成

将各阵元接收的第 $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ 段声压数据组成向量形式:

$$p(r_l, z_{1:N}, z_s) = [p(r_l, z_1, z_s), p(r_l, z_2, z_s), \dots, p(r_l, z_N, z_s)]^T, \quad (6)$$

在垂直深度方向进行常规波束形成, 由波束导向向量 $w(\theta)$ 加权,

$$w(\theta) = [e^{ik_0 z_1 \sin \theta}, e^{ik_0 z_2 \sin \theta}, \dots, e^{ik_0 z_N \sin \theta}]^T, \quad (7)$$

式中, θ 是波束扫描角度 (如图 1 所示), 介质波数 $k_0 = 2\pi f/c$. 接收距离 r_l 处的波束输出:

$$y(\theta, r_l, z_s) = w^H(\theta) p(r_l, z_{1:N}, z_s), \quad (8)$$

式中, 上角标 H 表示共轭转置. 将 (2) 式代入 (8) 式, 常规波束输出结果:

$$y(\theta, r_l, z_s) = \sum_{m=1}^M a_m(r_l, z_s) \sum_{n=1}^N \phi_m(z_n) e^{-ik_0 z_n \sin \theta}. \quad (9)$$

由 WKB 近似理论知, 模态深度函数可表示为上、下行波之和形式^[18]. 因此, (9) 式可近似为以扫描角度 θ 为自变量的 Dirac delta 函数形式:

$$y(\theta, r_l, z_s) \approx \sum_{m=1}^M a_m(r_l, z_s) \delta(\sin \theta - \sin \theta_m), \quad (10)$$

式中, θ_m 是模态传播角^[18], 由 $\sin \theta_m = \sqrt{k_0^2 - k_{rm}^2}/k_0$ 定义. 当扫描角度 $\theta = \theta_m$ 时, 常规波束输出将出现峰值:

$$y(\theta_m, r_l, z_s) \approx a_m(r_l, z_s) = \frac{\gamma_m}{\sqrt{k_{rm}r_l}} \phi_m(z_s) e^{-ir_l k_{rm}}. \quad (11)$$

由 (10) 式知, 各波束输出峰值对应各阶模态幅度, 在波束域可实现各阶模态幅度的初步分离. 但是, 由 (11) 式知, 波束峰值表达式中不仅存在与声源深度相关的模态激励, 还包含了与声源未知距离相

关的相位项。

为此, Zhang 等^[17]所提 IMBP 方法将波束输出 (10) 式) 与其共轭相乘, 获得的波束强度表达式由 M 阶模态相干项与不同模态交叉相乘项组成. 虽然模态相干项中消除了与距离有关的相位, 但是模态交叉项中存在与 $(k_{rm} - k_{rn})r_l$ 有关的相位. 只有在远大于模态干涉长度的水平合成孔径长度上进行波束强度平均, 才能忽略交叉项从而降低声源距离的影响. 本文所提 IMBWP 方法则通过水平合成孔径波束形成变换到波束-波数域, 消除 (10) 式中声源未知距离相关项, 进一步实现模态分离.

2.3 水平合成孔径波束形成

水平合成孔径波束形成是将各个声源距离 r_1, r_2, \dots, r_L 对应的 L 段波束输出 $y(\theta, r_l, z_s), l \in \{1, 2, \dots, L\}$ 组成向量形式:

$$y(\theta, r_{1:L}, z_s) =$$

$$[y(\theta, r_1, z_s), y(\theta, r_2, z_s), \dots, y(\theta, r_L, z_s)]^T, \quad (12)$$

并由导向向量 $w(k_r)$ 加权, 获得波束-波数域输出:

$$y(\theta, k_r, z_s) = w^H(k_r)y(\theta, r_{1:L}, z_s), \quad (13)$$

式中

$$w(k_r) = \left[\sqrt{k_r} S_1, \sqrt{k_r} S_2 e^{-idr k_r}, \dots, \sqrt{k_r} S_L e^{-i(L-1)dr k_r} \right]^T, \quad (14)$$

k_r 是扫描波数, 其取值范围 $k_r \in \left[\frac{2\pi f}{c_{\max}}, \frac{2\pi f}{c_{\min}} \right]$, c_{\max} 与 c_{\min} 分别表示水体中最大和最小声速, $\sqrt{k_r}$ 和 S_l 均是加权系数, $\sqrt{k_r}$ 用于补偿模态幅度的幅值部分, 加权系数

$$S_l = \left[\sum_{n=1}^N |p(r_l, z_n, z_s)|^2 \right]^{-1/2} \approx \sqrt{r_l} \quad (15)$$

用于补偿声源水平移动时的距离扩展损失. 值得注意的是, 由于导向向量 $w(k_r)$ 不依赖于声源初始距离 r_1 , 因此水平合成孔径波束形成无需预知声源初始距离.

将 (11) 式、(14) 式和 (15) 式代入 (13) 式, 波束-波数域输出可整理为

$$y(\theta, k_r, z_s) \approx \sum_{m=1}^M \gamma_m \delta(\theta - \theta_m) \sqrt{\frac{k_r}{k_{rm}}} \phi_m \times (z_s) \sum_{l=1}^L e^{-i(l-1)dr(k_{rm}-k_r)}. \quad (16)$$

为避免在波数空间出现栅瓣, 根据奈奎斯特准则和扫描波数 k_r 的取值范围, 要求水平合成孔径的阵元间距 $dr < (c_{\max} - c_{\min})/f$, 故应合理选取处理时长 dr , 使 dr 满足采样要求. 假设 dr 恒定, 则 (16) 式中右侧累加项可化简为

$$\sum_{l=1}^L e^{-i(l-1)dr(k_{rm}-k_r)} = e^{-i(k_{rm}-k_r)\Delta r/2} \frac{\sin[(k_{rm}-k_r)\Delta r/2]}{\sin[(k_{rm}-k_r)dr/2]}. \quad (17)$$

由 (16) 式和 (17) 式知, 当扫描角度和扫描波数分别与第 m 阶模态传播角和水平波数对应时, 即 $(\theta, k_r) = (\theta_m, k_{rm})$, 波束-波数域输出将出现峰值, 且峰值幅度为

$$|y(\theta_m, k_{rm}, z_s)| \approx \gamma_m \phi_m(z_s), \quad (18)$$

式中, 波束-波数域输出峰值幅度与声源未知距离无关, 而与包含声源深度的模态激励 $\phi_m(z_s)$ 有关.

2.4 波束-波数域非相干匹配估计声源深度

由 2.2 节和 2.3 节知, 垂直阵接收声压数据经过两次波束形成变换到波束-波数域, 其输出峰值表达式最终可化简为 (18) 式. 波束-波数域各峰值位置与模态传播角、模态水平波数一一对应, 各峰值幅度正比于模态激励. 因此, 依据声场模型计算的前 M' ($M' \leq M$) 阶模态传播角 θ_m 和模态水平波数 k_{rm} , 在波束-波数二维平面内提取 $y(\theta_m, k_{rm}, z_s)$ ($m = 1, 2, \dots, M'$), 并与拷贝模态深度函数 $\phi_m^{\text{plc}}(z)$ 进行非相干匹配, 从而构建出深度模糊函数:

$$D(z) = \sum_{m=1}^{M'} |\phi_m^{\text{plc}}(z)| |y(\theta_m, k_{rm}, z_s)|, \quad (19)$$

式中, $D(z)$ 峰值所对应的深度即为声源深度估计结果. 将 (18) 式代入 (19) 式,

$$D(z) \approx \sum_{m=1}^{M'} \gamma_m |\phi_m^{\text{plc}}(z)| |\phi_m(z_s)|. \quad (20)$$

由 (20) 式知, 本文所提 IMBWP 方法变换到波束-波数域的目的是先提取与模态激励相关的峰值幅度, 再与拷贝模态深度函数进行非相干匹配, 从而实现声源深度估计. 波束-波数域中可分辨峰值数量由水平合成孔径长度和阵列垂直孔径共同决定, 将影响深度模糊函数的分辨率.

在现有的运动声源深度估计方法中, Yang 和 Xu^[16] 将波数谱峰幅度与模态深度函数进行匹配,

一维波数空间中可分辨的峰值数量取决于波数分辨率, 因而声源深度估计结果受限于水平合成孔径长度; IMBP 方法将距离平均的波束强度与拷贝量进行匹配, 只有在水平合成孔径长度大于模态干涉长度情形下才能忽略声源初始距离对声源深度估计结果的影响. 本文所提方法先进行垂直深度方向波束形成以实现模态初步分离, 再进行水平合成孔径波束形成以消除波束输出中与声源距离相关的相位项并新增一个可分离模态的波数空间维度, 最后将波束-波数域峰值幅度与模态深度函数进行匹配以估计声源深度.

在波束-波数域中, 由于可分辨的峰值数量取决于波束和波数分辨率的上限而未受限于水平合成孔径长度, 同时峰值幅度与声源初始距离无关, 由此可以看出本文所提方法的主要优势有: 1) IMBWP 在波束域和波数域变换均包含模态分离过程, 其模态分离程度更高, 对于较短的水平合成孔径长度, IMBWP 也能获得较准确的深度估计结果; 2) 在水平合成孔径波束形成过程中消除了与声源距离有关的相位项, 因此声源未知距离对该方法估计结果几乎不会产生影响. 另外, 通过限制角度扫描范围, 可将大掠射角到达且对环境参数敏感的高阶模态滤除, 从而提高方法的稳健性.

3 仿真实验与分析

本节首先给出水平分层浅海波导仿真环境及参数设置, 简要描述了水面和水下声源激发的各阶模态变化规律. 然后对本文所提 IMBWP 方法的深度估计效果进行仿真验证, 再讨论水平合成孔径长度和声源未知初始距离对方法性能的影响, 同时与 Zhang 等^[17]所提 IMBP 方法进行比较.

3.1 仿真环境

图 2 给出本文仿真的夏季典型浅海水平分层波导环境, 其声速剖面、环境参数和接收垂直阵列布放深度均与 SWellEx-96^[20] 测线 S5 实验配置一致. 垂直深度上, 0—216 m 为海水, 216—240 m 和 240—1040 m 为两层沉积层, 1040 m 以下为海底半空间. 接收垂直阵由 21 个阵元组成, 阵元间距约 5.6 m, 接收深度从 94 m 跨越至 212 m. 假定声源辐射 130 Hz 单频信号, 以 5 节速度从相距垂直阵 10 km 位置水平匀速运动至 11 km, 水平合成孔

径长度为 1 km, 使用 Kraken 程序^[21] 计算接收声场. 如无特殊说明, 下文中保持各项仿真参数不变.

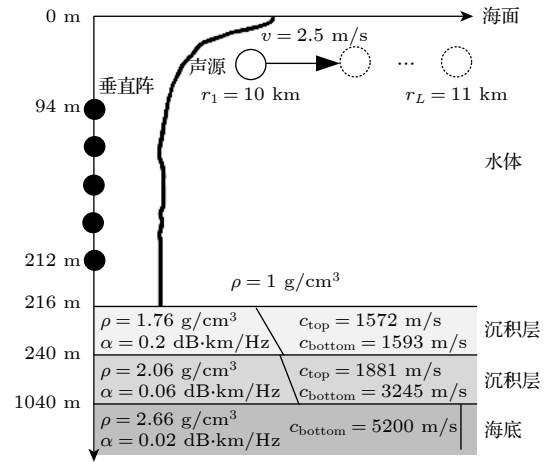


图 2 仿真环境

Fig. 2. Simulation environment.

在图 2 仿真环境中声源共激发 124 阶模态, 图 3(a)—(c) 分别给出前 50 阶模态激励、模态水平波数和模态传播角、模态深度函数的变化规律. 图 3(a) 上下两图分别对应 9 m 和 54 m 声源激发的各阶模态激励模值的变化, 已按照声源深度处各模态激励的最大模值归一化到 [0, 1] 区间. 图 3(a) 上图中 9 m 声源的前 4 阶模态激励很小, 模态激励模值随模态阶数单调递增, 直至第 13 阶模态达到最大. 而图 3(a) 下图中 54 m 深声源的各阶模态激励分布明显不同, 其最大模态激励位于第 4 阶模态. 本文所提 IMBWP 方法实质是利用不同声源深度对应的各阶模态激励分布不同, 通过匹配处理以估计声源深度.

图 3(b) 上下两图分别给出图 2 所示波导环境中模态水平波数和模态传播角的变化规律. 图 3(b) 上图中模态水平波数随模态阶数增加而减小, 且递减速度加快 (前 26 阶), 表明相邻模态水平波数之差随模态阶数增加而变大. 结合相邻模态干涉长度计算公式^[18] $L_m \simeq 2\pi / |k_{rm} - k_{r(m+1)}|$ 可知, 低阶相邻模态干涉长度大于高阶. 图 3(b) 下图中模态传播角随模态阶数增加而增大, 其最大值未超过 50°. 此外, 由图 3(c) 所示, 当模态阶数增加至第 26 阶时, 模态深度函数幅值出现“断崖式”下降, 在水体采样声场中, 高阶模态的贡献几乎可忽略. 因此, 下文统一设定波束-波数域峰值提取个数 $M' = 30$, 即只与前 30 阶拷贝模态深度函数进行非相干匹

配,用于声源深度估计,同时将垂直深度方向波束形成的扫描角度 θ 限制在 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 范围内,滤除与海底相互作用的高阶模态,从而使得深度估计方法更稳健.

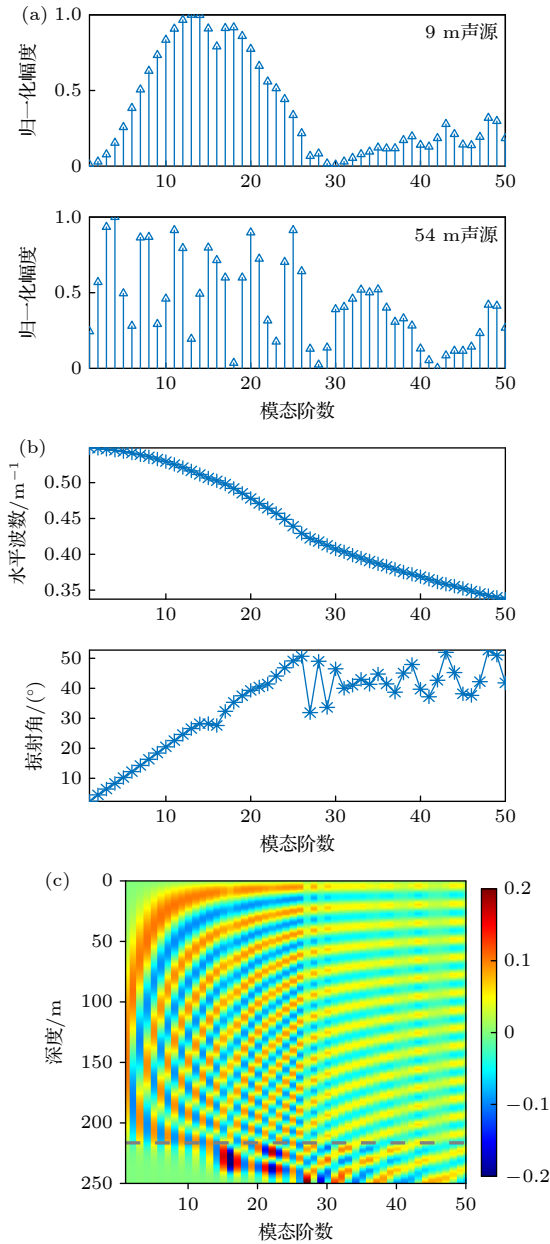


图3 前50阶模态的变化规律 (a) 9 m和54 m声源的模态激励; (b) 模态水平波数和模态传播角; (c) 模态深度函数幅值

Fig. 3. The change regulation of the first 50 propagating modes: (a) Mode excitations of 9 m and 54 m sources; (b) mode horizontal wavenumber and propagation angle; (c) the depth-dependent mode function.

3.2 不同声源深度的估计结果

图4(a)—(d)横排从左至右依次给出了声源深度分别为9, 54和70 m时的仿真结果,其中,图4(a)

是波束输出随距离的变化,图4(b)是波束-波数输出,图4(c)是归一化的波束幅度和波束-波数幅度对比,图4(d)是IMBWP和IMBP方法的归一化深度模糊函数对比.

对比图4(a)所示三图可以看出,在不同声源深度上,波束输出峰值所在扫描角度不同,其中,当声源深度为9 m时各距离上的波束输出峰值以“亮横条纹”形式出现在扫描角度 20° 附近,随着声源深度增大,波束峰值角度向 0° 移动,说明波束输出的分布受声源深度的影响. IMBP方法利用了各声源深度上的波束输出分布不同,将各距离处波束强度进行平均并与拷贝波束强度匹配以实现声源深度估计.

图4(b)所示三图中虚线由扫描波数与扫描角度的余弦关系 $k_r = k_0 \cos \theta$ 绘制,加号标记所在位置与前30阶模态水平波数和模态传播角对应. 可以看到,在波束-波数平面内,各个峰值以“亮点”形式沿实线分布且与加号标记重叠,说明每个峰值位置与模态传播角和模态水平波数对应. 对比图4(b)图可以看出,随着声源深度增大,最大峰值位置对应的扫描波数增大而扫描角度减小,这与图3(a), (b)中的模态特征规律一致,即较大声源深度激发的低阶模态占主导,其模态传播角较小,模态水平波数较大,而较小声源深度的情况则相反.

图4(c)所示三图中,实线是沿图4(b)中虚线提取的波束-波数幅度,虚线是距离平均的波束幅度,虚线和实线均已归一化处理以便比较,加号标记所在扫描角度对应前30阶模态传播角. 可以看出,在水平合成孔径长度和阵列垂直孔径相同的情形下,当声源深度分别为9, 54和70 m时,波束幅度曲线上与模态传播角对应的峰值数量依次为4, 6和3,波束-波数幅度曲线上与模态传播角对应的峰值数量依次为9, 9和7. 说明波束-波数域的可分辨峰值个数大于波束域,能够分离出的模态数量更多.

图4(d)所示三图中虚线和实线分别为IMBWP和IMBP方法的归一化深度模糊函数,点横线表示声源深度. 对比可知,IMBWP方法对三种声源深度分别给出了准确的估计结果,而IMBP方法只对9 m浅声源实现了准确的深度估计,54 m声源存在一定的深度估计误差,70 m声源的误差最大. 此外,IMBWP方法的深度分辨率也高于IMBP方法. 以70 m声源的情形为例进一步分析原因,

在深度模糊函数中占据主要贡献的是位于 $[0^\circ, 20^\circ]$ 角度区间内的低阶模态。从图 4(c) 右图可以看到, 多个低阶模态位于虚线所示波束幅度曲线的同一波峰内, 因此 IMBP 方法的估计结果存在较大误差。相比波束幅度曲线, 实线所示波束-波数幅度

线中各峰值位置分离程度更大, 可分辨峰值个数更多, 说明二维波束-波数空间可以弥补一维波束空间难以分离低阶模态的不足, 因此本文所提 IMBWP 方法的深度模糊函数实现了较高的声源深度估计准确度和分辨率。

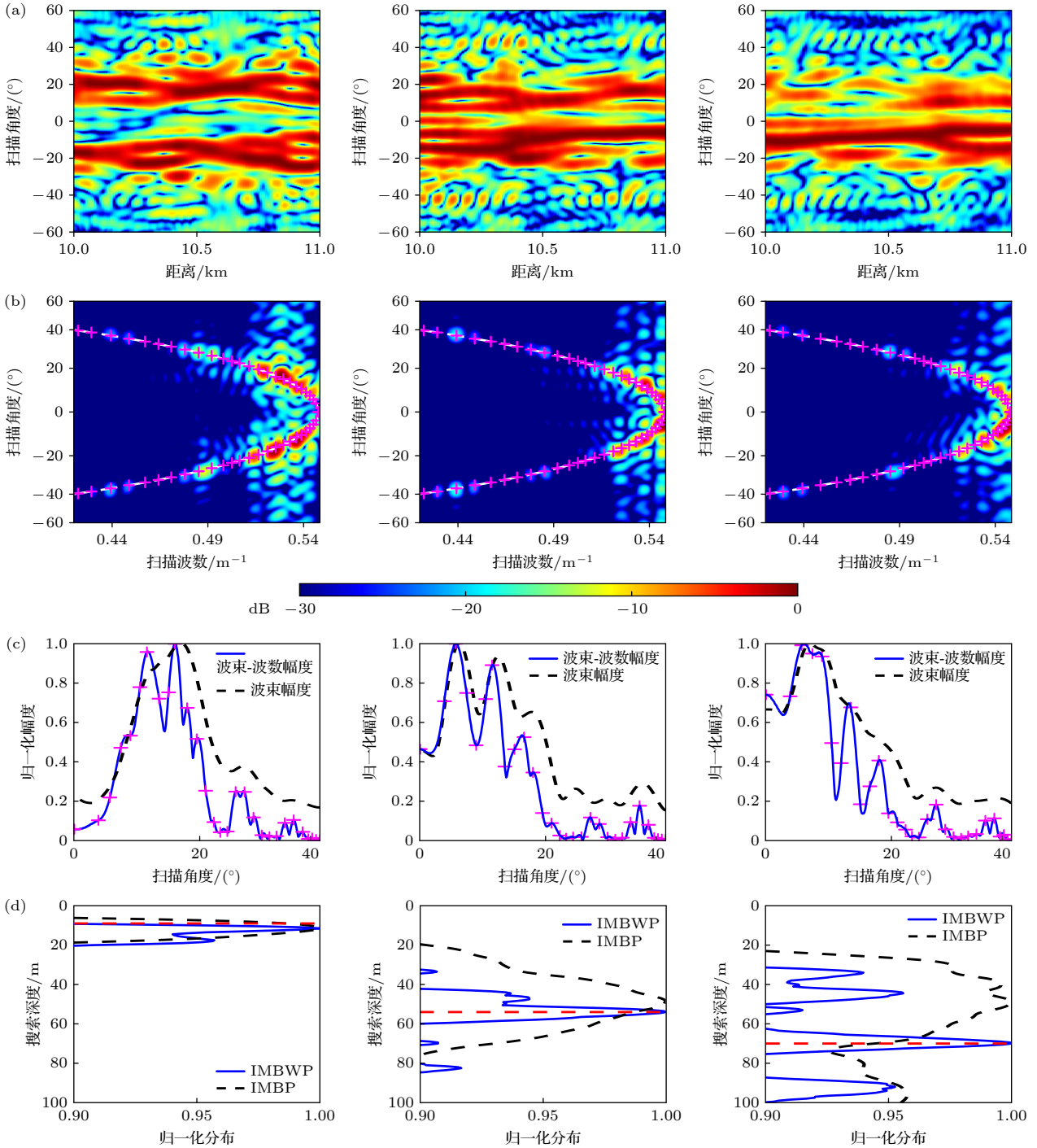


图 4 9, 54 和 70 m 声源深度下的仿真结果 (a) 10—11 km 的波束输出; (b) 波束-波数输出; (c) 归一化的波束幅度和波束-波数幅度对比; (d) IMBWP 和 IMBP 方法的归一化深度模糊函数对比

Fig. 4. Simulation results at 9, 54 and 70 m source depths: (a) Beam output from 10 km to 11 km; (b) beam-wavenumber output; (c) normalized beam amplitude and beam-to-wavenumber amplitude comparison; (d) normalized ambiguity functions comparison between IMBWP and IMBP methods.

3.3 水平合成孔径长度的影响

根据相邻模态干涉长度公式, 54 m 声源最大模态激励所在第 4 阶相邻模态干涉长度约为 3 km. 在小于模态干涉长度的 4 种水平合成孔径长度 Δr 情形下, 图 5(a)—(c) 给出了 IMBWP 方法对 54 m 声源的仿真结果, 其他仿真参数不变. 其中, 图 5(a), (b) 分别是 $\Delta r = 0.25, 2.50$ km 时的波束-波数输出, 虚线与加号标记所表示意义与图 4(b) 中相同; 图 5(c) 是 $\Delta r = 0.25, 1.00, 1.75, 2.50$ km 时的归一化深度模糊函数, 并且给出 4 种 Δr 情形下可分辨的波束-波数峰值数量 \widehat{M}' .

对比图 5(a), (b) 可知, 当水平合成孔径长度增大而垂直孔径不变时, 各峰值处波数宽度变窄, 波数分辨率提高, 波束宽度保持不变, 说明水平合成孔径长度只影响波数分辨率. 如图 5(a) 所示, 当 Δr 仅为 0.25 km 时, 波束-波数平面内各峰值仍能实现分离, 可以看出, 此时可分辨峰值个数受限于波束分辨率, 而不取决于波数分辨率. 也就是说, IMBWP 方法在波束-波数平面内可分辨峰值个数非仅限于水平合成孔径长度或垂直孔径, 而是取决于两者上限.

从图 5(c) 可知, 当水平合成孔径长度 $\Delta r = 0.25, 1.00, 1.75, 2.50$ km 时, 波束-波数平面内可分辨的峰值数量 \widehat{M}' 依次为 5, 10, 13 和 14, 说明可分辨的波束-波数峰值数量随水平合成孔径长度增大而增加. 当 Δr 仅为 0.25 km 时, $\widehat{M}' = 5$, 图 5(c) 中实线所示深度模糊函数在非声源深度上出现伪峰, 估计结果出现较大误差; 当 Δr 增至 1 km 时, $\widehat{M}' = 10$, 虚线所示深度模糊函数存在较高旁瓣但主瓣位

置对准了声源深度, 深度估计误差很小; 当 Δr 继续增至 1.75 和 2.5 km, \widehat{M}' 增至 13 和 14, 点线和点划线所示深度模糊函数的旁瓣降低, 实现了准确的声源深度估计. 对图 5(c) 中 $\Delta r = 0.25$ km 时 IMBWP 方法出现较大估计误差的原因进行分析, 对比图 5(a), (b) 可知, 图 5(a) 中各“亮点”在波束-波数域扩散, 造成相邻模态能量泄露严重, 导致波束-波数域幅度与拷贝模态深度函数的失配程度较大.

以声源深度估计结果的绝对误差为度量指标, 进一步分析水平合成孔径对 IMBWP 方法性能的影响. 将水平合成孔径长度从 0.1 km 以 0.1 km 的长度间隔线性递增至 5 km, 其他仿真参数不变, 图 6(a)—(c) 分别给出了 IMBWP 和 IMBP 方法对 9, 54 和 70 m 声源的深度估计绝对误差随水平合成孔径长度的变化, 分别由星号和圆圈标记折线表示. 此外, 将声源深度估计绝对误差限定在 5 m 以内, 图 6(d) 给出 IMBWP 方法估计 10—90 m 声源深度所需最小水平合成孔径长度.

由图 6(a)—(c) 可以看出: 1) 对于较浅声源, 如图 6(a) 所示, 当水平合成孔径长度变化时, 两种方法的深度估计绝对误差均在 5 m 以下, 误差波动程度小, 说明水平合成孔径长度对两方法的浅源深度估计误差影响较小; 2) 对于较深声源, 如图 6(b), (c) 所示, 两种方法均在水平合成孔径长度小于 0.5 km 时出现较大估计误差, 说明相比浅声源, 水平合成孔径长度对两方法的深声源深度估计结果影响更大; 3) 对比图 6(b), (c) 中 IMBWP 和 IMBP 方法的深度估计误差曲线, 在各个水平合成孔径长度上, IMBWP 方法估计结果的绝对误差均低于

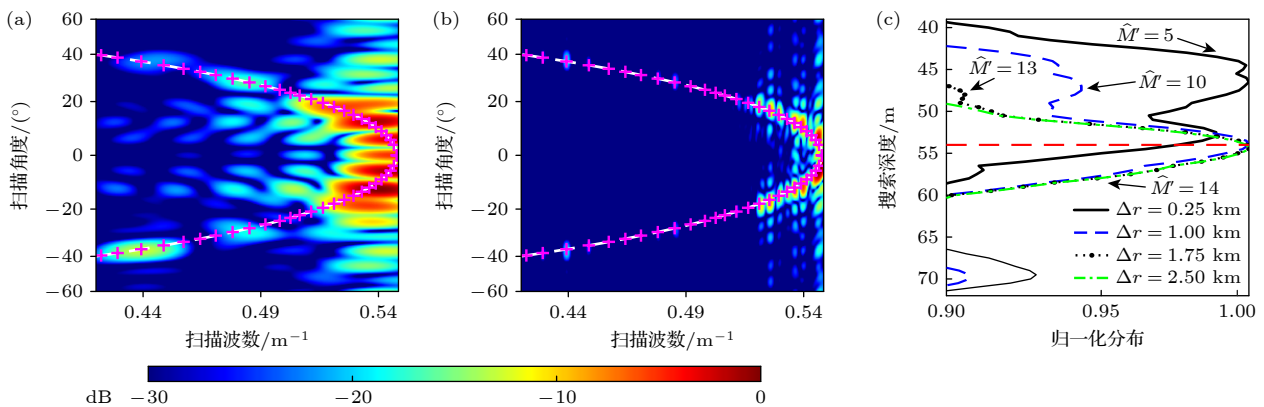


图 5 不同水平合成孔径长度下 IMBWP 方法对 54 m 声源的仿真结果对比 (a), (b) 0.25 km 和 2.5 km 水平合成孔径长度下的波束-波数输出; (c) 归一化深度模糊函数

Fig. 5. Comparison of simulated data by IMBWP method at different synthetic aperture lengths: (a), (b) Beam-wavenumber outputs at 0.25 km and 2.5 km synthetic aperture lengths, respectively; (c) normalized depth ambiguity function.

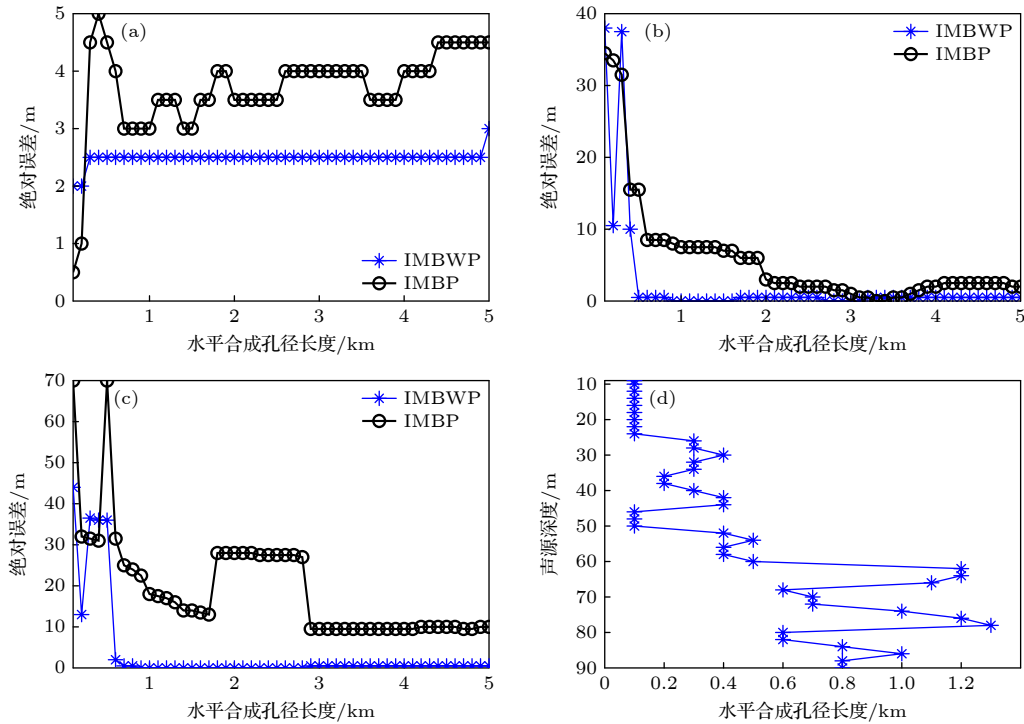


图 6 不同水平合成孔径长度下 IMBWP 和 IMBP 方法的深度估计绝对误差仿真结果对比 (a)—(c) 9, 54 和 70 m 声源; (d) IMBWP 估计 10—90 m 声源所需最小水平合成孔径长度

Fig. 6. Comparison of depth estimation absolute error for simulated data by IMBWP and IMBP methods at different synthetic aperture length: (a)—(c) 9, 54 and 70 m source; (d) IMBWP method estimates the minimum synthetic aperture length required for 10–90 m sources.

IMBP 方法. 同时, 随着水平合成孔径长度增大, IMBWP 方法的绝对误差下降速度大于 IMBP 方法, IMBWP 方法的绝对误差“下降拐点”分别出现在水平合成孔径长度约为 0.5 km (54 m 声源) 和 0.8 km (70 m 声源) 附近, 而 IMBP 方法位于合成孔径长度 2.0 和 2.8 km 处. 说明相比 IMBP 方法, 本文所提 IMBWP 方法受水平合成孔径长度的影响更小, 且较深声源的估计精度优势明显.

另外, 从图 6(d) 可以看出, 当声源深度小于 60 m 时, IMBWP 方法所需水平合成孔径长度小于 0.5 km. 随着声源深度增大, 本文所提方法对水平合成孔径长度要求变大, 最大约为 1.2 km. 根据相邻模态干涉长度公式, 54 m 声源最大模态激励所在第四阶相邻模态干涉长度约为 3 km, 而水面声源最大激励所在更高阶相邻模态干涉长度约为 1.2 km. 对比可知, 在 3.1 节给出的波导环境和仿真参数中, 本文所提方法估计 10—90 m 声源深度所需的最小水平合成孔径长度均小于相邻模态干涉长度. 此外在本文所提方法中, 深声源相比浅声源所需的水平合成孔径长度更长的原因是, 低阶模

态主导深声源激发声场并在深度模糊函数中占主要贡献, 低阶相邻模态干涉长度相比高阶模态更长, 分离低阶模态需要更大的水平合成孔径长度.

3.4 声源未知初始距离的影响

将声源初始距离从 1 km 以 0.5 km 的长度间隔线性递增至 15 km, 水平合成孔径长度为 1 km 且其他仿真参数不变, 图 7(a)—(c) 分别给出了 IMBWP 和 IMBP 方法对 9, 54 和 70 m 声源的深度估计绝对误差随声源初始距离的变化, 分别由星号和圆圈标记折线表示. 此外, 在 1—15 km 距离范围内, 随机选取 500 个样本作为声源初始距离, 图 7(d) 给出了在 10—90 m 声源深度上两种方法的深度估计绝对误差均值和标准差的变化, 其中星号和圆圈标记折线分别表示 IMBWP 和 IMBP 方法深度估计绝对误差的均值, 蓝色和绿色半透明区间分别表示 IMBWP 和 IMBP 方法深度估计绝对误差的标准差.

由图 7(a)—(c) 可以看出: 1) 对于较浅声源, 如图 7(a) 所示, 在不同初始距离上, 两种方法估计结

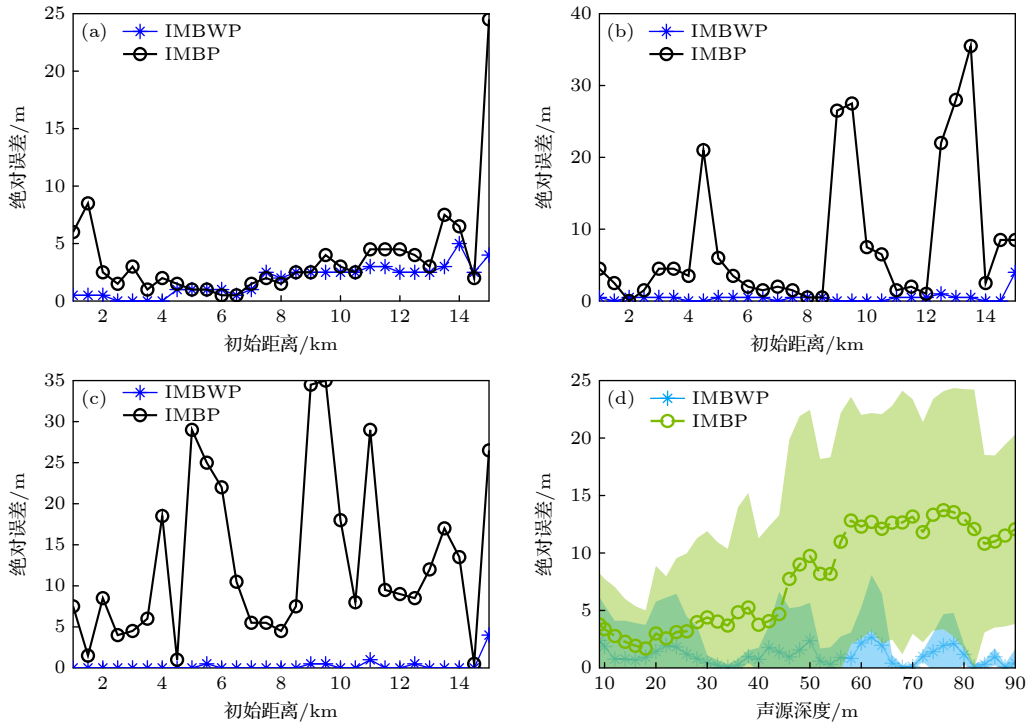


图 7 不同初始距离下 IMBWP 和 IMBP 方法的深度估计绝对误差仿真结果对比 (a)—(c) 9, 54 和 70 m 声源; (d) 10—90 m 声源在 500 个随机初始距离处的深度估计绝对误差均值和标准差

Fig. 7. Comparison of depth estimation absolute error for simulated data by IMBWP and IMBP methods at different initial ranges: (a)–(c) 9, 54 and 70 m source; (d) mean and standard deviation of depth estimation absolute errors for 10–90 m sources at 500 random initial ranges.

果绝对误差基本稳定在 5 m 以下, 说明初始距离对浅源深度估计误差影响均较小; 2) 对于较深声源, 如图 7(b), (c) 所示, 在 1—15 km 初始距离范围内, 本文所提 IMBWP 方法深度估计绝对误差均小于 5 m 且非常稳定, 而 IMBP 方法的深度估计绝对误差远大于 IMBWP 方法, 且在某些初始距离上出现极大绝对误差, IMBP 方法稳健性较差. 由图 7(d) 可以看出, IMBWP 方法对所有声源深度估计的绝对误差均值在 5 m 以下, 而 IMBP 方法的深度估计绝对误差均值随声源深度增大且高于 IMBWP 方法, 并且 IMBP 方法稳健性远低于 IMBWP. 由图 7(a)—(d) 分析结果看出, 当水平合成孔径长度为 1 km (小于模态干涉长度) 时, 声源未知初始距离对 IMBWP 方法几乎没有影响.

4 SWellEx-96 实验数据分析

本节通过 SWellEx-96 实验^[20]对 IMBWP 方法的优越性进行验证, 如图 8(a) 所示, 实验测线 S5 中发射船沿着蓝色轨迹拖曳一个深度约 9 m 的浅源和一个深度约 54 m 的深源以大约 5 节的速度

向垂直阵方向行进. 图 8(b) 显示了声源距离随时间的变化, 声源与垂直阵的最近距离点大约在第 60 min 出现, 在前 60 min 内, 声源从与垂直阵相距 8.6 km 处移动到 1.0 km 位置, 垂直阵记录了时长 75 min 的完整数据.

本文分析了测线 S5 的前 60 min 数据, 选取了两个频点, 分别是浅源发出的 127 Hz 信号和深源发出的 130 Hz 信号. 将前 60 min 数据按照 10 s 时间长度划分, 重叠时间 4 s, 经过傅里叶变换和时域加窗, 得到 3541 个频域声压快拍. 起始时间声源所在位置作为固定初始距离, 将水平合成孔径长度从 0.1 km 以 0.1 km 的长度间隔线性递增至 7.6 km, 图 9 给出不同水平合成孔径长度下 IMBWP 和 IMBP 方法对 9 m (127 Hz) 浅声源实验数据的深度估计绝对误差结果, 由星号和圆圈标记折线分别表示, 可以看到, 两方法的深度估计误差均在 5 m 以下.

图 10 是不同水平合成孔径长度下 IMBWP 和 IMBP 方法对 54 m (130 Hz) 深声源实验数据的深度估计结果, 由星号和圆圈标记折线分别表示. 需注意的是, 深声源运动过程中发出的 130 Hz 信号被中断多次, 如图 8(b) 所示, 将未发声时间段的数

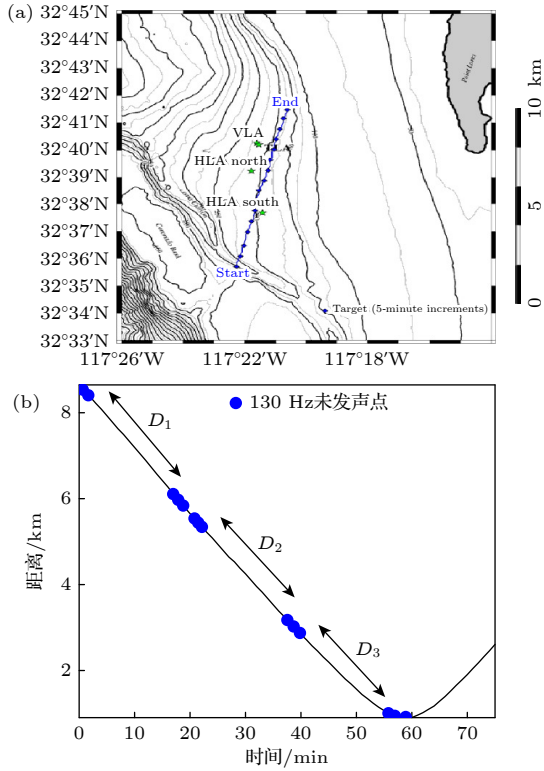


图 8 SWellEx-96 测线 S5 实验声源船轨迹 (a) 发射船轨迹和垂直阵位置; (b) 声源距离随时间变化
 Fig. 8. The SWellEx-96 Event S5 launch ship track: (a) The path of a ship towed two sources and the vertical line array location; (b) source range varies with time.

据剔除, 发声时间段的数据间隔成 D_1 , D_2 和 D_3 段进行处理, 3 段数据对应的距离和时间如表 1 所示.

图 10(a)–(c) 分别给出 D_1 , D_2 和 D_3 数据段中 IMBWP 方法和 IMBP 方法深度估计结果随水平合成孔径长度的变化, 点横线表示声源深度, 将水平合成孔径长度从 0.1 km 以 0.1 km 的长度间隔线性递增至各数据段最大距离跨度, D_1 – D_3 数据段深度估计平均绝对误差随水平合成孔径长度的变化趋势如图 10(d) 所示. 当水平合成孔径长度大

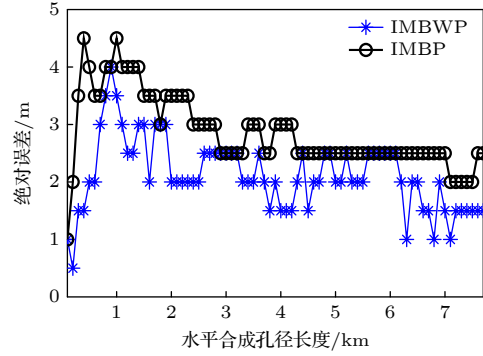


图 9 不同水平合成孔径长度下, IMBWP 和 IMBP 方法对 9 m 浅源的深度估计绝对误差
 Fig. 9. Depth estimation absolute error of experimental data for the 9 m source by IMBWP and IMBP methods at different synthetic aperture length.

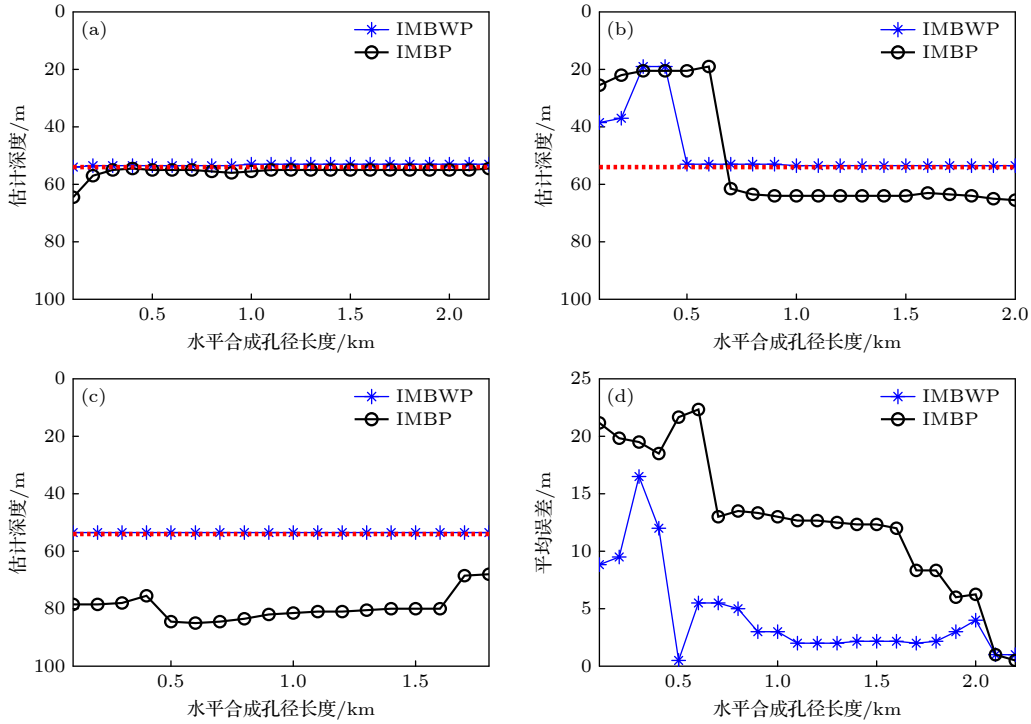


图 10 不同水平合成孔径长度下 IMBWP 和 IMBP 方法对 54 m 声源实验数据的深度估计结果 (a)–(c) D_1 , D_2 和 D_3 数据段; (d) D_1 – D_3 数据段深度估计的平均绝对误差
 Fig. 10. Depth estimation of experimental data for the 54 m source by IMBWP and IMBP methods at different synthetic aperture length: (a)–(c) D_1 , D_2 and D_3 data segment; (d) depth estimation average absolute errors of D_1 – D_3 data segments.

于 0.5 km 时, IMBWP 方法深度估计平均绝对误差值保持在 5 m 以下, 而 IMBP 方法在水平合成孔径长度大于 2 km 情形中才能实现类似的深度估计精度. 由图 10(a)—(d) 说明, 在较短的水平合成孔径长度下, 相比 IMBP, IMBWP 方法对 54 m 深声源可获得更好的声源深度估计性能.

表 1 D_1 — D_3 数据段对应时间和距离
Table 1. The time and range of D_1 — D_3 data segments.

数据段	时间/min	距离/km
D_1	1.7—18.2	8.4—6.2
D_2	22.4—36.4	5.3—3.3
D_3	39.7—57.4	3.2—1.5

水平合成孔径长度固定为 0.5 km(对应 50 个连续的频域快拍数据), 将声源初始距离从起始时间位置 8.6 km 以 0.1 km 的长度间隔递减至约 1.5 km, 图 11(a), (b) 给出不同初始距离下 9 m 和 54 m 声源实验数据的深度估计结果. 其中, 图 11(a) 左右分别是 IMBWP 和 IMBP 方法对两种声源的深度估计绝对误差, 分别由星号和圆圈标记折线表示. 由图 11 可以看出, 当水平合成孔径长度远小于模

态干涉长度时, IMBWP 方法的深度估计结果更准确, 对声源未知初始距离的敏感度更低, 特别是 54 m 深声源. 图 11(b) 左右两图给出了 IMBWP 方法对两种声源的深度模糊函数随初始距离的变化, 可以看到, 9 m 浅源伪彩图(左图)中的旁瓣极低, 54 m 深源伪彩图(右图)中, 在声源深度位置附近有旁瓣出现, 但未影响最终的声源深度估计结果. 旁瓣出现原因和声源初始距离无关, 是水平合成孔径长度设置为 0.5 km, 深度模糊函数分辨率较小所致.

5 结 论

声源初始距离未知和水平合成孔径长度有限等因素制约了现有运动声源深度估计方法的性能, 针对此问题, 本文提出了基于波束-波数域非相干匹配的运动声源深度估计方法 (IMBWP). 该方法首先对接收信号进行垂直深度方向波束形成, 波束输出峰值与模态幅度对应, 实现模态初步分离; 然后将各接收距离处波束输出进行水平合成孔径波束形成, 波束-波数峰值幅度仅包含与声源深度有

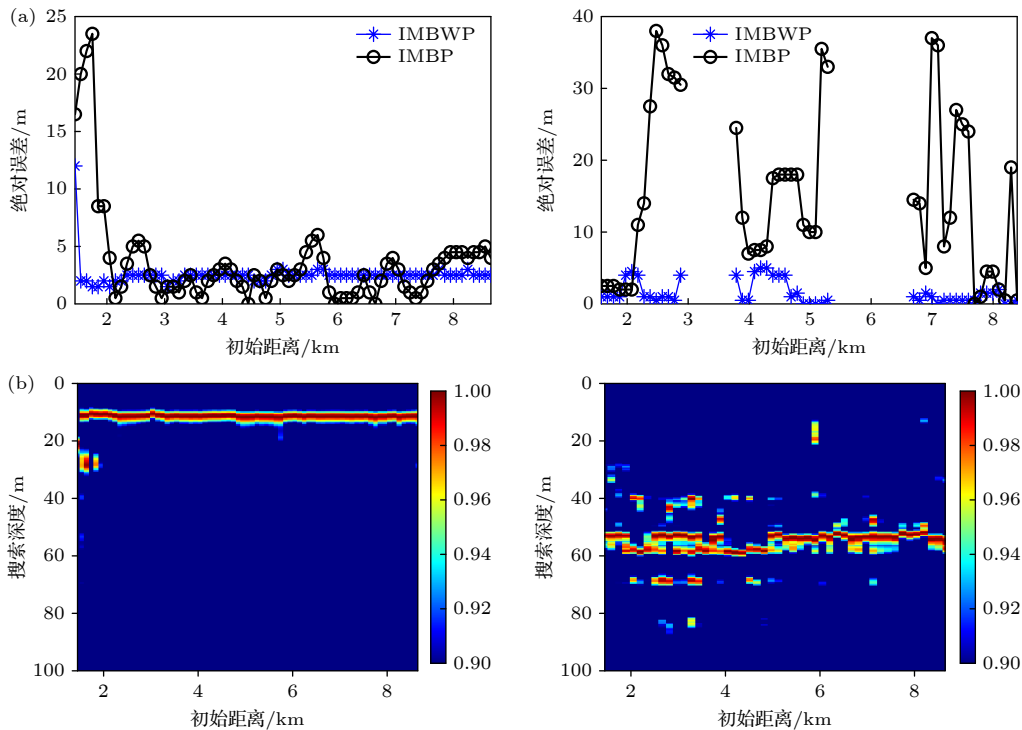


图 11 不同初始距离下 9 m 和 54 m 声源实验数据的深度估计结果 (a) IMBWP 和 IMBP 方法的深度估计绝对误差对比; (b) IMBWP 方法的归一化深度模糊函数伪彩图

Fig. 11. Depth estimation of experimental data for 9 m and 54 m sources at different initial ranges: (a) Comparison of depth estimation absolute errors between IMBWP and IMBP method; (b) normalized depth ambiguity surface of IMBWP method.

关的模式激励, 消除了与声源未知距离有关项, 实现模式再次分离; 最后将波束-波数峰值幅度与拷贝模式深度函数进行非相干匹配, 可在声源距离未知且水平合成孔径长度小于模式干涉长度情况下实现准确的声源深度估计.

仿真和 SWellEx-96 实验数据处理结果表明:

- 1) 相比现有方法, IMBWP 变换到波束-波数二维平面, 其模式分离程度更高, 降低了水平合成孔径长度的要求, 且水下深声源的深度估计优势突出;
- 2) IMBWP 方法通过水平合成孔径波束形成, 消除了波束输出中与声源未知距离有关的相位项, 因此, 声源未知初始距离对该方法估计结果的影响很小.

参考文献

- [1] Premus V E 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **104** 1837
- [2] Premus V E, Helfrick M N 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 4019
- [3] Conan E, Bonnel J, Chaonavel T 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **140** 434
- [4] Conan E, Bonnel J, Nicolas B 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **142** 2776
- [5] Cao H G, Zhao Z D, Ma L 2020 *Acta. Acustica.* **6** 802 (in Chinese) [曹怀刚, 赵振东, 郭圣明, 马力 2020 声学学报 **6** 802]
- [6] Liu Z T, Guo L H, Yan C 2019 *Acta. Acustica.* **44** 28 (in Chinese) [刘志韬, 郭良浩, 闫超 2019 声学学报 **44** 28]
- [7] Bucker H P 1976 *J. Acoust. Soc. Am.* **59** 368
- [8] Yang T C 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **87** 2072
- [9] Shang E C 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **77** 1413
- [10] Yang T C 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 1736
- [11] Yang T C, Bogart C W 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **96** 1677
- [12] Lopatka M, Touzé G L, Nicolas B, Cristol L 2006 *Eurasip J. Adv. Sig. Pr.* 65901
- [13] Li K, Fang S L, An L 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 094303 (in Chinese) [李焜, 方世良, 安良 2013 物理学报 **62** 094303]
- [14] Reeder B D 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **136** 2120
- [15] Yang T C 2015 *J. Acoust. Soc. Am.* **137** 2986
- [16] Yang T C, Xu W 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **140** EL302
- [17] Zhang J G, Yang T C, Zheng G Y 2021 *J. Acoust. Soc. Am.* **1** EL 026002
- [18] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (New York: Springer) pp629–630, 355, 359
- [19] Katsnelson B, Petnikov V, Lynch J 2012 *Fundamentals of Shallow Water Acoustics* (Boston: Springer) p86
- [20] Murray J, Ensberg D *The SWellEx-96 Experiment* <http://swellex96.ucsd.edu/> (Last viewed December 2022)
- [21] Porter M B 1992 *The KRAKEN Normal Mode Program* (Washington DC: Naval Research Laboratory)

A method of estimating depth of moving sound source in shallow sea based on incoherently matched beam-wavenumber*

Zhou Yu-Yuan¹⁾²⁾³⁾ Sun Chao^{1)2)3)†} Xie Lei¹⁾²⁾³⁾ Liu Zong-Wei⁴⁾

1) (*School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

2) (*Key Laboratory of Ocean Acoustic and Sensing, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

3) (*Qingdao Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Qingdao 266200, China*)

4) (*First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China*)

(Received 12 December 2022; revised manuscript received 17 February 2023)

Abstract

Estimating the depth of a moving source with unknown source range is always a challenging problem in shallow water waveguides. The method of estimating the current motion source depth is sensitive to the unknown initial range and requires the horizontal synthetic aperture length formed by the motion of the source to be much longer than the modal interference period. Presented in this work is a method to estimate the depth of moving source based on the incoherently matched beam-wavenumber. In the beam-wavenumber domain, each peak amplitude only contains the modal excitation related to source depth, and each peak position corresponds to the mode propagation angle and the horizontal wavenumber. In this method, the received data are first used to perform beam-formed transformation in the vertical depth and horizontal synthetic aperture direction, and transformed into the beam-wavenumber domain. Then beam-wavenumber peak amplitudes are extracted and incoherently matched with the modal depth function to estimate the source depth. The proposed method is used to eliminate the unknown distance dependent term and improves the mode resolution by performing mode separation in the beam-wavenumber two-dimensional domain. The prominent feature of this method lies in realizing the source depth estimation at the unknown initial range and the horizontal synthetic aperture length which is smaller than the mode interference period. The simulation and SWellEx-96 experimental data processing results validate the superior performance of the proposed method.

Keywords: shallow water waveguide, moving source, depth estimation, beam-wavenumber domain

PACS: 43.60.Jn, 43.60.-c, 43.30.Bp

DOI: 10.7498/aps.72.20222361

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11904342, 12274348, 11534009).

† Corresponding author. E-mail: csun@nwpu.edu.cn

基于波束-波数域非相干匹配的浅海运动声源深度估计方法

周玉媛 孙超 谢磊 刘宗伟

A method of estimating depth of moving sound source in shallow sea based on incoherently matched beam-wavenumber

Zhou Yu-Yuan Sun Chao Xie Lei Liu Zong-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 084302 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222361

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222361>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅海波导中低频声场干涉简正模态的判别

Identification of interference normal mode pairs of low frequency sound in shallow water

物理学报. 2019, 68(13): 134304 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190221>

浅海波导环境不确定性对声源功率估计的影响

Influence of environmental uncertainty on source power estimation in shallow water waveguide

物理学报. 2021, 70(24): 244301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210852>

不确定浅海环境中水平阵角度域子空间检测

Detection by angle-domain subspace with horizontal array in uncertain shallow-water environment

物理学报. 2022, 71(8): 084304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211742>

浅海负跃层中利用互相关输出峰值迁移曲线的声源深度判别

Source depth discrimination using peak migration line of cross-correlation output in shallow water having negative thermocline

物理学报. 2022, 71(13): 134302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211987>

三维浅海下弹性结构声辐射预报的有限元-抛物方程法

Acoustic radiation from a cylinder in shallow water by finite element-parabolic equation method

物理学报. 2019, 68(2): 024301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181452>

利用海底弹射区角度-距离干涉结构特征实现声源深度估计

Source depth estimation using angle-range interference pattern in deep ocean bottom bounce area

物理学报. 2022, 71(18): 184301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220746>