

浅海环境中用于目标深度属性判别的 线谱起伏特征量分析*

邓玉鑫¹⁾²⁾ 刘雄厚^{1)2)†} 杨益新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)

(2023 年 12 月 4 日收到; 2024 年 5 月 15 日收到修改稿)

浅海环境中目标辐射线谱的起伏特征可用于水面、水下目标深度属性判别. 已有研究未给出表征水面、水下线谱起伏差异的物理量性质, 导致利用不同物理量进行目标深度属性判别时性能不佳. 针对这一问题, 本文从声源深度起伏所导致的线谱起伏出发, 采用微分方法与统计方法对线谱起伏规律进行分析, 研究了线谱起伏产生的物理机理, 得到了适合用于水面、水下目标深度属性判别的物理量. 首先, 分别推导了复声压实部、声功率与声压幅值关于声源深度的导数关系式, 得到了以上三种物理量在声源深度起伏时的起伏大小; 其次, 利用仿真实验数据从接收深度、声源水平距离、线谱频率等层面对理论推导进行验证, 并对线谱的归一化起伏特征进行了分析. 最后, 利用海试数据验证了相关结论. 结果表明, 当声源的深度起伏时, 水面、水下线谱的起伏差异源自各阶模态的相互作用. 声源频率、声源水平距离、接收深度三种因素决定了模态间相互作用的性质. 声压幅值适用于构建目标深度属性判别特征量, 可用于表征低频线谱的强度起伏差异. 数值仿真和海试数据处理结果表明, 相较于声压实部和声功率, 利用声压幅值构建的归一化水面、水下目标深度属性判别特征量具有更优性能.

关键词: 线谱起伏, 深度属性判别, 浅海环境, 简正波

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d, 43.50.+y

DOI: 10.7498/aps.73.20231911

1 引言

浅海环境中目标的深度属性判别是声学探测领域的热点问题之一. 提取能够有效区分不同深度目标的特征量, 是进行深度属性判别的前提. 2009 年, 余赟等^[1]研究了垂直双水听器声压互谱有功分量的正负号分布特征, 并将其用于深度属性判别. 基于不同深度目标激发的简正波模态函数的幅度差异特征, 刘志韬等^[2]和 Yang^[3]分别设计了多种方法以分辨目标深度属性. 李晓彬等^[4]基于不同深度声源激发简正波的俯仰角差异特征, 利用接收阵

的互相关输出峰值迁移曲线判别目标深度. 以上研究并未考虑海洋中声场强度起伏对深度属性判别性能的影响.

声场的强度起伏是海洋中普遍存在的声传播现象. 如何从声场强度起伏中提取与目标深度相关的特征量同样受到了国内外学者的广泛关注. 20 世纪 70 年代, Urick^[5]指出合理利用起伏能够增加探测范围. 此后, 许多学者围绕强度起伏的成因与应用展开研究^[6-11], 焦点之一便是声源深度垂直起伏引起的强度起伏. 目标在海洋中运动时, 其深度几乎不可能保持不变. 一方面, 受海面波浪作用的水面目标吃水深度不断起伏; 另一方面, 海水密

* 国家自然科学基金 (批准号: U2341203, 12274346) 和国家重点研发计划 (批准号: 2016YFC1400200) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xhliu@nwpu.edu.cn

度的不均匀性使得水下目标运动深度不断起伏. Joseph^[11] 在实验中发现, 强度起伏主要是由靠近接收点与声源的波浪引起的. 在此基础上, Clay 等^[12] 利用数学方法解释了线谱强度起伏与波浪关系的本质, 即水面目标吃水深度随波高变化所导致的模态函数幅度起伏. George^[13] 基于波浪所致的深度扰动推导了一种非高斯型声强级概率密度函数, 推导结果与水面目标观测数据声强级概率密度函数吻合, 验证了深度起伏引起的声强起伏现象.

近年来, 强度起伏的研究对象拓展至不同深度属性目标的辐射噪声, 为水面、水下目标判别提供了许多有益思路. Jemmott 与 Culver^[14] 利用 Rice 分布模型分析水面与水下目标辐射噪声幅度的衰落特性, 指出水面与水下目标辐射噪声的幅度分布存在差异, 前者接近 Rice 模型而后者接近 Rayleigh 模型. 但是, 该模型的建立需要大量样本数据用于模型参数估计, 而声源水平运动时的强度起伏特征会导致估计误差增加. Premus^[15] 利用模态闪烁指数 (modal scintillation index, MSI) 表征声压场模态的起伏, 揭示了模态强度起伏程度与声源深度起伏的相关性. 谢志诚和葛辉良^[16] 在 Premus 的基础上构建了能量波动指数 (energy scintillation index, ESI) 表征简正模对复声压场起伏的贡献, 发现近水面声源深度的起伏使所有模态的 ESI 较大, 而水下声源仅在模态函数波节处的 ESI 较大. 虽然基于模态强度起伏差异的深度属性判别方法已有许多研究成果^[17-19], 但是该类方法的前提是从接收信号中提取模态信息. 这对阵列的模态信息采样能力提出了很高要求, 很多时候难以满足.

与模态处理的思路相反, Wagstaff^[20] 定量地分析了水面环境线谱噪声功率与水下线谱信号功率的方差, 得出了水面线谱功率起伏强于水下的结论. 然而, Wagstaff 提出的基于功率起伏的判别方法中水面、水下目标判别门限必须通过大量实验划定. 当信噪比等信息缺失时, 这种经验门限^[20] 的可靠性就会下降. 张莉^[21] 在 Wagstaff 提出的归一化起伏特征量的基础上, 以幅度代替功率作为滤波器输入, 提出了线谱起伏指数的概念. 目标的深度属性的判别结果是由线谱起伏指数高于或低于门限值的帧数决定的. 然而, 当环境信息缺失时, 这一方法仍未解决门限值不可靠的局限性. 以上研究中, 声强级、幅值、声强 (功率) 等物理量均可作为线谱起伏特征的研究对象. 但是, 已有研究未涉及

水面、水下线谱起伏差异产生的物理机理, 并且对用于目标深度属性判别的物理量认识尚浅, 导致利用线谱起伏特征量进行水面、水下目标深度属性判别时性能不佳.

针对已有线谱起伏特征研究方法的缺点与不足, 本文研究浅海环境中目标线谱的起伏特征量, 研究了线谱起伏特征的物理机理, 比较分析得出了更适合用于水面、水下目标深度属性判别的物理量. 主要考虑以下几点:

1) 针对表征水面、水下线谱起伏差异的物理量选取问题, 选取水声线谱信号的复声压实部、声功率、声压幅值三种物理量作为起伏特征的研究对象;

2) 针对判别门限的选取问题, 采用微分方法推导不同物理量在声源深度起伏时的起伏特征表达式, 采用统计方法验证仿真海洋环境与真实海洋环境中数学推导结论的合理性;

3) 针对获取线谱起伏差异的最佳接收深度预报问题, 聚焦接收深度-声源深度二维空间中的线谱起伏特征, 考虑了声源水平距离、声源频率对线谱起伏特征的影响.

本文其他部分安排如下. 第 2 节推导了三种物理量关于声源深度的偏导数式, 分析了声源深度起伏时不同物理量的起伏特征与起伏的物理机理, 得出声压幅值适合构建深度属性判别特征量. 第 3 节在声源级、接收深度、声源水平距离、声源频率、声源运动距离等层面进行仿真实验, 分析了接收深度-声源深度二维空间中的线谱起伏特征与其产生机理, 验证了所得结论. 第 4 节处理试验数据验证了所得结论. 第 5 节总结了全文相关结论并作了讨论.

2 线谱起伏特征的理论分析

当水面、水下目标深度起伏时, 其辐射线谱噪声强度的起伏程度不同. 线谱的起伏特征差异, 可以为目标判别提供依据. 线谱通常以复声压实部、声功率、声压幅值等物理量描述. 本节将借助微分方法分析不同物理量在声源深度起伏时的起伏特征.

2.1 起伏模型构建

在图 1 的等声速理想波导环境中, 存在一个深度随时间起伏的运动声源. 根据简正波传播理论, 远场中某点 (r, z) 处声源在接收点 $(0, z_r)$ 处激发的

声压场可写为

$$p(r, z, z_r) = Q \cdot \sum_{m=1}^M \sin(k_{zm} z) \sin(k_{zm} z_r) \frac{ie^{i(k_{rm} r - \pi/4)}}{\sqrt{k_{rm} r}}, \quad (1)$$

式中, Q 为系数; M 是传播模态阶数; $\sin(k_{zm} \cdot)$, k_{rm} 分别表示第 m 阶模态的模态深度函数 (在图 1 的压力释放海面条件中为正弦型) 与水平波数.

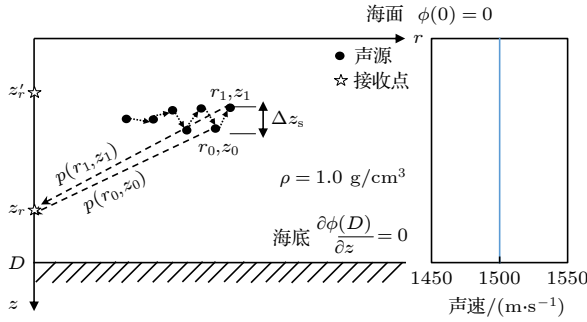


图 1 理想环境中的起伏声源示意图

Fig. 1. Moving source moving at a varying depth in an ideal waveguide.

考虑当声源由 (r_0, z_0) 运动到 (r_1, z_1) 时, 接收点处声压场的变化. 远场中, 细微的距离变化对强度起伏的影响极小 [22], 此处暂不考虑水平距离变化对强度起伏的影响, 视作 $r_0 = r_1$. 因此, 接收点处声压场的起伏率可写为

$$\Delta p(r_0, z_0 - z_1, z_r) = \frac{p(r_0, z_0, z_r) - p(r_0, z_1, z_r)}{z_0 - z_1}. \quad (2)$$

实际海洋中的运动目标深度起伏量是较小的. 当 $z_1 \rightarrow z_0$ 时, 取极限有

$$\lim_{z_1 \rightarrow z_0} \frac{p(r_0, z_0, z_r) - p(r_1, z_1, z_r)}{z_0 - z_1}. \quad (3)$$

(3) 式结果为声压 $p(r_0, z, z_r)$ 在 $z = z_0$ 时的偏导数. 因此, 远场中任意位置声源深度起伏时的接收声压场起伏程度可由偏导数的绝对值 $|\partial p(r_0, z, z_r)/\partial z|$ 定量描述. 其中, 自变量为声源深度 z_s , 因变量为复声压实部 $\text{Re}[p]$ 、声功率 $P = pp^*$ 与声压幅值 $|p|$.

图 1 中, 当接收深度变为 z_r' 时, (1) 式与 (3) 式分别表示不同于 z_r 处的声压场与偏导数值. 因此, 在不同接收深度处推导 (3) 式, 可以得到声源深度-接收深度二维空间的线谱起伏规律. 2.2 节、2.3 节、2.4 节中线谱起伏特征表达式的推导均是基于此起伏模型展开的.

2.2 复声压实部的起伏分析

(1) 式复声压的实部分量可写为

$$\begin{aligned} \text{Re}[p(r, z_s, z_r)] \\ = Q \cdot \sum_{m=1}^M \sin(k_{zm} z_s) \sin(k_{zm} z_r) \frac{\sin(k_{rm} r - \pi/4)}{\sqrt{k_{rm} r}}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, 垂直波数 k_{zm} 满足

$$k_{zm} = \left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{D}. \quad (5)$$

在波导深度范围内, 不同声源深度上声源深度起伏引起的复声压实部起伏程度 (记为 T_{Re}) 可由 (4) 式对声源深度 z_s 求偏导的绝对值描述, 即

$$\begin{aligned} T_{\text{Re}}(r, z_s, z_r) &= \left| \frac{\partial \text{Re}[p(r, z_s, z_r)]}{\partial z_s} \right| \\ &= Q \cdot \left| \sum_{m=1}^M k_{zm} \cos(k_{zm} z_s) \sin(k_{zm} z_r) \right. \\ &\quad \times \left. \sin(k_{rm} r - \pi/4) / \sqrt{k_{rm} r} \right| \\ &= Q \cdot \left| \sum_{m=1}^M C_m \cos(k_{zm} z_s) \right|, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 复声压实部的偏导量由 $\cos(k_{zm} z_s)$ 的加权结果决定, 加权系数记为 $C_m = k_{zm} \sin(k_{zm} z_r) \times \sin(k_{rm} r - \pi/4) / \sqrt{k_{rm} r}$. (6) 式中, 系数 Q 包含了声源级信息, 这将导致源级较高的声源复声压实部具有更强的起伏性. 已有研究构建的归一化深度属性判别特征量 [20] 消除了源级的影响. 因此, 下文对声源级进行了归一化 ($Q = 1$), 仅关注线谱起伏的深度特征.

为了考察 (6) 式中因变量的分布情况, 下面讨论其零、极值点分布. 图 2 给出了较直观的零值、极值点在声源深度维的分布情况.

定义 (6) 式中第 m 个余弦项的第 l 个极值点深度 $z_e(m, l)$, 具体为

$$z_e(m, l) = \frac{(l-1)\pi}{k_{zm}} = \frac{2(l-1)D}{2m-1}, \quad l = 1, 2, \dots, \quad (7)$$

式中, 第 1 个非水面的极值点深度为 $2D/(2m-1)$. 作为第 2 个极值点, 其代表余弦项小于零的极小值点.

同上定义 (6) 式中第 m 个余弦项的第 l 个零值点深度 $z_o(m, l)$, 具体为

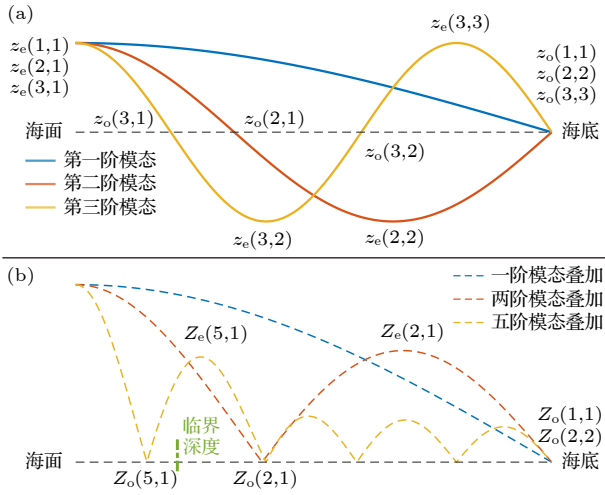


图 2 (a) 单一模式函数零、极值点分布; (b) 模式叠加后零、极值点分布

Fig. 2. (a) Distribution of zero points and extreme points for single mode; (b) distribution of zero points and extreme points for superposed modes.

$$z_o(m, l) = \left(l - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{k_{zm}} = \frac{(2l-1)D}{2m-1}, l = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

式中, 第 1 个零值点深度为 $D/(2m-1)$, 它总浅于 (7) 式的第 2 个极值点深度.

当声源位于水面时, 即 $z_s = 0$, (6) 式可写为

$$T_{\text{Re}}(r, 0, z_r) = \left| \sum_{m=1}^M C_m \right|. \quad (9)$$

(9) 式中, 当加权系数的波数, 水平距离 r 与模式函数幅值改变时, 水面处的复声压实部起伏程度将存在差异. 这表示, 复声压实部起伏特征是由与声源深度相关的模式函数加权叠加确定的. (6) 式绝对值内各项的干涉叠加是较复杂的. 因此, 下面暂不考虑加权系数的影响 (加权系数均为 1), 将声源激发的模式数分为三类, 讨论复声压实部起伏程度的深度分布特征:

1) 当声源仅激发 1 阶模式时, 复声压实部对声源深度的偏导的绝对值是随声源深度增加而单调递减的. 图 2 中, 唯一的零值点 $z_o(1, 1)$ 等于波导深度 D . 此时, 水下声源的复声压实部起伏程度总小于水面.

2) 当第 2 阶模式被激发时, 图 2 中极小值点 $z_e(2, 2)$ 与零值点 $z_o(2, 1)$ 分别等于 $D/3, 2D/3$. T_{Re} 在 $[z_o(2, 1), z_e(2, 2)]$ 内的某深度上存在零值点, 定义该零值点深度为 $Z_o(M, l)$, $l = 1, 2, \dots$ (此时 $M = 2, l = 1$). T_{Re} 在 $[Z_o(2, 1), D]$ 内先递增后递减, 定义该极大值点深度为 $Z_e(M, l)$, $l = 1, 2, \dots$ (此时

$M = 2, l = 1$). 零值点、极大值点与 (7) 式、(8) 式的关系为

$$\begin{cases} Z_o(M, l) \in [z_o(M, l), z_e(M, l+1)], \\ Z_e(M, l) \in [Z_o(M, l), Z_o(M, l+1)]. \end{cases} \quad (10)$$

归因于 T_{Re} 绝对值内第一项、第二项的异号相加, 极大值 $T_{\text{Re}}[r, Z_e(2, 1), z_r]$ 小于水面的 $T_{\text{Re}}(r, 0, z_r)$. 这表示, 虽然此时波导中较深深度上复声压实部的起伏存在增强, 但程度仍小于水面. 一般地, 水面、水下目标判别的临界深度 h_s 不超过 20 m^[23], 若此深度上下目标的线谱复声压实部的起伏存在差异, 则可依据起伏特征区分不同目标的深度属性. 图 2 中, 假设波导深度 $D = 100$ m, 则有 $h_s < D/5 < Z_e(2, 1)$, 更有 $T_{\text{Re}}(r, h_s, z_r) > T_{\text{Re}}[r, Z_e(2, 1), z_r]$. 这表示浅于临界深度的目标复声压实部的起伏仍强于深于临界深度的目标. 因此, 我们能在最佳接收深度 z_r 上利用复声压实部的起伏差异区分激发 2 阶模式以下的目标.

3) 当 3 阶或更高阶模式被激发时, 第 m 项的第 l 个 $z_e(m, l)$ 与 $z_o(m, l)$ 将同时向水面移动, 从而导致 $Z_o(3, l)$ 与 $Z_e(3, l)$ 同步靠近水面. 不同于低阶模式的是, 当模式阶数 M 大到一定程度时, 临界深度 h_s 可能比 $Z_o(M, 1)$ 深, 而比 $Z_e(M, l)$ 浅. 以激发 5 阶模式的声源为例, 图 2 给出了此时零、极值点深度的变化. 一方面, 这将导致 $T_{\text{Re}}[r, Z_o(M, 1), z_r] \ll T_{\text{Re}}[r, Z_e(M, l), z_r]$, 表示水面复声压实部的起伏远弱于水下; 另一方面, 又存在 $T_{\text{Re}}[r, Z_e(M, l), z_r] \rightarrow T_{\text{Re}}(r, 0, z_r)$, 表示水下复声压实部趋向水面的强起伏性. 这两种结果破坏了低阶模式时复声压实部具有的水面强起伏、水下弱起伏的特征差异. 因此, 较高阶模式时, 复声压实部的起伏量不适合作为目标深度属性判别的依据.

以上三点说明, 各阶模式均匀加权求和形成的复声压实部具有水面起伏强、水下起伏弱的特征. 实际上, 加权系数 C_m 之间的量级差异较小. 因此, 当加权系数同号时, 复声压实部仍然具有上述起伏特征. 然而, 由于模式函数在接收深度维振荡分布, 部分接收深度上可能出现异号的加权系数. 此时, 水面的复声压实部起伏将减弱, 而水下的复声压实部起伏将增强. 将能够获取最显著的线谱起伏差异的接收深度称为最佳接收深度, 用 z_r 表示.

从物理层面而言, 当声源深度起伏时, 水面处各阶模式均处于过零点, “共振”效应产生了具有强起伏的复声压实部; 水下分布着存在极值的振荡模

态, 模态间相互抵消产生了起伏弱于水面的复声压实部. 并且, 模态间相互作用的程度是由接收深度、声源接收相对距离、声源频率决定的. 这导致波导中存在一个最佳接收深度, 该深度上获取的复声压实部起伏特征差异最显著.

根据 2.1 节模型, 改变接收深度 z_r 以便分析接收深度-声源深度二维空间中的复声压实部起伏特征. 由垂直波数与波导深度的关系可引出波导深度与声源深度、接收深度的关系式. 将 (5) 式代入 (6) 式有

$$T_{\text{Re}}(r, z_s, z_r) = \left| \sum_{m=1}^M k_{zm} \cos \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{D} \cdot z_s \right] \sin \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{D} \cdot z_r \right] \frac{\sin(k_{rm}r - \pi/4)}{\sqrt{k_{rm}r}} \right|$$

$$= \left| \sum_{m=1}^M k_{zm} \cos \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{D} \cdot (D + z_s - D) \right] \sin \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{D} \cdot (D + z_r - D) \right] \frac{\sin(k_{rm}r - \pi/4)}{\sqrt{k_{rm}r}} \right|, \quad (11)$$

其中余弦项可推导为

$$\cos \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{D} \cdot (D + z_s - D) \right] = \pm \cos \left[\frac{\pi}{2} - \left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{D} (z_s - D) \right] = \mp \sin[k_{zm}(D - z_s)]. \quad (12)$$

同理, 正弦项为

$$\sin \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{D} \cdot (D + z_r - D) \right] = \mp \cos[k_{zm}(D - z_r)]. \quad (13)$$

将 (12) 式、(13) 式代入 (11) 式后有

$$T_{\text{Re}}(r, z_s, z_r) = \left| \sum_{m=1}^M k_{zm} \sin[k_{zm}(D - z_s)] \cos[k_{zm}(D - z_r)] \frac{\sin(k_{rm}r - \pi/4)}{\sqrt{k_{rm}r}} \right|. \quad (14)$$

整理 (6) 式、(14) 式后可得如下等式:

$$T_{\text{Re}}(r, z_s, z_r) = T_{\text{Re}}(r, D - z_r, D - z_s). \quad (15)$$

(15) 式在二维空间中表现为“对称性”纹理. 纹理特征可分为低阶模态、高阶模态的两种类型:

1) 当声源激发较低模态时, 空间中复声压实部的起伏有

$$T_{\text{Re}}(r, 0, \hat{z}_r) = T_{\text{Re}}(r, D - \hat{z}_r, D). \quad (16)$$

(16) 式说明, 在非最佳接收深度 D 上, 深度为 $D - \hat{z}_r$ 的声源复声压实部的起伏程度较大, 使得其在水面、水下的差异逆转. 因此, 预报复声压实部的最佳接收深度 \hat{z}_r 是必要的.

2) 当声源激发较高阶模态时, 空间中复声压实部的起伏变为

$$T_{\text{Re}}[r, Z_e(M, l), \hat{z}_r] = T_{\text{Re}}[r, D - \hat{z}_r, D - Z_e(M, l)]. \quad (17)$$

(17) 式说明, 由于“对称性”的存在, 复声压实部在 $Z_e(M, l)$ 处与 $D - \hat{z}_r$ 处存在相同的强起伏性. 此时, 复声压实部的强起伏特征广泛分布于空间中, 从而严重破坏了水面、水下的特征差异.

本节分析结果表明, 复声压实部的起伏差异是由水面、水下各阶模态相互作用性质的不同引起的. 利用复声压实部分辨水面、水下目标时, 不仅要求接收点位于最佳接收深度, 还要求声源在波导中仅激发几阶模态.

2.3 声功率的起伏分析

声功率 P 等于复声压与其共轭的乘积, 即 $P = pp^*$, 将 (1) 式代入有

$$P(r, z_s, z_r) = \left| \sum_{m=1}^M \sin(k_{zm}z_s) \sin(k_{zm}z_r) \frac{ie^{i(k_{rm}r - \pi/4)}}{\sqrt{k_{rm}r}} \right|^2$$

$$= \left| \sum_{m=1}^M A_m e^{ik_{rm}r} \right|^2 = \left[\sum_{m=1}^M A_m^2 + 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n>m}^M A_m A_n \cos(\Delta k_{mn}r) \right], \quad (18)$$

式中,

$$\Delta k_{mn} = k_{rm} - k_{rn}, \quad (19)$$

$$A_m = \frac{\sin(k_{zm}z_s)\sin(k_{zm}z_r)}{\sqrt{k_{rm}r}}. \quad (20)$$

在波导深度范围内, 各声源深度点上声源深度起伏引起的声功率起伏程度 (记为 T_{In}) 可由 (18) 式关于声源深度 z_s 的偏导的绝对值描述:

$$\begin{aligned} T_{\text{In}}(r, z_s, z_r) &= \left| \frac{\partial P(r, z_s)}{\partial z_s} \right| \\ &= \left| \sum_{m=1}^M 2A_m A'_m + 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n>m}^M (A'_m A_n + A_m A'_n) \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\Delta k_{mn}r) \right| = |T_1 + T_2|, \end{aligned} \quad (21)$$

式中, T_1 为在深度维振荡的非相干分量, 而 T_2 为简正波在水平距离 r 上的干涉分量. T_2 在深度维的变化与 T_1 类似. 在 (21) 式中, 前者可看作对后者起伏特征的补充. 但是, T_2 的水平距离分布特征较为复杂. 为简化分析, 此处仅分析非相干分量的深度分布特征, 将 (21) 式化为

$$\tilde{T}_{\text{In}}(r, z_s, z_r) = \left| \sum_{m=1}^M E_m \sin(2k_{zm}z_s) \right|. \quad (22)$$

当水平距离 r 恒定时, (22) 式为 $\sin(2k_{zm}z_s)$ 加权求和的绝对值, 加权系数为

$$E_m = k_{zm} \sin^2(k_{zm}z_r)/(k_{rm}r). \quad (23)$$

(23) 式的加权系数仍与声源频率、接收深度、水平距离相关, 并且总为正值. 同时, 相干项 T_2 也与以上三因素相关. 整体上, 声功率的起伏特征也会受到它们的影响. 这种影响将在第 3 节仿真结果中具体说明.

当 $z_s = 0$ 时, $T_{\text{In}}(r, 0, z_r) = 0$, 即水面声功率的起伏极弱, 并且在接收深度-声源深度二维空间中, 近水面声功率的起伏程度均是极小的. 如果 $z_s \in [h_s, D]$, 且 $\tilde{T}_{\text{In}}(r, z_s, z_r) > 0$, 则声功率在水面弱起伏而在水下强起伏的特征差异可以为目标判别提供依据.

我们仍考虑模态均匀加权求和的简单情形. 由 (22) 式, 可将 2.2 节中定义的零值点、最值点改写为

$$\begin{cases} z_0(m, l) = \frac{(l-1)\pi}{2k_{zm}} = \frac{(l-1)D}{2m-1}, \quad l = 1, 2, \dots, \\ z_e(m, l) = \left(l - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{2k_{zm}} = \left(l - \frac{1}{2}\right) \frac{D}{2m-1}, \\ l = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (24)$$

其中 $z_0(m, l)$ 总小于 $z_e(m, l)$.

下文将从声源激发的模态阶数入手, 分三点讨论水下声功率是否具有强起伏性.

1) 当声源激发 1 阶模态时, 第 m 项正弦的零值点 $z_0(1, 1)$ 与 $z_0(1, 2)$ 分别为 0, D , 唯一的极大值点 $z_e(1, 1)$ 为 $D/2$. 此外, $\tilde{T}_{\text{In}}(r, z_s, z_r)$ 在 $z_e(1, 1)$ 两侧是对称的, 即声功率在近水面、近海底深度上具有相同的弱起伏特征. 因此, 依靠声功率的起伏差异仅能区分浅于临界深度 h_s 的水面目标与位于 $[h_s, D - h_s]$ 的水下目标.

2) 当声源激发 2 阶模态时, 除海面、海底的零值点外, 新增的零值点为 $z_0(2, 2) = D/3$ 与 $z_0(2, 3) = 2D/3$, 新增的极大值点为 $z_e(2, 1) = D/6$ 与 $z_e(2, 3) = 5D/6$, 新增的极小值点为 $z_e(2, 2) = D/2$. 同 2.2 节类似, $\tilde{T}_{\text{In}}(r, z_s, z_r)$ 的零值点 $Z_0(2, 2)$, $Z_0(2, 3)$ 分别出现在区间 $[z_0(2, 2), z_e(2, 2)]$ 与区间 $[z_e(2, 2), z_0(2, 3)]$. 由于正弦项的异号叠加, 极大值 $\tilde{T}_{\text{In}}(r, z_e(2, 2), z_r)$ 较小. 此时, 声功率起伏较强的深度区间变为 $[h_s, Z_0(2, 2) - h_s] \cup [Z_0(2, 3) + h_s, D - h_s]$, 而在其他深度上, 水下声功率的弱起伏性与水面并无显著差异.

3) 当声源激发更高阶模态时, 强起伏的声功率出现的深度区间为

$$[h_s, Z_0(M, 2) - h_s] \cup [D - Z_0(M, 2) + h_s, D - h_s]. \quad (25)$$

高阶模态时, 水面声功率的起伏可能增强, 是因为当高阶模态使得 $Z_0(M, 2)$ 浅于人为划定的临界深度 h_s 时, 位于 $Z_e(M, 1)$ 上的水面目标声功率的起伏程度较大. 此时, 水面线谱声功率的起伏与位于 (25) 式深度区间中的水下线谱声功率的起伏并无显著差异, 却显著强于其他深度上声功率的起伏.

综合以上三点可知, 当声源深度起伏时, 水面、水下的线谱目标声功率的起伏程度既可能同样小, 又可能同样大, 还可能一大一小. 并且, 由于 (23) 式中均正的加权系数, 上述声功率起伏特征总是存在的. 然而, 在二维空间中改变接收深度无法凸显第三种特征而抑制前两种特征. 因此, 难以直接将声功率起伏量用于水面、水下目标判别.

2.4 声压幅值的起伏分析

声压幅值可表示为声功率的开平方, 即 $|p| = \sqrt{P}$. 忽略简正波水平干涉项后, 声源深度起伏引起的声压幅值起伏程度 (记为 T_{Am}) 可由声功率开

平方项关于声源深度 z_s 的偏导量的绝对值描述:

$$T_{Am}(r, z_s, z_r) = \left| \frac{\partial \tilde{P}^{1/2}(r, z_s, z_r)}{\partial z_s} \right| = \frac{|\partial \tilde{P}(r, z_s, z_r)/\partial z_s|}{2\tilde{P}^{1/2}(r, z_s, z_r)}. \quad (26)$$

(26) 式的具体形式是十分复杂的, 但是借助已分析物理量的起伏特征描述声压幅值的起伏特征, 可以避免对复杂分式的分析. 借助声功率的起伏特征将 (26) 式改写为

$$T_{Am}(r, z_s, z_r) = \frac{\tilde{T}_{ln}(r, z_s, z_r)}{2\tilde{P}^{1/2}(r, z_s, z_r)}. \quad (27)$$

该式揭示了声压幅值起伏特征与声功率起伏特征间存在的联系, 式中分母的声压幅值与声功率的分布规律是一致的. 因此, 除 $z_s = 0$ 时的 (27) 式为 0/0 型函数需要特别讨论外, $T_{Am}(r, z_s, z_r)$ 的零值点与最值点应当与 $\tilde{T}_{ln}(r, z_s, z_r)$ 完全相同. 这一特征有助于简化后续分析.

首先, 借助极限方法分析近水面的声压幅值起伏特征. 一般情况下, 近水面的模态函数总是同号的. 又根据无穷小关系, 声压幅值的偏导数在 $z_s \rightarrow 0$ 的极限值可写为

$$\lim_{z_s \rightarrow 0} \frac{\partial |p(r, z_s, z_r)|}{\partial z_s} = \lim_{z_s \rightarrow 0} \frac{\sum_{m=1}^M A_m A'_m}{\sqrt{\sum_{m=1}^M A_m^2}} \geq \lim_{z_s \rightarrow 0} \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M A_m^2 A_m'^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M A_m^2}} = \lim_{z_s \rightarrow 0} \sqrt{\sum_{m=1}^M A_m'^2}. \quad (28)$$

(28) 式说明, 在水面处较弱的声功率起伏特征得到了增强, 即声压幅值在水面处的起伏较强. 但是, 由于声压幅值与声功率之间存在的联系, 声压幅值的起伏特征依然受到声源频率、声源水平距离、接收深度的影响.

当声源深度深于临界深度时, 分析其声压幅值的起伏特征. 此时, 借助柯西·施瓦茨不等式, 可发现 (27) 式表示的声压幅值起伏特征满足如下关系:

$$T_{Am}(r, z_s, \hat{z}_r) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M A_m A'_m \right|}{\sqrt{\sum_{m=1}^M A_m^2}} \leq \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M A_m^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M A_m'^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M A_m^2}} = \sqrt{\sum_{m=1}^M A_m'^2}. \quad (29)$$

比较 (28) 式、(29) 式可知, 最佳接收深度获取的水下声压幅值的起伏总弱于水面声压幅值的起伏. 因此, 声压幅值的起伏量可以作为判别目标深度属性的依据. 由于声压幅值与声功率之间存在的联系, 获取水面与水下声压幅值的起伏特征差异依然将存在一个最佳深度. 2.2 节、2.3 节分析了临界深度与模态阶数的关系. 简言之, 当模态阶数逐渐增大时, 具有强起伏的声压幅值深度范围将缩小. 此时, 利用声压幅值起伏的目标判别方法的有效性将逐渐降低.

在接收深度-声源深度的二维空间中, 相比复声压实部, 声压幅值的起伏特征不存在对称性; 相比声功率, 声压幅值的强起伏特征在水下声源处得到了有效抑制, 弱起伏特征又在水面声源处得到了显著增强. 这使得声压幅值的起伏具有较稳定的水面、水下特征差异, 且更适合表征频率较高的低频

线谱的起伏特征. 综上, 声压幅值更适合用于构建深度属性判别特征量.

3 仿真实验与分析

本节仿真环境及参数如图 3 所示, 声源在该波导环境中激发的模态函数是正弦型的. 本节将利用方差与归一化特征量代替导数衡量仿真环境中声源深度起伏引起的线谱起伏的程度. 其中, 方差验证理论推导的合理性, 归一化特征量验证深度属性判别的可行性. 本节中, 接收点处的声压场是由 Kraken 程序计算的, 归一化特征量写为

$$A_{-1,z} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^{-z} \right)^{-1/z}}, \quad (30)$$

其中 X_i 表示声场程序计算的第 i 帧数据; z 代表特征量阶数. 阶数 z 仅与特征量的量级呈正相关, 而不影响特征量在不同深度的分布特征. Wagstaff^[20] 选取了 4 阶特征量用于目标深度属性判别, 本节的仿真也将采用这一阶数. 归一化特征量与声源级无关, 能够反映一组数据的离散程度. 离散程度较小的数据产生的归一化特征量趋近于 1, 反之则大于 1.

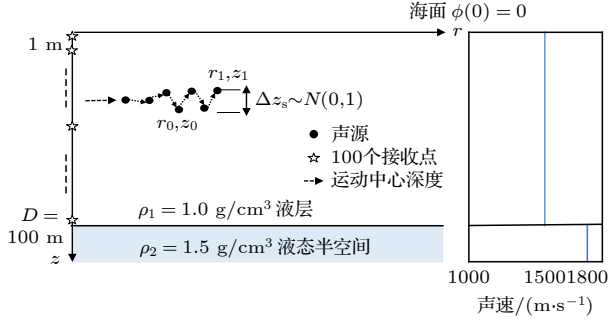


图 3 仿真环境

Fig. 3. Simulation environment.

3.1 固定接收深度时线谱起伏特征的仿真验证

单次实验中设置的参数如图 3 以及表 1 所列. 本节在不同的声源深度上各进行了 100 次蒙特卡罗实验. 对 100 次实验中统计的两种声源级的线谱强度方差计算了平均值, 平均值由图 4 给出.

表 1 仿真用接收点-声源参数
Table 1. Parameters for simulation.

参数	数值
接收深度/m	35
声源频率/Hz	30
声源级/dB	184, 194
声源运动中心深度/m	[2:1:98]
声源水平距离/km	5
声源激发模态阶数	3
声源深度起伏次数	100

注: [2:1:98] 表示深度的变化区间, 从 2 m 到 98 m 每间隔 1 m 取一个深度点

图 4 中, 复声压实部、声功率与声压幅值起伏的深度特征与第 2 节的分析结果相符. 首先, 图 4(a) 中的方差最大值 0.0167 出现在水面处的复声压实部与声压幅值曲线, 而图 4(b) 中的方差 7.765 最大值出现在 17 m 的声功率曲线. 在 184 dB 的声压幅值起伏特征曲线中, 若判别准则为方差大于 0.01 的声压幅值视作水面声源, 小于 0.01 的声压幅值视作水下声源, 那么声源级为 194 dB 的目标将被判定为水面目标. 可知, 方差统计量不能消除

声源级的影响, 使得声源级不同的声源的线谱起伏程度也不同. 在依据线谱起伏特征设计深度属性判别特征量时, 应当消除声源级的影响.

其次, 讨论声源级不变时三种物理量起伏的深度特征. 图 4(a) 中, 小于 40 m 时复声压实部与声压幅值的起伏特征曲线几乎吻合, 二者均呈现水面起伏高于水下的特征差异. 大于 40 m 时复声压实部与声压幅值的起伏特征曲线存在起伏, 分别在 64 m 达到峰值 0.008, 在 61 m 达到峰值 0.007. 可知, 由于模态间的抑制作用, 水下复声压实部与声压幅值的起伏程度在较小的水平上振荡, 弱于水面处模态“共振”引起的线谱强起伏. 图 4(b) 中, 水面、35 m 和 77 m 以下深度的声功率方差极小, 而 17 m 和 53 m 附近的声功率方差达到了峰值. 可知, 相同声源级时, 水面与水下声功率既可能存在相同的弱起伏性, 又可能存在起伏差异. 此时, 声功率的方差不适合用于目标深度属性判别.

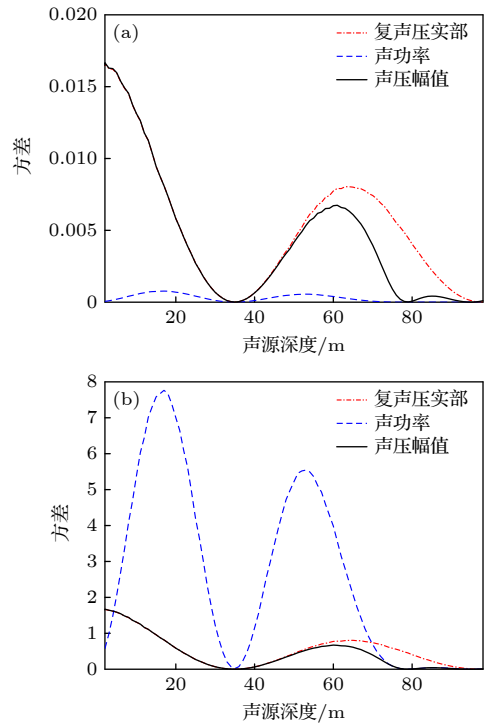


图 4 接收深度 35 m 时的线谱起伏特征 (a) 184 dB 声源; (b) 194 dB 声源

Fig. 4. Characteristic of fluctuation received by a 35 m hydrophone: (a) 184 dB source; (b) 194 dB source.

3.2 接收深度变化时线谱起伏特征的仿真验证

本节将接收深度由 3.1 节的固定值变为图 3 所示的 1—100 m 区间, 间隔 1 m, 选取 194 dB 声

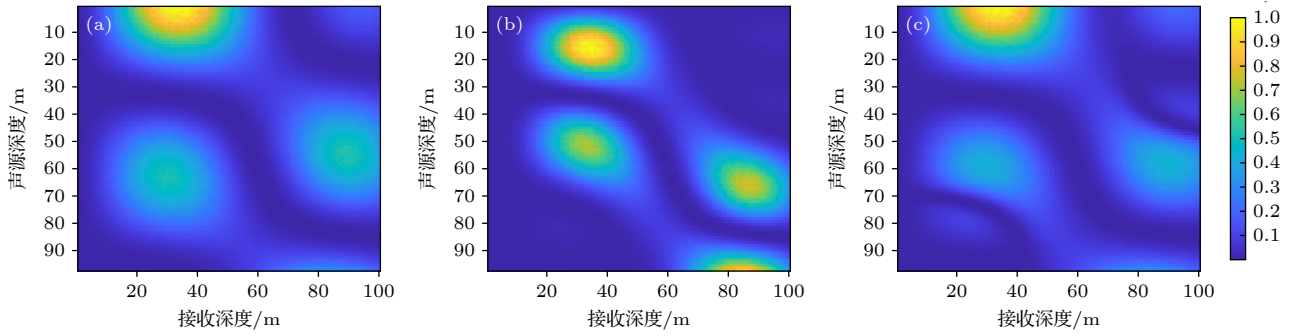


图 5 接收深度-声源深度维 5 km 处的 30 Hz 线谱起伏特征 (a) 复声压实部; (b) 声功率; (c) 声压幅值

Fig. 5. Characteristic of 30 Hz source's intensity fluctuation in the receiver-source depth dimension, source range 5 km: (a) Real part of the pressure field; (b) power; (c) amplitude.

源, 其他参数保持不变. 仿真分析接收深度-声源深度二维空间中的线谱起伏特征. 声源级不变时, 归一化方差的结果如图 5 所示. 当接收深度分别为 35 m 和 90 m 时, 将声场程序计算的模态函数幅值代入 (9) 式, 统计了 5 km 处复声压实部的模态加权系数符号, 结果由表 2 给出.

表 2 复声压实部的模态加权系数符号
Table 2. Sign of modal weighting coefficient.

接收深度/m	35	90
水平距离 5 km	---	-+-
水平距离 4 km	+ - +	+++

分析图 5(a) 与图 5(c) 中声源深度 0—10 m (近水面) 的接收深度维线谱起伏特征. 可知, 存在最佳接收深度区间, 此区间内接收信号的复声压实部的起伏与声压幅值的起伏显著强于其他深度. 本节中, 复声压实部起伏与声压幅值起伏的最佳接收深度区间均为 20—50 m. 这表明, 将接收阵置于该深度区间, 可以最大程度利用强度起伏进行目标深度属性判别.

分析图 5(b) 与图 5(c) 中 10—100 m (水下) 的二维线谱起伏特征. 可知, 声功率起伏特征与声压幅值起伏特征的轮廓是一致的. 但是, 声压幅值的归一化方差在 (50 m, 35 m) 与 (100 m, 80 m) 等坐标显著低于声功率的归一化方差约 0.4. 结合 2.4 节对水下声压幅值的起伏分析可知, 以上坐标出现该现象的原因是强起伏的声功率被声压幅值抑制. 同时, 在图 5(b) 中, 任意深度接收的声功率均不适合构建深度属性判别特征量. 例如, 35 m 接收的水面 18 m 目标声功率的强起伏显著区别于水下 40 m 目标声功率的弱起伏; 而当接收深度变为 90 m, 水面 18 m 目标声功率的弱起伏则显著区

别于水下 65 m 目标声功率的强起伏.

表 2 中, 模态加权系数与接收深度的关系在一定程度上验证了复声压实部起伏特征产生的物理机理, 即模态间的相互作用. 在最佳接收深度 35 m 处, 复声压实部具有同号的加权系数. 这使得最佳接收深度获取的水面、水下复声压实部起伏差异较显著 (见图 5(a)、图 5(c)). 在 90 m 的深度上, 复声压实部的加权系数出现了异号. 这使得水面、水下的线谱起伏差异不再明显. 结合第 2 节分析与本节仿真结果可知, 当声源深度起伏时, 水面模态的“共振”引起了强起伏的复声压实部, 水下模态的抵消作用导致了起伏相对弱的复声压实部. 接收深度影响着模态间相互作用的性质.

3.3 声源水平距离变化时线谱起伏特征的仿真验证

在 3.2 节仿真参数的基础上, 将声源位置移动到距接收点 4 km 处, 以便分析线谱起伏特征与声源水平距离的关系. 当声源位于 5 km 与 4 km 时, 三种物理量的接收深度-声源深度维起伏特征分别由图 5、图 6 给出. 当接收深度分别为 35 m 和 90 m 时, 统计了 4 km 处复声压实部的模态加权系数符号, 结果由表 2 给出.

对比图 5、图 6 可知, 当声源水平距离改变时, 线谱起伏特征随之改变. 对于复声压实部而言, 水面、水下的起伏特征差异源自各阶模态的相互作用. 相互作用的性质又由接收深度、声源水平距离与声源频率决定. 当以上三种因素满足 (9) 式的模态加权系数同号时, 复声压实部的起伏具有水面显著强于水下的差异. 由表 2 可知, 5 km 复声压实部的最佳接收深度约为 35 m, 此时模态加权系数同

为负号; 4 km 复声压实部的最佳接收深度约为 90 m, 此时模态加权系数同为正号. 对于声功率与声压幅值而言, 其模态加权系数总是正值. 但是, 当声源水平距离改变时, 相干项对非相干项的贡献程度不同. 这导致声功率与声压幅值的起伏特征改变. 图 6 中, 4 km 处声压幅值起伏差异的最佳接收深度变为 90 m. 综上, 声源水平距离对单水听器接收的线谱起伏特征具有较明显的影响.

3.4 声源频率对线谱起伏的影响

在 3.2 节仿真参数的基础上, 仅改变声源频率以便分析线谱起伏特征与频率的关系. 实验目标的频率是在 25—55 Hz 内间隔 5 Hz 选取的. 为了直观地展现声源频率 (模态阶数) 对线谱起伏特征的影响, 本节在图 7、图 8 中分别给出了 4 阶模态 (40 Hz) 与 5 阶模态 (50 Hz) 时的二维强度归一化方差.

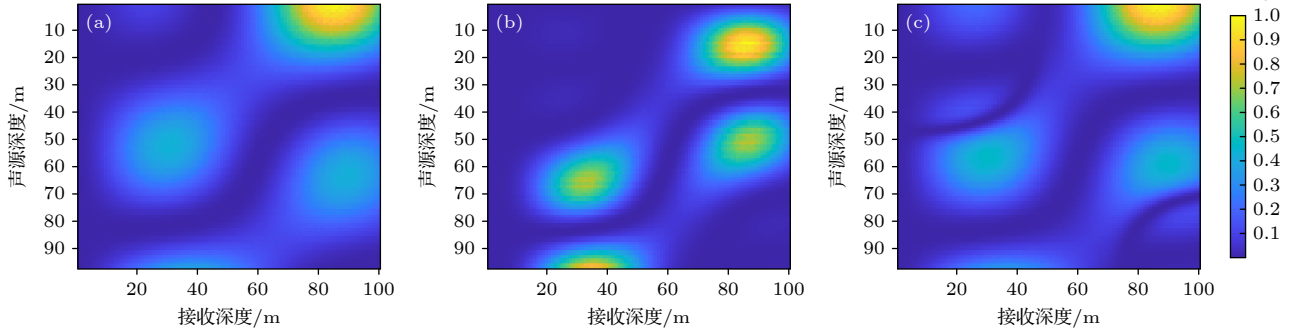


图 6 接收深度-声源深度维 4 km 处的 30 Hz 线谱起伏特征 (a) 复声压实部; (b) 声功率; (c) 声压幅值

Fig. 6. Characteristic of 30 Hz source's intensity fluctuation in the receiver-source depth dimension, source range 4 km: (a) Real part of the pressure field; (b) sound power; (c) amplitude of sound pressure.

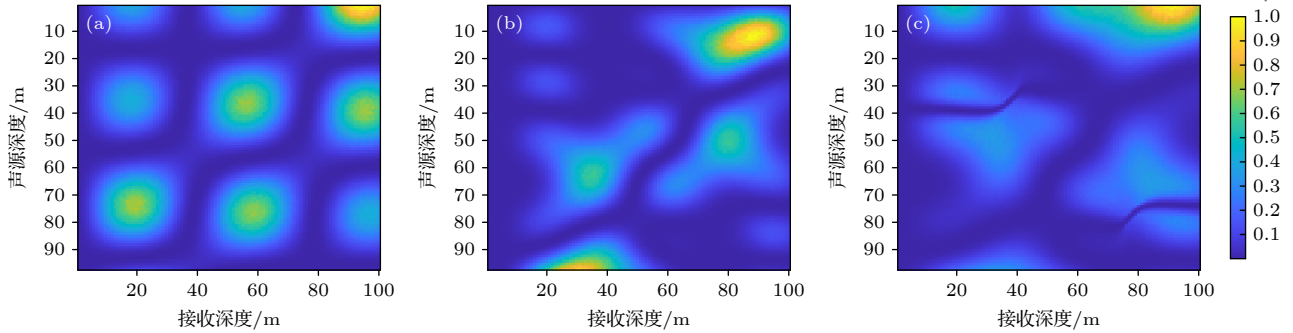


图 7 接收深度-声源深度维 40 Hz 线谱起伏特征 (a) 复声压实部; (b) 声功率; (c) 声压幅值

Fig. 7. Characteristic of 40 Hz source's intensity fluctuation in the receiver-source depth dimension: (a) Real part of the pressure field; (b) sound power; (c) amplitude of sound pressure.

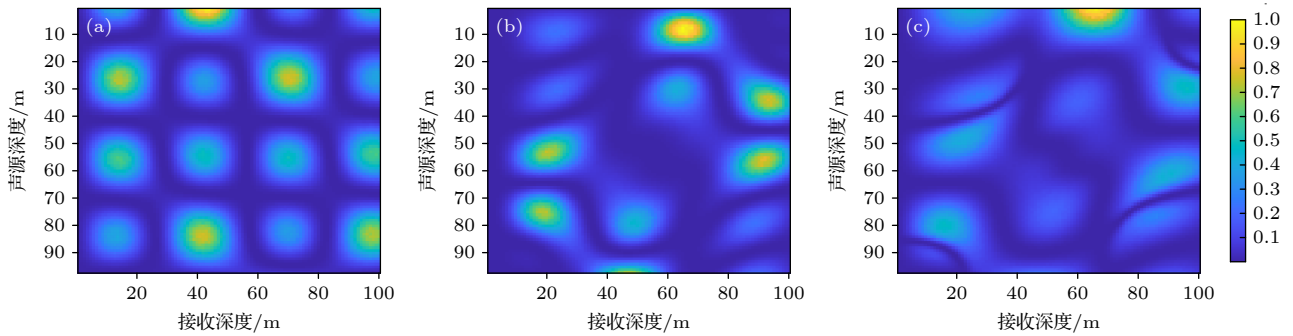


图 8 接收深度-声源深度维 50 Hz 线谱起伏特征 (a) 复声压实部; (b) 声功率; (c) 声压幅值

Fig. 8. Characteristic of 50 Hz source's intensity fluctuation in the receiver-source depth dimension: (a) Real part of the pressure field; (b) sound power; (c) amplitude of sound pressure.

本节在图 9 中展示了门限方差分别为 0.8 与 0.6 的两个例子, 并统计所有实验目标的声压幅值起伏特征的最深临界深度, 说明了门限值与最深临界深度的关系.

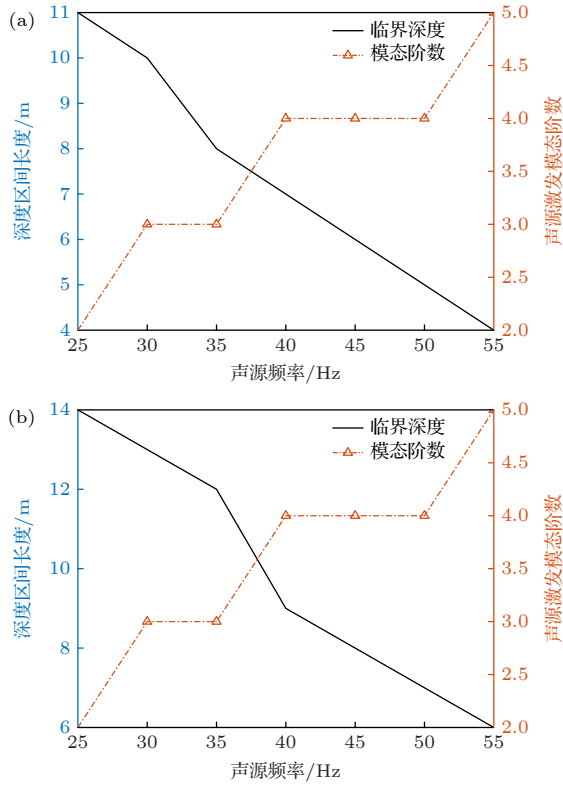


图 9 声源频率 (模态阶数) 与临界深度的关系 (a) 方差 0.8; (b) 方差 0.6

Fig. 9. Relationship between the signal frequency (order of excited modal) and the critical depth: (a) Variance 0.8; (b) variance 0.6.

当声源位于水面时, 频率的改变导致获取声压幅值与复声压实部起伏特征的最佳接收深度改变. 第 2 节的分析说明了这一现象. 声源频率改变时, 影响物理量起伏特征的加权系数与相干项贡献程度随之改变, 从而改变了最佳接收深度的位置. 不同频率的线谱起伏特征呈现出如图 7、图 8 的纹理差异.

比较图 7、图 8 中复声压实部与声压幅值的起伏特征可知, 当声源激发的模态数增加时, 利用复声压实部构建特征量的缺点相对声压幅值来说是显然的. 具体而言: 1) 接收深度为 60 m 时, 40 Hz 线谱复声压实部的归一化方差在 35, 80 m 处均超过 0.6; 2) 接收深度为 40 m 时, 50 Hz 线谱复声压实部的归一化方差在 80 m 时达到了 0.8. 以上两种现象均代表了水下声源的复声压实部具有强起伏性. 2.2 节的分析解释了这一现象: 1) 高阶模态

时, 较深深度上复声压实部偏导数绝对值显著增大; 2) 复声压实部偏导数的“对称性”使强起伏特征在二维空间中广泛分布. 与此相反, 图 7(c)、图 8(c) 中较深的声压幅值方差均低于 0.6, 即水下声压幅值的起伏在高阶时仍保持较弱水平.

图 9 说明, 虽然声压幅值在不同深度的起伏差异能够解决目标深度属性判别问题, 但其作为特征量更适合判别低频目标的深度属性. 声压幅值强、弱起伏的最深临界深度与声源频率、模态阶数呈负相关. 图 9(a) 中, 当门限为方差 0.8 时, 若以 10 m 作为分辨常见水面、水下目标的临界深度, 则声呐能分辨 30 Hz 以下目标的深度属性; 不改变门限值, 若临界深度为 5 m, 则声呐能进一步分辨 50 Hz 以下目标的深度属性. 图 9(b) 中, 当门限宽容至方差 0.6, 上述 10 m 与 5 m 的临界深度分别适合于 40 Hz 以下与 55 Hz 以下目标深度属性的划分. 事实上, 100 Hz 以下的低频线谱噪声是舰船辐射噪声的重要组成部分. 因此, 声压幅值的起伏量可以为判别水面或水下的舰船目标提供依据.

3.5 归一化深度属性判别特征量的深度分布特征

本节设置分别为 35 m 与 90 m 的水听器接收深度, 对比了 30 Hz 声压幅值的方差与归一化深度属性判别特征量的深度分布特征. 其中, 35 m 代表获取水面、水下声压幅值起伏差异的最佳接收深度, 而 90 m 获取的水面声压幅值起伏较弱. 为较直观地比较方差与归一化特征量之间的联系, 将方差与 (30) 式减 1 后的结果分别取对数, 结果如图 10 所示.

从图 10 可知, 归一化特征量能够反映水面、水下声压幅值起伏的差异性特征. 当声源位于 20 m 以下深度时, 归一化特征量与方差的深度分布特征大致相同. 图 10(a) 中, 35 m 水听器获取的声压幅值归一化特征量在 70 m 出现峰值 -19.76 dB, 在 11 m 处为 -19.23 dB; 图 10(b) 中, 90 m 水听器获取的声压幅值归一化特征量在 52 m 出现峰值 -18.62 dB, 在 10 m 处为 -19.07 dB. 当声源位于 20 m 以上深度时, 归一化特征量存在明显的提高. 可知, 归一化特征量可以用于目标深度属性判别, 并且, 其深度分布特征与理论分析的声压幅值起伏特征类似. 因此, 第 2 节对声源深度起伏引起的线谱起伏进行理论分析具有实际意义.

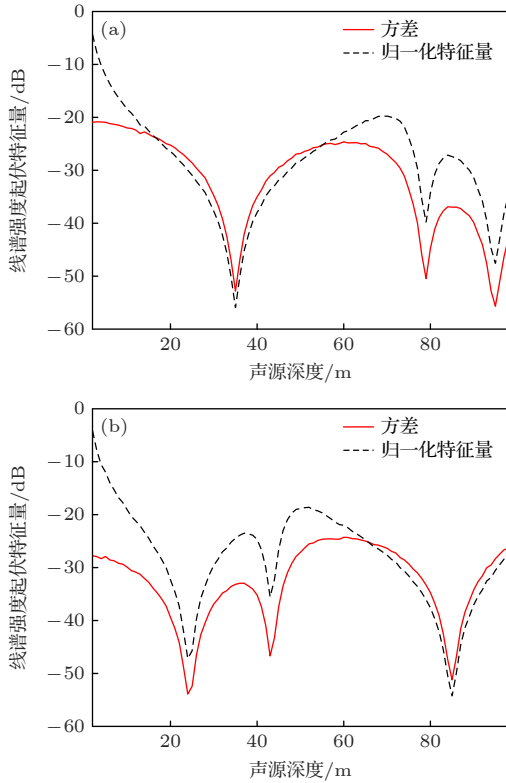


图 10 30 Hz 线谱声压幅值方差与归一化特征量的对比 (a) 接收深度 35 m; (b) 接收深度 90 m

Fig. 10. Contrast of 30 Hz amplitude variance and normalized quantity: (a) Received by 35 m hydrophone; (b) received by 90 m hydrophone.

3.6 声源水平运动时深度属性判别特征量的深度分布特征

以上讨论均假设声源相对于水听器的水平距离不变. 实际中, 声源深度的起伏往往是在声源运动时发生的, 即声源水平距离和深度同时变化. 这将导致距离维上声场干涉结构引起的线谱起伏量叠加在声源深度起伏引起的线谱起伏量上. 但是, 本文所研究的判别特征量所需的累积时间明显小于形成声场稳定干涉结构的时间. 因此, 从理论上而言, 本文所研究的判别特征量在较小的累积时间下受声源水平距离变化的影响较小.

为了定量分析目标水平距离变化所带来的影响, 本节分析了声源水平运动时深度属性判别特征量的深度分布特征. 本节设置了 35 m 的单水听器接收深度, 声源频率 30 Hz, 仿真对比了声源水平距离固定、运动 5, 10, 20, 30 m 时的归一化特征量. 声源每移动 1 m, 深度便起伏一次. 其中, 声源深度起伏量同表 1 参数. (30) 式中的特征量减 1 取对数后的结果由图 11 给出.

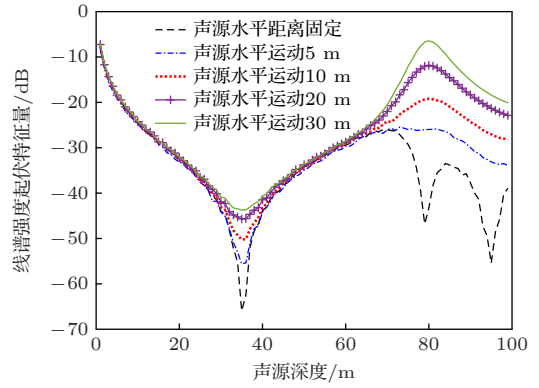


图 11 声源水平运动距离对线谱起伏特征量的影响

Fig. 11. Influence of source moving on the normalized quantity.

从图 11 可知, 声源水平运动时, 其深度起伏引起的线谱强度起伏特征量曲线与声源水平距离固定时的特征量曲线部分类似. 在声源深度 70 m 以浅的范围内, 特征量曲线大部分相似, 但是在接收水听器深度所在的 35 m 附近出现了凹槽, 且凹槽深度与声源水平运动距离成反比; 在声源深度 70 m 以深的范围内, 水平距离固定时的特征量曲线低于水平距离变化时的特征量曲线, 且具有周期震荡变化结构. 同时, 随着声源水平运动距离的增加, 线谱起伏特征量有所增大. 具体而言, 当声源水平运动距离从 5 m 增加到 30 m 时, 声源在 70 m 以深范围内所形成的起伏特征量最大值分别约为 -26, -19, -12 和 -6 dB. 上述定量分析结果表明, 当声源水平运动时, 其深度起伏引起的线谱起伏特征与固定水平距离的线谱起伏特征相似, 表明此时的线谱起伏也与 3.2 节、3.3 节、3.4 节中分析的接收深度、声源水平距离、声源频率等因素密切相关. 同时, 长时间累积有可能导致判别特征量值增加, 从而弱化水面目标线谱强度起伏与水下目标线谱强度起伏之间的差异性. 综上所述, 本文所研究的判别特征量本质上属于一种快变量. 在使用时, 需要限制累积时间以便获得期望的深度属性判别性能.

4 试验数据分析验证

4.1 试验数据预处理

海试数据采用 SWellEx-96 浅海水声试验^[24]数据. 本节提取试验中 S5 事件中垂直阵的部分接收数据用于验证理论推导结果与仿真实验结果.

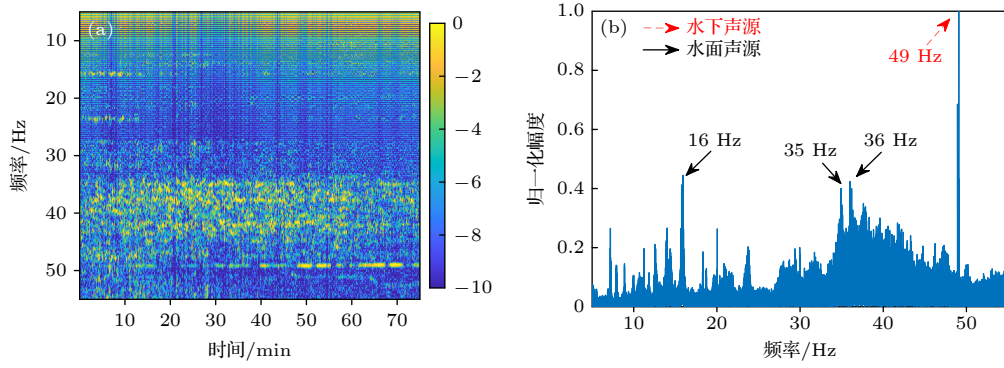


图 12 接收数据频谱分析 (a) 时频图; (b) 频谱归一化幅值

Fig. 12. Spectral analysis of received data: (a) Time-frequency image; (b) normalized amplitude.

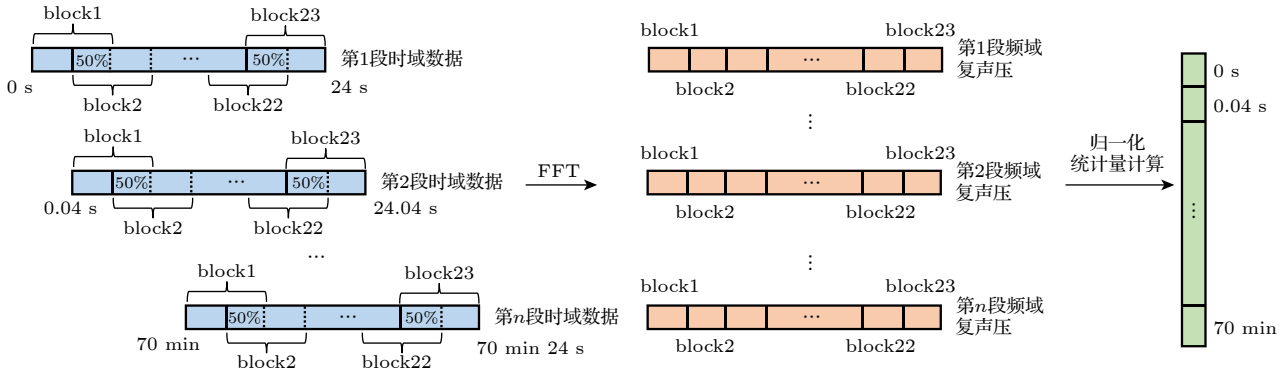


图 13 试验数据处理流程

Fig. 13. Flow of data processing.

根据 3.3 节结论, 仅提取垂直阵接收的低频段 (5—55 Hz) 噪声用于验证. 该事件中目标线谱强度整体较小. 为了选取合适的线谱作为数据样本, 此处对全部垂直阵阵元数据进行求和平均. 图 12(b) 中存在若干线谱成分. 除已知的 49 Hz 水下拖曳源外, 15—50 Hz 内存在线谱叠加连续谱噪声, 这符合低频段的舰船辐射噪声特征^[25]. 本节选取水面较强的 16, 35, 36 Hz 线谱与水下 49 Hz 线谱作为试验对象.

图 13 给出了线谱强度起伏特征验证的基本流程. 本节采用统计方法, 即平均所有阵元接收的线谱声压幅值的 4 阶归一化特征量, 表征线谱的起伏程度. 依据时频分析结果, 我们得出了存在较稳定线谱信号的时间段. 待处理样本由表 3 给出.

表 3 待分析样本

Table 3. Samples to be analyzed.

声源深度属性	水面				水下			
声源频率/Hz	16	35	35	36	36	49	49	
起始时刻/min	6.6	26.2	28.8	30.2	9.2	19.4	52	60
结束时刻/min	10.6	26.8	28.8	30.4	9.6	20	53.6	61.4

4.2 声压幅值的归一化特征量处理结果

图 14 中, 水面、水下声压幅值的归一化特征值存在显著差异. 在数据样本中, 水面声压幅值的归一化特征量最小值为 16 Hz 时的 1.0675, 而最大值为 36 Hz 时的 9.02; 水下 49 Hz 声压幅值的归一化特征量最大值为 1.1387, 最小值为 1.0495. 平均而言, 水下 49 Hz 声压幅值的归一化特征量仅有 1.0754, 而水面 16, 35, 36 Hz 声压幅值的归一化特征量分别达到了 1.5626, 3.0528, 3.5928. 从数据处理结果可知, 归一化特征量表征的水面与水下线谱

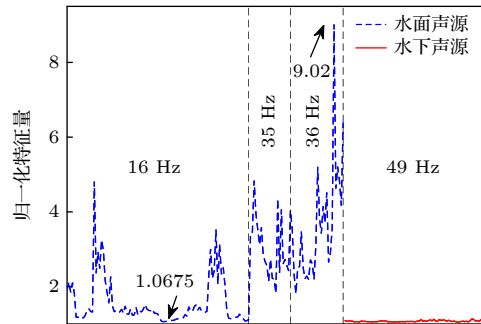


图 14 声压幅值的归一化特征量

Fig. 14. Normalized quantity of amplitude in SWellEx-96.

声压幅值具有差异性特征, 可以为目标深度属性判别提供依据.

5 总 结

本文从声源深度起伏所导致的线谱起伏出发, 利用微分方法推导了浅海环境中线谱复声压实部、声功率、声压幅值三种物理量随声源深度的导数分布规律, 得出了线谱起伏特征的物理机理, 总结出适合表征线谱起伏的物理量, 并利用仿真数据与海试数据进行了验证. 全文结论如下.

1) 从物理层面而言, 当声源的深度起伏时, 水面、水下线谱的起伏差异源自声源激发各阶模态的相互作用. 声源频率、声源接收相对水平距离、接收深度决定了模态间相互作用的性质. 在最佳接收深度上, 当加权系数同号时, 水面均处于过零点的模态“共振”产生了具有强起伏的复声压实部; 水下存在极值点的模态相互抵消, 从而产生了弱起伏的复声压实部.

2) 对于声源级相同的声源, 其深度起伏时, 水面声功率的起伏总是弱的, 而水下声功率的强、弱起伏特征交替分布. 这导致利用声功率起伏特征难以获得稳定的水面、水下深度属性判别性能.

3) 声压幅值起伏量适合用于构建深度属性判别特征量. 在最佳接收深度上, 水面声源的声压幅值强起伏性是声功率起伏增强的结果, 而水下声源的声压幅值弱起伏性是声功率起伏得到抑制的结果. 仿真数据与海试数据处理结果表明, 利用声压幅值构建的归一化特征量可以为低频线谱目标深度属性判别提供依据.

本文尚未对影响线谱起伏特征的复杂波导因素进行详细分析. 在本文分析的基础上, 如何降低声源水平距离与接收深度因素对线谱起伏特征的影响有待进一步研究.

参考文献

- [1] Yu Y, Hui J Y, Chen Y, Sun G C, Teng C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6335 (in Chinese) [余贇, 惠俊英, 陈阳, 孙国仓, 滕超 2009 物理学报 **58** 6335]
- [2] Liu Z T, Guo L H, Yan C 2019 *Acta Acust.* **44** 28 (in Chinese) [刘志韬, 郭良浩, 闫超 2019 声学学报 **44** 28]
- [3] Yang T C 2015 *J. Acoust. Soc. Am.* **138** 1678
- [4] Li X B, Sun C, Liu X H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 134302 (in Chinese) [李晓彬, 孙超, 刘雄厚 2022 物理学报 **71** 134302]
- [5] Urick R J 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 878
- [6] Gao D Z, Zhai L, Wang H Z, Gao B, Wang N 2017 *Acta Acust.* **42** 669 (in Chinese) [高大治, 翟林, 王好忠, 高博, 王宁 2017 声学学报 **42** 669]
- [7] Zhou J B, Piao S C, Liu Y Q, Zhu H H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 014301 [周建波, 朴胜春, 刘亚琴, 祝捍皓 2017 物理学报 **66** 014301]
- [8] Georges A D, Kevin B S, Mohsen B, James H M, Gopu R P 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **146** 1875
- [9] Li Q R, Sun C, Xie L 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 024302 (in Chinese) [李沁然, 孙超, 谢磊 2022 物理学报 **71** 024302]
- [10] He Z Y, Lei B, Yang Y X 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 144301 (in Chinese) [何兆阳, 雷波, 杨益新 2023 物理学报 **72** 144301]
- [11] Joseph A S 1961 *J. Acoust. Soc. Am.* **33** 239
- [12] Clay C S, Wang Y Y, Shang E C 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **77** 424
- [13] Jacob G 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **99** 3439
- [14] Jemmott C W, Culver R L 2011 *IEEE J. Oceanic Eng.* **36** 696
- [15] Premus V 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 2170
- [16] Xie Z C, Ge H L 2015 *Acoust. Electron. Eng.* **2015** 24 (in Chinese) [谢志诚, 葛辉良 2015 声学与电子工程 **2015** 24]
- [17] An L, Fang S L, Chen L J 2013 *Journal of Southeast University (English Edition)* **29** 235
- [18] Shi J J, Sun D J, Fu H L, Liu Q Y, Zhang W S 2019 *IET Radar Sonar Navig.* **13** 2151
- [19] Li X B, Sun C, Liu X H 2021 *OES China Ocean Acoustics (COA)* Harbin, China, 2021 p976
- [20] Wagstaff R A 1997 *IEEE J. Oceanic Eng.* **22** 110
- [21] Zhang L 2021 *M. S. Thesis* (Nanjing: Southeast University) (in Chinese) [张莉 2021 硕士学位论文 (南京: 东南大学)]
- [22] Yun Z Y 1965 *Acta Acust.* **2** 144 (in Chinese) [恽宗杨 1965 声学学报 **2** 144]
- [23] Bi X J 2019 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [毕雪洁 2019 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]
- [24] Marine Physical Lab <http://swellex96.ucsd.edu/> [2023-11-08]
- [25] Wang D Z, Shang E C 2013 *Hydroacoustics* (2nd Ed.) (Beijing: Science Press) pp345-352 (in Chinese) [汪德昭, 尚尔昌 2013 水声学 (第二版) (北京: 科学出版社) 第 345 页—352 页]

Analysis of line spectral fluctuation characteristics for source depth discrimination in shallow water^{*}

Deng Yu-Xin¹⁾²⁾ Liu Xiong-Hou^{1)2)†} Yang Yi-Xin¹⁾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 4 December 2023; revised manuscript received 15 May 2024)

Abstract

The difference in intensity fluctuation between a surface signal and a submerged signal can be used to discriminate the source depth in the shallow water waveguide. However, the properties of fluctuation distinction in intensity between surface source and submerge source are rarely studied, resulting in the poor performance of fluctuation-based methods sometimes. In this work, the intensity fluctuations caused by source depth fluctuations is analyzed by differential method and variance statistics method to figure out the physics of intensity fluctuations, and to present the suitable quantity for depth discrimination. Firstly, the derivative expression of real part, power and amplitude of the pressure field are respectively derived from the normal mode theory, hence their fluctuation quantities are specified. Then, the numerical examples, including the factor of receiver depth, source frequency and source range, are treated to verify the derivation and summarize the characteristic of fluctuations. The property of the intensity fluctuations is also compared with the distribution of normalized quantity on the depth dimension. Finally, the SWellEx-96 experimental data processing results validate the conclusions. The processing results of derivation, simulation data and experimental data show that the interactions between modes excited by the source give rise to the fluctuations. Meanwhile, the property of the interactions is affected by the received depth, source range and source frequency. Amplitude is capable of building a quantity based on fluctuations for source depth discrimination. For surface and submerged sources with lower frequency, their distinction in their fluctuations is stably represented by amplitude. In the SWellEx-96 experiment, the normalized values calculated from the amplitude of surface noise and submerged sound sources show the lowest difference of 0.5 and the highest difference of 2.5, indicating the effectiveness of using amplitude fluctuations to discriminate the sound source depth.

Keywords: intensity fluctuations, source depth discrimination, shallow water, normal mode

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d, 43.50.+y

DOI: 10.7498/aps.73.20231911

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U2341203, 12274346) and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFC1400200).

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

浅海环境中用于目标深度属性判别的线谱起伏特征量分析

邓玉鑫 刘雄厚 杨益新

Analysis of line spectral fluctuation characteristics for source depth discrimination in shallow water

Deng Yu-Xin Liu Xiong-Hou Yang Yi-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 134301 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231911

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231911>

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>

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>

浅海周期起伏海底环境下的声传播

Sound propagation in shallow water with periodic rough bottom

物理学报. 2021, 70(3): 034302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201233>

倾斜弹性海底条件下浅海声场的简正波相干耦合特性分析

Coherent mode coupling in shallow water overlaying sloping elastic ocean bottom

物理学报. 2021, 70(21): 214304 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211013>

浅海粗糙海底声散射建模及声场特性

Acoustic scattering modeling and sound field characteristics of rough seafloor in shallow sea

物理学报. 2024, 73(3): 034301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231472>

浅海内孤立波动态传播过程中声波模态强度起伏规律

Modal intensity fluctuation during dynamic propagation of internal solitary waves in shallow water

物理学报. 2022, 71(2): 024302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211132>