

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*

朱启轩¹⁾²⁾ 孙超^{1)2)†} 刘雄厚¹⁾²⁾

1) (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2) (陕西省水下信息技术重点实验室, 西安 710072)

(2022 年 4 月 19 日收到; 2022 年 5 月 15 日收到修改稿)

被动声呐探测位于深海海底弹射区的声源时空采样能力有限, 且声呐接收信噪比较低, 导致声源深度估计方法性能较差. 针对这一问题, 本文基于射线模型推导了干涉结构峰值条纹关于声源位置的理论表达式, 提出一种基于角度-距离干涉结构峰值特性的声源深度估计方法, 该方法包括利用峰值条纹起伏特性估计声源深度和干涉结构重构两个部分. 在低信噪比条件下, 被噪声淹没的峰值条纹会重现于重构后的干涉结构, 使得声源深度估计方法可以适用于海底弹射区的低信噪比环境. 该方法同时结合阵列空时累积增益和干涉结构的图像低秩特性. 通过典型深海波导蒙特卡罗仿真实验验证, 该方法可在低信噪比条件下对海底弹射区声源的深度进行较为准确的估计.

关键词: 海底弹射区, 角度-距离干涉结构, 声源深度估计, 低信噪比

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.71.20220746

1 引言

在深海环境中, 基阵接收数据和环境参数由于波导垂直尺度较大等原因难以实现完备的采样, 使用匹配场类方法^[1-4]和深度学习类方法^[5-8]被动估计水下声源深度时, 其性能将大幅度降低甚至失效. 为了解决上述问题, 相关学者研究了基于干涉条纹的被动测深方法. Duan 等^[9,10]结合 Wenzel-Kramers-Brillouin 理论对频率-距离干涉条纹峰值谷值位置进行预测, 并通过条纹匹配的方法估计目标深度. MaCargar 和 Zurk^[11]结合虚源理论分析了直达区峰值波束输出功率随声线到达角的变化规律, 基于此提出声源深度估计方法. Zheng 等^[12]分析了目标位于直达区时垂直阵波束输出功率随距离变化的特性, 提出一种匹配峰值功率的目标深

度估计方法. Lei 等^[13]利用声传播的多途特性, 提出了一种利用双水听器互相关函数对直达区目标进行匹配定位的方法. 这类方法主要利用了深海直达区声场的劳埃德镜干涉效应.

然而, 海底弹射区^[14,15]存在包含两类到达角的四类特征声线^[16], 四类声线间的相互干涉导致声传播特性更为复杂, 上述直达区测深方法不再适用. Weng 等^[17]分析了声源位置对海底弹射区频率-距离干涉结构起伏频率的影响, 以此给出利用单水听器进行声源定位的方法. 然而, 频率-距离结构的干涉周期由声源距离和深度耦合决定, 且提取对声源深度敏感的干涉周期要求声源具有较大的带宽, 因此该方法难以准确估计声源深度. 此外, 在实际中, 由于海底声压反射损失较大, 当目标位于海底弹射区时声波与海底的作用会导致声呐接收信噪比较低, 频率-距离干涉条纹被噪声淹没,

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 11534009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: csun@nwpu.edu.cn

基于此的测深方法性能下降甚至失效.

为了解决上述问题, 需要将干涉条纹扩展至角度域, 以解耦距离对干涉周期的影响, 并结合阵处理手段提高输出信噪比. 由于当前对海底弹射区角度-距离干涉结构的相关研究较少, 本文首先通过射线模型对海底弹射区角度-距离干涉结构进行建模, 推导出角度-距离干涉结构峰值条纹的理论表达式, 基于此提出一种基于角度-距离干涉结构峰值条纹起伏特性的目标深度估计方法, 该方法包括对干涉结构的重构和目标深度的提取. 相比基于频率-距离干涉条纹的测深方法, 角度-距离干涉结构仅利用单频信息, 且峰值条纹的起伏周期与声源深度是一一对应的; 同时, 该方法结合了条纹内含的空时累积增益和低秩特性, 以便能够适用于海底弹射区中的低信噪比条件. 经蒙特卡罗仿真实验验证, 该方法可有效估计海底弹射区声源的深度, 且在低信噪比条件下, 经过重构处理后深度估计结果准确率始终高于未经重构的估计结果.

本文结构如下: 第 2 节对角度-距离干涉结构进行建模, 并对于干涉结构峰值条纹的起伏特性进行分析; 第 3 节给出一种水下声源深度的估计方法; 第 4 节对深度估计方法进行仿真分析.

2 角度-距离干涉结构建模

考虑深海海底弹射模式, 声速剖面为 Munk 曲线, 声源和垂直阵均位于近海面处, 如图 1(a) 所示. 根据射线声学理论, 此时接收声场能量主要由海底反射声贡献 [18]. 由于海底声压反射损失较大, 二次及以上海底反射声对声场的贡献可以忽略不计, 通常仅考虑与海底作用一次的声线. 典型海底弹射模式下一次海底反射声存在四种传播路径 [17], 分别是海底反射路径 (BR)、海面海底反射路径 (SBR)、海底海面反射路径 (BSR) 和海面海底海面反射路径 (SBSR). 由射线声学理论, 水下点声源激发声场在距离为 r 、接收深度为 z 处的声压可表示为

$$p(r, z; f) = \frac{S(f)\sqrt{W}}{4\pi} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\sqrt{F_i}}{R_i} V_b^i (V_s^i)^l e^{i2\pi f t_i} \right) \approx A(r, z; f) \cdot \sum_{i=1}^4 (V_s^i)^l e^{i2\pi f t_i}, \quad (1)$$

其中, f 表示声源频率, W 表示单位立体角内的目标辐射声功率, $S(f)$ 表示声源频谱; 记 $i = 1, 2, 3, 4$

依次代表 BR, SBR, BSR 和 SBSR 的参数, V_b^i 和 V_s^i 分别表示第 i 条声线海底和海面的声压反射系数, R_i 和 F_i 分别表示第 i 条声线的斜距和聚焦因子, t_i 表示第 i 条声线的时延. 取海面反射系数模值为 1, 相移为 π , i 表示声线与海面作用的次数. 由于声线在大掠射角下可以近似为直线传播 [11], 几条特征声线的聚焦因子和斜距基本一致. 四条声线的海底反射损失基本一致 [17]. $A(r, z; f)$ 为声线幅值:

$$A(r, z; f) = \left(\frac{S(f)\sqrt{W}}{4\pi} \frac{\sqrt{F_1}}{R_1} V_b^1 \right). \quad (2)$$

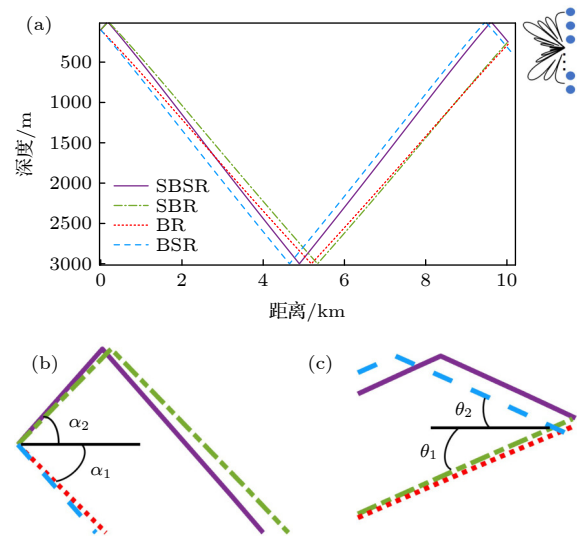


图 1 海底弹射区特征声线示意图 (a) 声线轨迹; (b) 声源处局部放大; (c) 接收处局部放大

Fig. 1. Eigenray in bottom bounce area: (a) Eigenray path; (b) amplification at sound source position; (c) amplification at receiving position.

海底弹射区中, BR 和 BSR 的出射角基本相同, 记为第一类出射角 α_1 ; SBR 和 SBSR 的出射角基本相同, 记为第二类出射角 α_2 , 如图 1(b) 所示. 将 (1) 式改写为

$$p(r, z; f) = A(r, z; f) [e^{i2\pi f t_1} (1 - e^{i2\pi f \Delta t_1}) + e^{i2\pi f t_4} (1 - e^{i2\pi f \Delta t_2})], \quad (3)$$

其中 $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ 代表 BR 和 SBR 的时延差, $\Delta t_2 = t_3 - t_4$ 表示 BSR 和 SBSR 的时延差. 根据射线理论, 声线的时延可表示为

$$\cos \alpha \cdot r + \int_{z_s}^z \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha} dz,$$

其中 $n(z) \equiv c_0/c(z)$, z_s 为声源深度, c_0 为声源位置

处声速. 由于 BR 和 SBR 在距离维的声程相同, 二者时延差主要由 SBR 出射时经海面反射的深度维声程决定, 因此有

$$\Delta t_1 \approx 2 \int_0^{z_s} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_1} dz / c_0 \approx 2z_s \sin \alpha_1 / c_0, \quad (4)$$

同理有 BSR 和 SBSR 的时延差:

$$\begin{aligned} \Delta t_2 &\approx -2 \int_0^{z_s} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_2} dz / c_0 \\ &\approx -2z_s \sin \alpha_2 / c_0. \end{aligned} \quad (5)$$

由于声线在大掠射角下可以近似为直线传播, 因此可对垂直阵接收信号做远场平面波假设, 阵元间声线时延差由该声线到达角决定. 从图 1(c) 可以看出: BR 和 SBR 的到达角基本相同, 记为第一类到达角 θ_1 ; BSR 和 SBSR 的到达角基本相同, 记为第二类到达角 θ_2 . 记 z_j 为第 j 个阵元的深度, 记最靠近海底的阵元为第一个阵元, 根据 (3) 式, 第 j 个阵元接收信号可表示为

$$\begin{aligned} p(r, z_j; f) &= A(r, z; f) \left\{ e^{i2\pi f[t_{z1} - (j-1) \cdot \tau_1]} \left(1 - e^{i2\pi f \cdot 2z_s \frac{\sin \alpha_1}{c_0}} \right) \right. \\ &\quad \left. + e^{i2\pi f[t_{z4} - (j-1) \cdot \tau_2]} \left(1 - e^{-i2\pi f \cdot 2z_s \frac{\sin \alpha_2}{c_0}} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, t_{z1} 表示最靠近海底的阵元对应 BR 的时延, $\tau_1 = d \sin \theta_1$; t_{z4} 表示最靠近海底的阵元对应 SBSR 的时延, $\tau_2 = -d \sin \theta_2$.

从 (6) 式可以看出, 垂直阵接收信号可视为两类到达角对应声线组相干叠加的结果, 每组声线由两条声线组成, 每组声线对声场的贡献本质与劳埃德镜干涉结果相同^[12]. 由于两类到达角相差较大, 如对垂直阵接收信号进行常规波束形成, 空间谱将存在两个峰值, 根据 (6) 式, 这两个峰值对应两类到达角. 当主瓣方向对准某一类到达角进行波束形成时, 可忽略另一类到达角对应声线组的贡献. 当波束主瓣方向为 θ_1 时, 波束输出功率为

$$\begin{aligned} B(\sin \theta_1; z_s) &\approx 2 (mA(r, z; f))^2 \left[1 - \cos \left(2\pi f \cdot 2z_s \frac{\sin \alpha_1}{c_0} \right) \right] \\ &= 2 (mA(r, z; f))^2 [1 - \cos (2k \sin \alpha_1 \cdot z_s)], \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $k = 2\pi f / c_0$, m 为阵元数. 由于声源和垂直阵均位于近海面处, 根据 Snell 定律, 声线出射角与入射角绝对值基本相同, (7) 式中 α_1 可替换为 θ_1 .

由于深海大掠射角声线到达角基本不随声源深度变化^[10], 因此 (7) 式可以改写为

$$\begin{aligned} B_1(\sin \theta_1(r); z_s) &= 2 (mA(r, z; f))^2 [1 - \cos (2k \sin \theta_1(r) \cdot z_s)], \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\sin \theta_1(r)$ 表示 θ_1 为距离 r 的函数. 同理, 波束主瓣方向为 θ_2 时, 波束输出功率为

$$\begin{aligned} B_2(\sin \theta_2(r); z_s) &= 2 (mA(r, z; f))^2 [1 - \cos (2k \sin \theta_2(r) \cdot z_s)]. \end{aligned} \quad (9)$$

根据上文, 两类到达角对应空间谱的两个峰值功率, 考虑声源沿水平方向运动, 根据 (8) 式和 (9) 式, 两类峰值波束输出功率将随距离 (到达角) 的变化呈周期性变化. 为了直观体现这一变化规律, 考虑构造随距离变化的二维空间谱图: 对每一个距离处的阵列接收信号进行处理, 得到不同距离对应的空间谱, 将空间谱沿距离方向进行拼接, 可以得到空间谱随距离变化的二维伪彩图, 本文将此类伪彩图称为海底弹射区角度-距离干涉结构, 下文简称干涉结构, 如图 2 所示, 具体仿真参数见第 4 节. 从图 2 可明显看出两类峰值功率随距离变化的条纹, 记第一类到达角对应峰值条纹为条纹 1, 如图中 Track-1 所示; 第二类到达角对应峰值条纹为条纹 2, 如图中 Track-2 所示. 利用声场计算软件 Bellhop 计算得到两类到达角随距离的变化曲线如图 2 中白线所示, 可以看出两条曲线贯穿了峰值条纹中心. 根据 (8) 式和 (9) 式, 条纹起伏的快慢与声源深度有关, 第 3 节将给出基于此的深度估计方法.

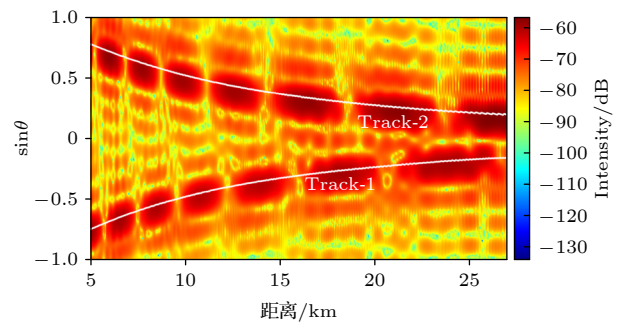


图 2 角度-距离干涉结构
Fig. 2. Angle-range interference pattern.

3 声源深度估计方法

3.1 利用峰值条纹起伏估计声源深度

(8) 式和 (9) 式分别给出了两个峰值条纹强度

随距离变化的表达式, 由于 $A(r, z; f)$ 为距离 r 的慢变量, 条纹随距离的起伏特性将由载波分量 $\cos(2k \sin \theta_i(r) \cdot z_s)$ 决定, 记为 $s(\sin \theta_i(r); z_s)$:

$$s(\sin \theta_i(r); z_s) = \cos(2k \sin \theta_i(r) \cdot z_s), \quad (10)$$

其中 $i = 1, 2$. 峰值条纹强度的变化由 $s(\sin \theta_1(r); z_s)$ 决定, 其可以视为以 $k \sin \theta_i(r)$ 为自变量, z_s/π 为频率的余弦函数, z_s/π 反映了峰值条纹强度随距离的起伏快慢, 称为起伏频率. 可以看出起伏频率包含声源深度信息. 对峰值条纹强度进行空域傅里叶变换, 可获得条纹的起伏频率 z_s/π , 从而提取出声源深度 z_s . 两个峰值条纹对应的深度估计模糊函数分别为

$$M_1(z) = \int_{\sin \theta(r_{\min})}^{\sin \theta(r_{\max})} \mathcal{D}[B_1(k \sin \theta_1)] e^{ik \sin \theta_1 \cdot z} dk \sin \theta_1$$

$$M_2(z) = \int_{\sin \theta(r_{\min})}^{\sin \theta(r_{\max})} \mathcal{D}[B_2(k \sin \theta_2)] e^{ik \sin \theta_2 \cdot z} dk \sin \theta_2, \quad (11)$$

其中, $\mathcal{D}[x] = x - \bar{x}$ 为去均值函数, 积分范围由声源距离上下限 r_{\max} 和 r_{\min} 对应到达角决定. $B_1(k \sin \theta_1)$ 和 $B_2(k \sin \theta_2)$ 对应两个峰值条纹的输出功率, 如 (8) 式和 (9) 式所示. 需要注意的是, 利用 (11) 式进行声源深度估计时, 须将 $k \sin \theta_1$ 这一整体视为 (8) 式中 B_1 的自变量, 将 $k \sin \theta_2$ 这一整体视为 (9) 式中 B_2 的自变量, 这时求出的峰值条纹起伏频率为 z_s/π , 具有声源深度的物理含义. 本文使用两个峰值条纹的模糊函数共同估计声源深度, 最终声源深度估计结果 z^* 为

$$z^* = \underset{z}{\operatorname{argmax}} \{ \operatorname{abs}[M_1(z)] + \operatorname{abs}[M_2(z)] \}, \quad (12)$$

其中, $\operatorname{abs}[\cdot]$ 代表绝对值函数.

3.2 利用主成分分析方法对干涉结构进行重构

干涉结构峰值条纹同时结合了阵列处理增益和目标运动带来的时间 (距离) 累计增益, 当阵列输入信噪比较高时, 可以直接从干涉结构中提取条纹的峰值轨迹. 然而, 海底反射区声呐接收信噪比一般较低, 峰值条纹易被噪声淹没无法提取. 这就需要对于干涉结构进行降噪预处理, 修复被噪声淹没的峰值条纹, 从而利用 3.1 节所提方法估计声源深度.

从图 2 可以看出, 角度-距离干涉结构图像的纹理特征较为简单, 两条峰值条纹的灰度分布决定

了干涉结构的全局纹理信息, 这种简单纹理图像必然是低秩的^[19]. 当图像的秩较低时, 其像素矩阵的非零奇异值个数远小于矩阵阶数. 像素矩阵可由非零奇异值对应子空间生成, 这就意味着干涉结构的主导成分, 即峰值条纹的灰度分布, 可由数量远低于矩阵阶数的子空间生成. 同时, 噪声则均匀分布在各个子空间中. 本节将利用这一图像结构化特性对角度-距离干涉结构进行降噪处理.

将第 2 节所提角度-距离干涉结构对应像素矩阵记为原始干涉结构 \mathbf{X} , 对 \mathbf{X} 进行奇异值分解:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U} \mathbf{\Delta} \mathbf{V}^T, \quad (13)$$

其中, \mathbf{U} 为左奇异向量矩阵, \mathbf{V} 为右奇异向量矩阵, $\mathbf{\Delta}$ 为奇异值矩阵, $[\cdot]^T$ 代表转置符号. 将奇异值从大到小进行排列, 取前 k 个大奇异值对应的奇异值矩阵和左、右奇异向量矩阵, 分别记为 $\mathbf{\Delta}^{(k)}$, $\mathbf{U}^{(k)}$ 和 $\mathbf{V}^{(k)}$, 对干涉结构进行重构:

$$\mathbf{X}_{\text{new}} = \mathbf{U}^{(k)} \mathbf{\Delta}^{(k)} (\mathbf{V}^{(k)})^T, \quad (14)$$

其中, \mathbf{X}_{new} 代表重构干涉结构. 由于干涉结构低秩, k 取较小值即可恢复干涉结构的主导成分, 而噪声成分仅有部分保留在重构干涉结构中, 因此重构干涉结构 \mathbf{X}_{new} 中的噪声成分将大幅减少, 被噪声淹没的峰值条纹的起伏特征将重现. 在低信噪比条件下, 利用重构干涉结构进行目标深度估计的结果将优于未重构时对应的结果.

3.3 声源深度估计流程

本文所提声源深度估计方法的流程如下:

1) 对每一个距离处垂直阵接收信号进行常规波束形成处理, 得到对应的空间谱, 将空间谱沿距离方向进行拼接, 即可得到原始角度-距离干涉结构 \mathbf{X} .

2) 利用 (14) 式对原始干涉结构 \mathbf{X} 进行重构, 得到重构干涉结构 \mathbf{X}_{new} . 此时两个峰值条纹将重现于干涉结构中, 即重构干涉结构中每一个距离处的空间谱将存在两个明显的峰值.

3) 提取重构干涉结构中每一个距离处的空间谱峰值以及峰值对应的角度, 沿角度方向进行拼接, 即可得到 (8) 式和 (9) 式对应的两个峰值条纹强度曲线 $B_1(k \sin \theta_1)$ 和 $B_2(k \sin \theta_2)$. 利用 (11) 式对 $B_1(k \sin \theta_1)$ 和 $B_2(k \sin \theta_2)$ 进行傅里叶变换, 得到深度估计模糊函数, 并利用 (12) 式得到最终的声源深度估计结果.

该方法要求声源沿水平方向运动. 当信噪比条件能满足重构干涉结构中的峰值条纹不被噪声淹没时, 即可根据上述流程从重构干涉结构中直接提取峰值条纹强度, 并从中解算声源深度. 如信噪比过低导致重构干涉结构中的峰值条纹被噪声淹没, 可以通过声场计算软件计算声源在不同距离处的两类到达角, 如图 2 中白线所示, 并从干涉结构像素矩阵中提取白线贯穿的像素点, 作为峰值条纹强度曲线, 再利用 (11) 式对其进行傅里叶变换. 但这要求先验已知声源距离, 以及准确的环境参数信息.

4 仿真分析

本节将通过声场计算软件 Bellhop 对本文所提的深度估计方法进行仿真分析. 其中, 4.1 节对海底弹射区到达角特性进行分析; 4.2 节给出 3.1 节声源深度估计方法的仿真结果; 4.3 节通过蒙特卡罗实验仿真分析 3.2 节干涉结构预处理方法对深度估计结果的影响. 仿真波导环境如图 3 所示, 声速剖面采用 Munk 曲线, 水深 3000 m, 声道轴深度为 1000 m, 海底由 500 m 单层沉积层和海底半空间组成. 接收阵为垂直线列阵, 共 13 个阵元, 阵元间隔 4 m, 最靠近海面的阵元深度为 240 m.

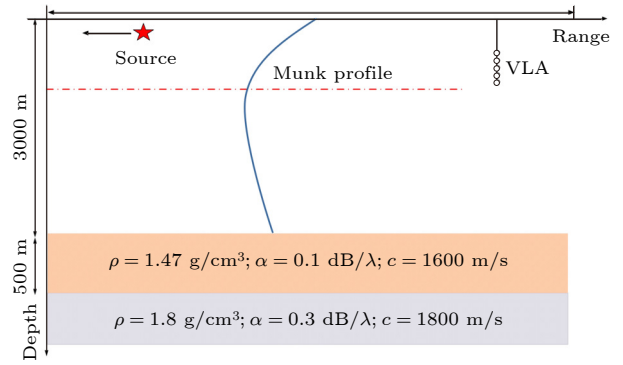


图 3 仿真环境示意图

Fig. 3. Environment for simulation.

4.1 海底弹射区到达角特性分析

考虑声源深度为 100 m, 距离 10 km, 以及频率为 150 Hz 时的情况, 此时声源位于海底弹射区, 特征声线轨迹如图 1 所示. 对阵列接收信号进行常规波束形成得到图 4(a) 所示归一化空间谱, 可以明显看出两个峰值, 其中左边峰值对应角度与第一类到达角 θ_1 一致, 右边峰值对应角度与第二类到达角 θ_2 一致. 图 4(b) 给出了声源深度为 100 m 时, 四条本征声线到达角随距离的变化, 可以看出, BR 和 SBR 的到达角在各距离处基本一致, BSR 和 SBSR 的到达角在各距离处基本一致, 两类到达角的绝对值均随距离的增大单调下降. 图 4(c) 给

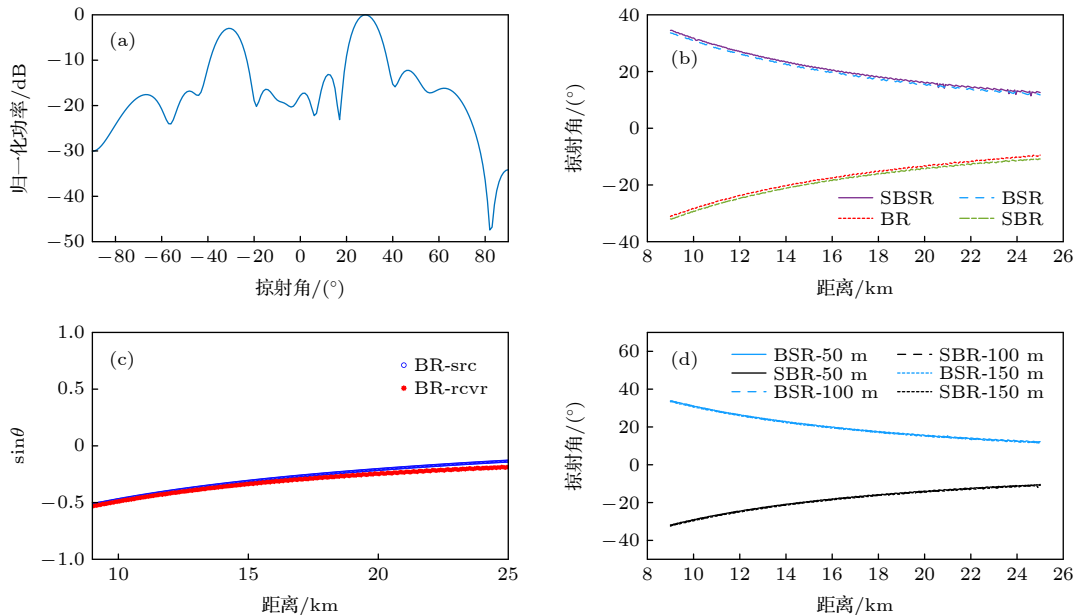


图 4 海底弹射区到达角特性 (a) 声源深度为 100 m, 距离 10 km 时, 垂直阵波束形成对应的归一化空间谱; (b) 四条本征声线到达角随距离的变化; (c) BR 到达角与出射角的正弦值随距离的变化; (d) 声源位于不同深度时, 两类到达角随距离的变化

Fig. 4. Characteristics of arrival angel in bottom bounce area: (a) Normalized spatial spectrum of vertical line array (VLA) with the source depth of 100 m, range of 10 km; (b) arrival angle of four eigen-rays verse range; (c) the sine value of BR's arrival angle and exit angle verse range; (d) two kinds of arrival angles verse range at different source depths.

出了声源深度为 100 m 时, BR 的到达角 θ_1 和出射角 α_1 的正弦值随距离的变化, 其中蓝色线代表出射角曲线, 红色线代表到达角曲线, 可以看出到达角和出射角的正弦值在不同距离上几乎一致. 图 4(d) 给出了声源深度为 50, 100 和 150 m 时, BSR 和 SBR 的到达角随距离的变化, 各条蓝色线代表 BSR 的到达角曲线, 各条黑色线代表 SBR 的到达角曲线; 对于同一类声线, 当声源位于不同深度时, 到达角随距离变化曲线基本重叠, 即到达角几乎不随声源深度变化.

4.2 通过峰值条纹估计声源深度

声源深度为 50 m, 频率为 200 Hz 时对应干涉结构如图 5(a) 所示, 声源深度为 100 m, 频率为

100 Hz 时对应干涉结构如图 5(b) 所示, 距离变化范围 5—27 km, 不考虑噪声. 声源距离 8 km 处, 图 5(b) 干涉结构角度方向切片如图 5(c) 所示, 存在两个明显的峰值, 由倒三角标示, 这两个峰值即为该距离处的峰值条纹强度. 从干涉结构中提取每一个距离处的两个峰值及峰值对应的角度, 沿角度方向进行拼接, 即可得到两个峰值条纹. 从图 5(a) 和图 5(b) 中提取出的峰值条纹 1 如图 5(d) 所示. 根据 (10) 式, 由于图 5(a) 和图 5(b) 对应的两组声源参数 $k \cdot z_s$ 相同, 因此干涉结构峰值条纹的起伏完全一致, 因此图 5(d) 两条轨迹几乎重叠.

当声源频率固定时, 峰值条纹的起伏频率 z_s/π 由声源深度决定. 图 6(a) 给出了声源深度分别位于 20 和 100 m, 频率为 150 Hz, 不存在噪声时干

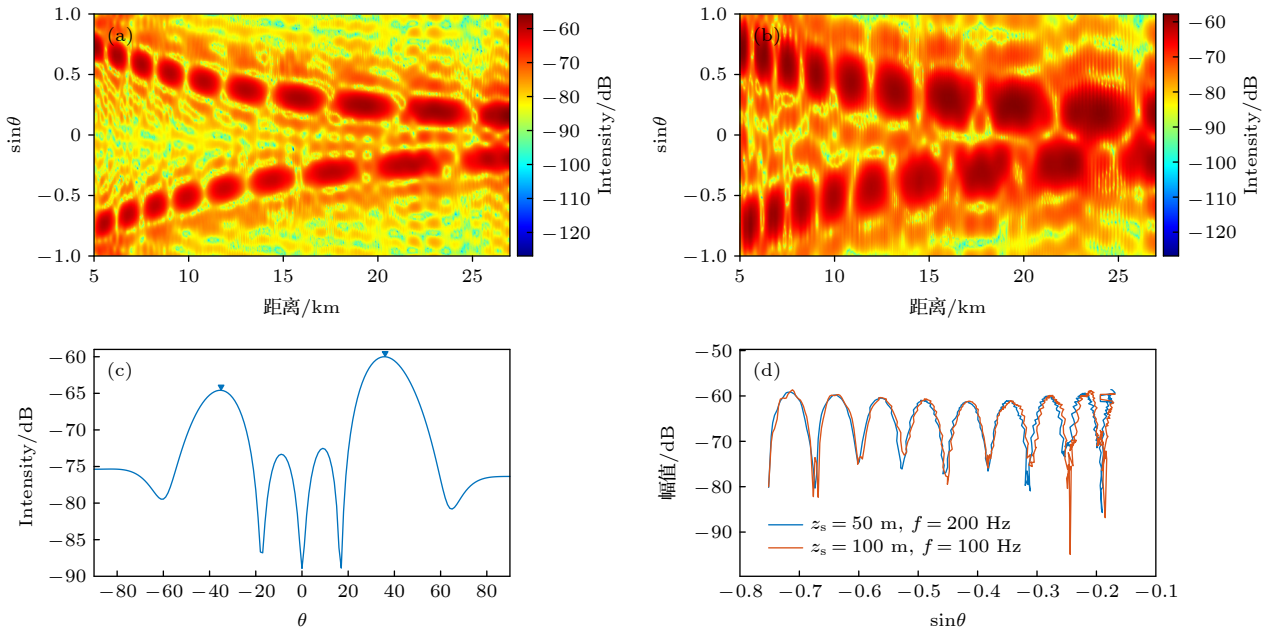


图 5 不同深度和声源频率的角度-距离干涉结构 (a) 声源深度 50 m, 频率 200 Hz; (b) 声源深度 100 m, 频率 100 Hz; (c) 声源距离 8 km 处, 图 (b) 干涉结构角度方向切片; (d) 图 (a) 和 (b) 两种干涉结构提取的峰值条纹 1

Fig. 5. Angle-range interference pattern: (a) Source depth of 50 m, frequency of 200 Hz; (b) source depth of 100 m, frequency of 100 Hz; (c) slice of interference pattern (b) with source range of 8 km; (d) peak stripe track-1 of panels (a) and (b).

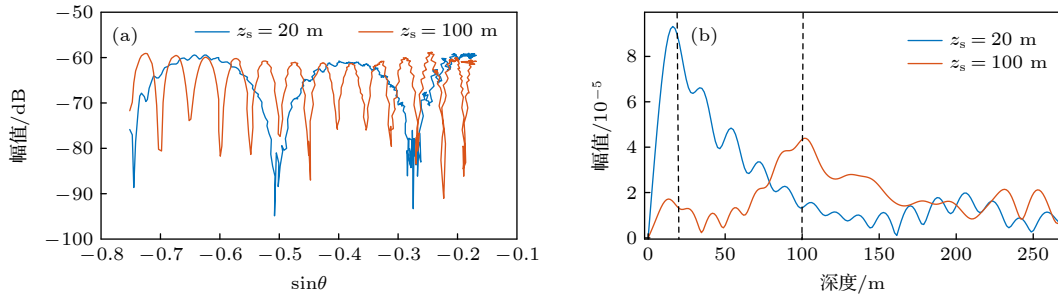


图 6 声源深度为 20 和 100 m、频率为 150 Hz、无噪声时的深度估计结果 (a) 峰值条纹 1 轨迹; (b) 深度模糊函数

Fig. 6. Depth estimate result without noise at the source depth of 20 and 100 m, frequency of 200 Hz: (a) Peak stripe track-1; (b) depth estimation ambiguous function.

涉结构峰值条纹 1 的轨迹. 可以看出, 声源深度 20 m 时起伏频率远小于深度 100 m 时的起伏频率, 两者相差约 5 倍. 通过 (11) 式得到的深度估计模糊函数在图 6(b) 给出, 黑色虚线代表声源真实位置, 可以看出, 深度估计模糊函数在声源真实深度附近存在最大值.

根据 (11) 式, 空域傅里叶变换的积分上下限由声源水平运动距离决定, 因此水平运动距离会对深度估计性能产生影响. 由于声源的运动距离决定了峰值条纹的波形宽度, 因此运动距离决定了深度模糊函数的主瓣宽度. 声源深度为 100 m, 频率为 150 Hz, 运动距离为 3 和 5 km 时对应的归一化深

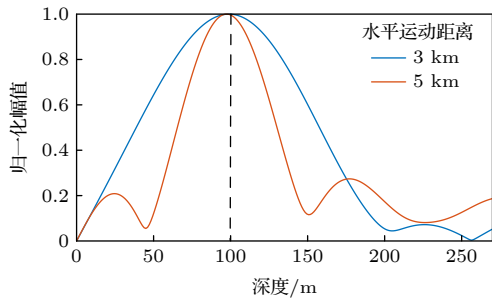


图 7 两种声源运动距离对应的深度模糊函数

Fig. 7. Depth ambiguity function corresponding to two kinds of sources moving distance.

度估计模糊函数由图 7 给出. 可以看出, 声源水平运动距离越长, 深度模糊函数的主瓣宽度越小, 反之则越大. 理论上, 声源的运动距离仅影响深度模糊函数主瓣宽度, 并不会影响深度估计结果, 但当声源深度较浅、声源频率较低时, 声源运动距离范围内可能不包含一个完整的峰值条纹起伏周期, 这将影响声源深度估计结果.

4.3 主成分分析重构方法对深度估计结果的影响

声源深度为 100 m, 频率为 150 Hz, 不存在噪声时原始干涉结构由图 8(a) 给出. 利用 (14) 式得到的重构干涉结构如图 8(b)–(d) 所示, 分别对应 k 取值 2, 4 和 6. 可以看出, $k = 2$ 时角度-距离干涉结构的峰值条纹无法恢复; $k = 4$ 时峰值条纹可以部分恢复, 但在较近距离处的峰值条纹重构效果并不理想, 这会导致后续深度估计结果出现偏差; $k = 6$ 时峰值条纹迹基本可以完全恢复, 此时重构干涉结构除峰值条纹外的纹理特征与原结构并不符合, 但由于本文所提目标深度估计方法仅利用峰值条纹的起伏特性, 因此不会影响深度估计结果.

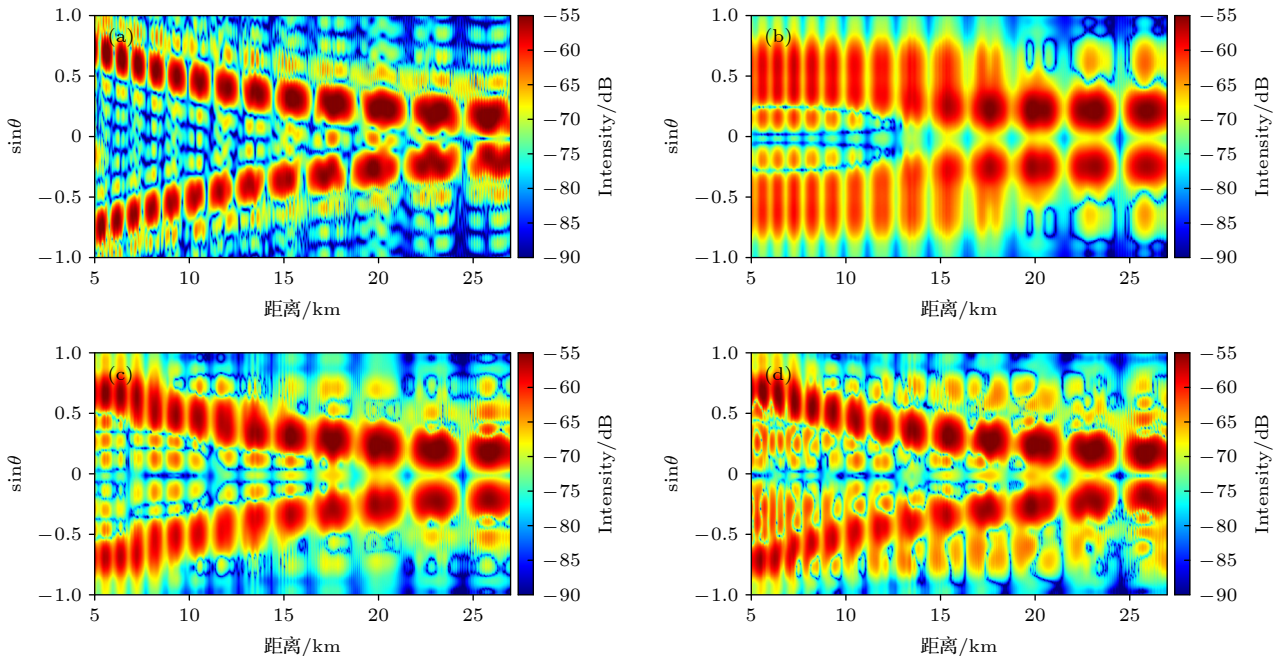


图 8 声源深度为 100 m, 声源频率为 150 Hz 时对应的角度-距离干涉结构 (a) 原始干涉结构; (b) $k = 2$ 时重构干涉结构; (c) $k = 4$ 时重构干涉结构; (d) $k = 6$ 时重构干涉结构

Fig. 8. Angle-range interference pattern corresponding to the source depth of 100 m and frequency of 150 Hz: (a) Original interference pattern; (b) reconstructed interference pattern with $k = 2$; (c) reconstructed interference pattern with $k = 4$; (d) reconstructed interference pattern with $k = 6$.

声源深度为 100 m, 声源频率为 150 Hz, 信噪比为 -5 dB 时, 对应干涉结构及利用 (11) 式得到的深度估计模糊函数如图 9(a) 和图 9(b) 所示, 本文信噪比均指信号频率处信噪比. 由于此时接收信噪比较低, 深度估计结果与真实深度存在较大偏差. 通过 (14) 式对图 9(a) 进行重构, 得到的重构干涉结构及对应的深度估计模糊函数如图 9(c) 和图 9(d) 所示, 取 $k=8$, 可以看出重构方法对峰值条纹有增强作用, 深度估计结果为 102 m, 与真实

深度较为接近.

声源深度为 100 m, 声源频率为 150 Hz, 信噪比为 -4 dB 时, 50 次蒙特卡罗实验的深度估计结果由图 10 给出, 其中图 10(a) 和图 10(b) 分别是利用原始干涉结构得到的深度估计结果和利用重构干涉结构得到的深度估计结果. 可以看出, 利用重构干涉结构得到的结果在真实声源深度处存在一条明显的亮带, 而利用原始干涉结构得到的结果并不存在明显亮带, 且存在多个伪峰.

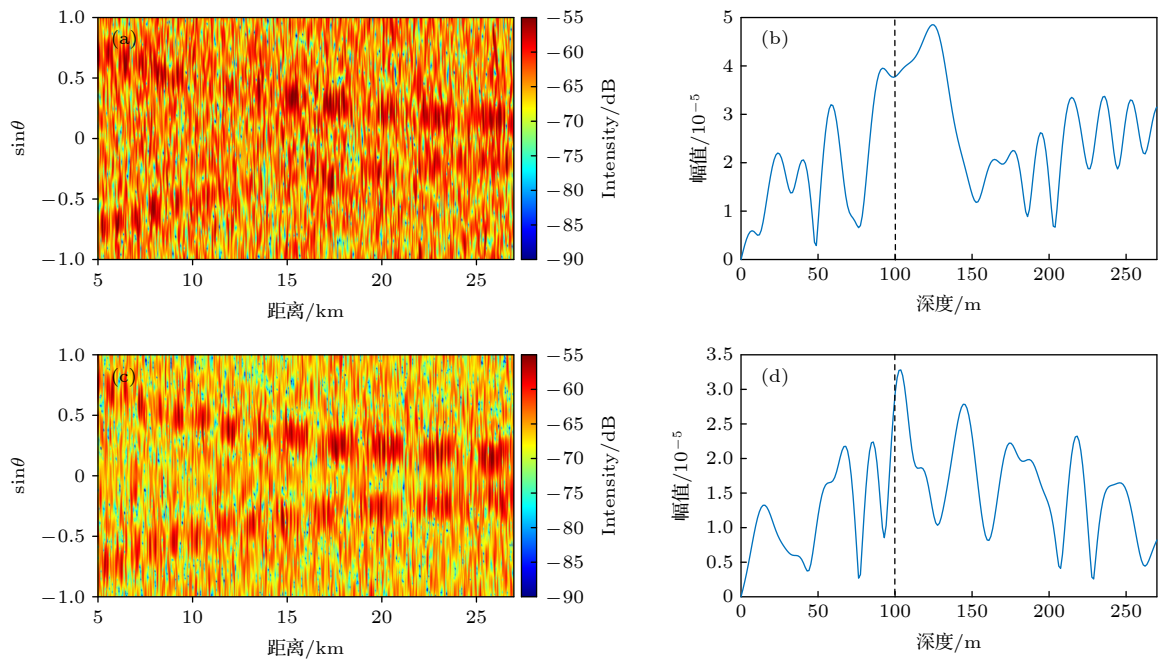


图 9 声源深度为 100 m、声源频率为 150 Hz、信噪比为 -5 dB 时对应的 (a) 原始干涉结构、(b) 深度估计模糊函数、(c) 重构干涉结构和 (d) 深度估计模糊函数

Fig. 9. (a) Original interference pattern, (b) depth estimation ambiguous function, (c) reconstructed interference pattern, and (d) depth estimation ambiguous function with the source depth of 100 m, frequency of 150 Hz, SNR of -5 dB.

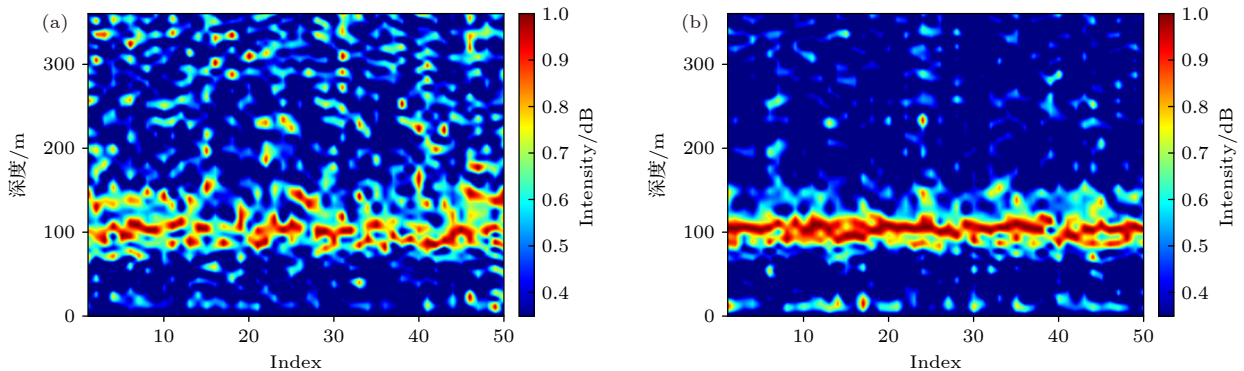


图 10 声源深度为 100 m、声源频率为 150 Hz、信噪比为 -4 dB 时, 50 次蒙特卡罗实验结果 (a) 原始干涉结构得到的深度估计结果; (b) 重构干涉结构得到的深度估计结果

Fig. 10. Results of 50 times Monte Carlo experiment with source depth of 100 m, frequency of 150 Hz, SNR of -4 dB: (a) Depth estimation result from original interference pattern; (b) depth estimation result from reconstructed interference pattern.

定义深度估计准确率 q :

$$q = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{sgn}[\varepsilon - |z_n - z_{\text{real}}|], \quad (15)$$

其中, N 为蒙特卡罗实验次数, $\text{sgn}[\cdot]$ 为示性函数, ε 为允许误差范围, z_n 表示第 n 次深度估计结果. 表 1 列出了不同信噪比, k 取不同值时, 利用重构干涉结构估计目标深度的准确率, 取 $\varepsilon = 5 \text{ m}$, $N = 1000$ 次. 可以看出 k 的取值会极大地影响深度估计结果准确率: 当 k 取值较小时, 峰值条纹恢复效果不佳, 导致后续深度估计结果受到影响; 当 k 取值较大时, 噪声难以有效消除.

表 1 不同信噪比条件下深度估计的准确率

Table 1. Accuracy of depth estimation at different SNR conditions.

SNR	k			
	3	7	11	16
5 dB	9.3%	97.0%	99.8%	98.6%
0 dB	7.8%	83.7%	89.2%	84.4%
-5 dB	6.6%	64.8%	76.0%	65.8%

图 11 给出了不同信噪比条件下, 利用原始干涉结构峰值条纹进行深度估计的准确率和重构干涉结构对应的深度估计准确率. 可以看出, 当信噪比较高时深度估计准确率基本一致, 随着信噪比的下降, 准确率也逐渐降低, 但使用主成分分析进行重构后, 准确率始终高于原始干涉结构对应结果的准确率, 当信噪比在 -3 dB 时, 预处理后准确率仍然有 80% 以上.

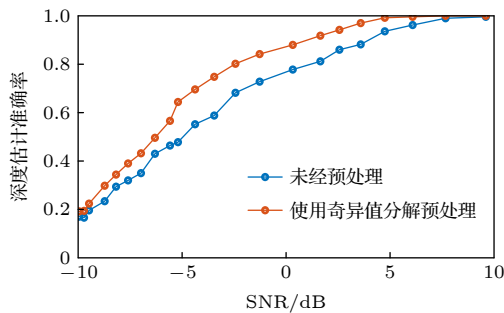


图 11 未重构和重构后深度估计准确率随信噪比的变化

Fig. 11. Accuracy of depth estimation versus SNR using the original interference pattern and the reconstructed interference pattern.

5 结 论

深海海底弹射区声场的干涉现象导致角度-距离干涉结构的峰值条纹能量起伏, 起伏频率与目标深度有关. 本文对海底弹射区角度-距离干涉结构

进行研究, 基于射线模型对干涉结构进行建模和分析, 推导出干涉结构峰值条纹关于声源位置的理论表达式. 从理论分析和数值仿真结果均可以看出, 峰值条纹起伏频率与声源激发频率和深度直接相关, 固定声源频率, 峰值条纹起伏频率将随声源深度的增大而增大. 基于此, 本文提出了一种海底弹射区目标深度估计方法, 该方法包括利用峰值条纹解算目标深度和干涉结构重构两部分. 该方法结合空间谱分析, 利用峰值条纹起伏频率计算声源深度, 这一过程中使用了阵增益和峰值条纹的长时累积增益以提高输出信噪比; 同时该方法利用干涉结构的图像低秩特性, 结合基于主成分分析的干涉结构重构方法, 修复被噪声淹没的峰值条纹, 以使利用峰值条纹解算出的声源深度更加准确. 经蒙特卡罗仿真实验验证, 该方法在信噪比 -3 dB 时依然能获得 80% 以上准确率, 且干涉结构经过重构后深度估计结果准确率高出未经重构的估计结果.

参考文献

- [1] Hinich M J 1979 *J. Acoust. Soc. Am.* **66** 480
- [2] Debever C, Kuperman W A 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 1979
- [3] Yang T C 1979 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 1736
- [4] Yang T C 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **135** 1218
- [5] Wang W B, Ni H Y, Su L, et al. 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **146** EL317
- [6] Liu Y N, Niu H Q, Li Z L 2020 *J. Acoust. Soc. Am.* **148** 873
- [7] Neilsen T B, Escobar-Amado C D, Acree M C, et al. 2021 *J. Acoust. Soc. Am.* **149** 692
- [8] Liu Y N, Niu H Q, Li Z L, et al. 2021 *JASA Express Lett.* **1** 036002
- [9] Duan R, Yang K D, Ma Y L, et al. 2012 *Chin. Phys. B* **21** 124301
- [10] Duan R, Yang K D, Li H, et al. 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **145** 903
- [11] Mccargar R, Zurk L M 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** EL320
- [12] Zheng G Y, Yang T C, Ma Q M, et al. 2020 *J. Acoust. Soc. Am.* **148** 347
- [13] Lei Z X, Yang K D, Ma Y L 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **139** EL19
- [14] Han Z B, Peng Z H, Liu X H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 114301 (in Chinese) [韩志斌, 彭朝晖, 刘雄厚 2020 物理学报 **69** 114301]
- [15] Hu Z G, Li Z L, Zhang R H, et al. 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 014303 (in Chinese) [胡治国, 李整林, 张仁和等 2016 物理学报 **65** 014303]
- [16] Wu J N, Zhou S H, Zhang Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **46** 014303 (in Chinese) [吴俊楠, 周士弘, 张岩 2016 中国科学: 物理学 力学 天文学 **46** 014303]
- [17] Weng J B, Yang Y M 2018 *IEEE J. Oceanic Eng.* **43** 1171
- [18] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computation Ocean Acoustic* (2nd Ed.) (New York: Springer) pp169–171
- [19] Srinivasan S, Srinivasan R 2018 *IEEE Trans. Image Process.* **16** 2688

Source depth estimation using angle-range interference pattern in deep ocean bottom bounce area^{*}

Zhu Qi-Xuan¹⁾²⁾ Sun Chao^{1)2)†} Liu Xiong-Hou¹⁾²⁾

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

2) (*Shaanxi Key Laboratory of Underwater Information Technology, Xi'an 710072, China*)

(Received 19 April 2022; revised manuscript received 15 May 2022)

Abstract

Passive sonar limits the ability to sample vertical scale spatiotemporally, and the received signal is indistinct by noise, resulting in the performance degradation or even failure of the source depth estimation method in deep ocean bottom bounce area. When vertical line array is arranged near the sea surface to locate the source by matched-field processing in bottom bounce area, there is great ambiguity in depth dimension. In this work, the problem of source depth estimation in bottom bounce area is addressed. The peak stripe of angle-range interference pattern is modeled and analyzed based on the ray theory, and a source depth estimation method is proposed, which comprises two parts: estimating sound source depth by utilizing peak stripe fluctuation characteristic combined with spatial spectrum analysis, and reconstructing interference pattern using principal component analysis. The flowchart of the method is listed as follows. Firstly, the spatial spectrum corresponding to each range is spliced to obtain the original angle-range interference pattern. Secondly, the original interference pattern is denoised by principal component analysis to obtain the reconstructed interference structure. Finally, the fluctuation period of peak fringes is extracted from the reconstructed interference pattern to calculate the source depth. Under the low signal-to-noise ratio (SNR) condition, the peak stripe destroyed by noise will reappear in the reconstructed interference pattern and the estimation result of sound source depth will be more accurate, making the source depth estimation method suitable for bottom bounce area. The method combines the space-time cumulative gain of the array and the low-rank characteristic of the interference pattern. The simulation results obtained by Bellhop indicate that the fluctuation period of peak stripe depends on the depth and frequency of the source, which is consistent with the modeling result, and the source depth can be estimated precisely by spatial Fourier transform. The simulation results also show that the rank of the interference pattern is very low and the peak stripe can be composed of a few principal components. Monte Carlo experimental results indicate that the estimated results of the source depth by using reconstructed interference pattern are more accurate than those without using principal component analysis at low SNR condition. The proposed method can achieve more than 80% accuracy at -3 dB SNR.

Keywords: bottom bounce area, angle-range interference pattern, source depth estimation, low signal-to-noise ratio

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.71.20220746

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11534009).

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

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

朱启轩 孙超 刘雄厚

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

Zhu Qi-Xuan Sun Chao Liu Xiong-Hou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 184301 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220746

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220746>

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

深海海底反射区声场角谱域分布结构分析及在声纳波束俯仰上的应用

Analysis of sound field distribution of angle dimension in deep ocean bottom bounce area and its application to active sonar vertical beam pitch

物理学报. 2020, 69(11): 114301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201652>

风成噪声背景下垂直阵阵列信噪比随声源深度的变化规律

Variation of signal-to-noise ratio of vertical array with sound source depth under wind-generated noise background

物理学报. 2022, 71(4): 044302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211654>

深海大接收深度海底混响研究

Bottom reverberation for large receiving depth in deep water

物理学报. 2019, 68(13): 134303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181883>

利用海洋环境噪声空间特性估计浅海海底分层结构及地声参数

Estimating structure and geoacoustic parameters of sub-bottom by using spatial characteristics of ocean ambient noise in shallow water

物理学报. 2019, 68(21): 214303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190824>

深海海底反射会聚区声传播特性

Characteristics of convergence zone formed by bottom reflection in deep water

物理学报. 2019, 68(1): 014301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181761>

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>