



浅海波导环境不确定性对声源功率估计的影响

张少东 孙超 谢磊 刘雄厚 王宣

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

Zhang Shao-Dong Sun Chao Xie Lei Liu Xiong-Hou Wang Xuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 244301 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210852

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210852>

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

## 浅海波导环境不确定性对声源功率估计的影响\*

张少东<sup>1)2)3)</sup> 孙超<sup>1)2)3)†</sup> 谢磊<sup>1)2)3)</sup> 刘雄厚<sup>1)2)3)</sup> 王宣<sup>1)2)3)</sup>

1) (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2) (海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室, 西安 710072)

3) (陕西省水下信息技术重点实验室, 西安 710072)

(2021年5月6日收到; 2021年6月29日收到修改稿)

匹配场声源功率估计方法解决了传统球面波或柱面波假设下的声源功率估计方法受浅海波导效应影响较大的问题, 但浅海波导环境不确定性会严重影响匹配场声源功率估计结果的准确性. 本文定义声源功率估计性能环境失配敏感度, 量化表示环境不确定时匹配场声源功率估计性能的损失, 推导了声源功率估计性能损失与信道传递函数估计偏差的关系, 利用信道传递函数估计值与理想值的模值偏差和夹角表示. 在此基础上, 研究了环境不确定性影响声源功率估计的机理, 以及海水深度、海水声速和沉积层声速变化对声源功率估计的影响程度. 研究表明, 不同环境参数变化对信道传递函数模值的影响均比较小, 声源功率估计性能下降的主要原因是信道传递函数估计值与理想值的夹角变化较大. 海水深度变化对功率估计结果的影响最为显著, 沉积层声速变化对功率估计结果的影响很小, 除海水深度外, 在高频段范围内海水声速变化对功率估计结果的影响较大.

**关键词:** 环境不确定性, 信道传递函数, 模态函数, 功率估计

**PACS:** 43.20.+g, 43.30.+m, 43.58.+z

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210852

## 1 引言

描述辐射声源级的基本物理量有很多, 包括总声源级、声源频带级、声源频谱级和功率谱密度, 其中通过辐射信号的功率谱密度可以得到其他物理量<sup>[1]</sup>, 而辐射信号的功率谱密度可由信号幅度计算得到. 业内学者针对声源功率估计问题做出许多研究, 传统单水听器声源功率估计方法<sup>[2-5]</sup>成本低廉且使用方便, 但对于低信噪比的情况无法获得有效的声源功率估计值; 为解决这一问题, 学者们提出使用垂直阵获得更高的信噪比, 从而改善声源功率的估计精度. 声源功率估计通常在浅海环境中进行, 然而, 常规声源功率估计方法是以球面波或柱面波假设为基础进行研究的, 以多径为主的浅海波导效应使得常规声源功率估计方法很难在实际海

洋环境中达到理想性能, 主要原因在于, 使用的声传播模型与实际浅海波导环境不符. 此外, 常规声源功率估计方法的思路有局限性, 常规声源功率估计方法从阵列接收信号功率出发, 只使用直达波估计声源功率, 估计结果很大程度上受限于接收阵列和具体的波束形成方法, 而声源辐射功率是声源的基本特征, 应与接收端的阵列和波束形成方法无关.

匹配场声源功率估计方法<sup>[6]</sup>充分考虑了实际海洋环境特性, 是一种更适合实际浅海波导环境的声源功率估计方法. 匹配场声源功率估计方法给出了更客观的声源辐射功率估计值, 与实际接收阵和波束形成方法无关. 匹配场<sup>[7]</sup>波束输出峰值处的自变量取值可以看作声源位置或环境参数的估计值, 这常被用于实现声源定位<sup>[8-10]</sup>或参数反演<sup>[11]</sup>; 向龙凤等<sup>[6,12]</sup>提出的匹配场声源功率估计方法利用匹配场波束输出峰值高度反映的目标能量信息, 结

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11974285) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: csun@nwpu.edu.cn

合水下声传播模型, 得到辐射声源到接收阵的信道传递函数, 用以描述声源辐射的能量从发射到接收的真实传播过程和能量损失; 据此建立接收阵辐射声信号模型, 结合统计信号处理理论推导得到声源功率理论最优估计方法. 匹配场声源功率估计方法计入了声源辐射的包括直达波和海底海面反射波在内的所有声源辐射能量, 用于估计声源功率, 并使用信道传递函数计算传播损失进一步修正, 以估计最真实的声源辐射功率. 然而, 实际信道传递函数无法获得, 只能将环境参数、被测声源位置和信号频率等参数输入声场软件计算得到实际信道传递函数的估计值; 在被测声源位置和信号频率已知时, 使用准确的环境参数获得准确的信道传递函数估计值, 从而确保匹配场声源功率估计结果的准确性. 由于海洋环境的时变性, 环境不确定性成为匹配场声源功率估计方法不可避免的问题.

业内学者针对环境不确定性对匹配场类方法的影响进行了大量研究<sup>[13,14]</sup>. Hamson 等<sup>[15]</sup>、Feuillade 等<sup>[16]</sup> 和赵航芳等<sup>[17]</sup> 先后研究了环境不确定性对匹配场定位结果的影响, 其中赵航芳等通过定义不确定情况下的定位偏差、不确定时与确定时模糊度表面主瓣峰值比和主瓣背景比等 3 个量化指标更全面地分析了宽带最小方差匹配场波束形成的环境失配灵敏度. 刘宗伟等<sup>[18]</sup> 针对环境不确定性对检测性能的影响进行研究, 定义了检测性能损失环境失配敏感度, 详细分析了检测性能损失随声源位置和声源频率的变化关系. 现有成果多关注环境不确定性对匹配场定位或检测性能的影响, 本文的目的在于研究环境不确定性对匹配场声源功率估计性能的影响, 并分析其物理机理.

首先使用简正波模型<sup>[19–22]</sup> 建立浅海波导环境中垂直阵接收信号模型, 并简要介绍声源功率估计的物理量和匹配场声源功率估计方法. 随后定义声源功率估计性能环境失配敏感度, 并分析环境不确定性影响声源功率估计的机理, 以及不同环境参数变化对声源功率估计的影响程度. 最后, 采用美国海军实验室 (naval research laboratory, NRL) 提供的 Benchmark<sup>[23]</sup> 标准浅海声速剖面 and 参数不确定范围仿真验证理论分析的结果.

## 2 匹配场声源功率估计方法

### 2.1 浅海波导环境接收信号模型

根据简正波理论, 浅海波导中位于  $r_0 = (0, z_s)$

的声源到接收阵元  $(r, z)$  处的信道传递函数  $g(r, z)$  可以表示为<sup>[24]</sup>

$$g(r, z) = \frac{ie^{-i\pi/4}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi}} \sum_{m=1}^M \Psi_m(z_s) \times \Psi_m(z) \frac{e^{i(k_{r_m} + i\alpha_m)r}}{\sqrt{k_{r_m}r}}, \quad (1)$$

式中,  $z_s$  为声源深度,  $z$  为接收阵元的深度,  $r$  为声源到接收阵元的水平距离;  $m$  为简正波阶数,  $M$  为被测声源激发的简正波总阶数;  $\alpha_m$ ,  $\Psi_m$  和  $k_{r_m}$  分别为第  $m$  阶简正波的吸收系数、模态函数和水平波数, 均与海洋环境参数和信号频率有关. 使用一个  $N$  元均匀垂直线列阵接收信号, 被测声源到每个阵元处的理想信道传递函数构成一个  $N \times 1$  维向量  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{H} = [g(r, z_1) \ g(r, z_2) \ g(r, z_3) \ \cdots \ g(r, z_N)]^T, \quad (2)$$

式中,  $z_n$  表示第  $n$  个阵元的深度. 根据 (1) 式, 可以将  $\mathbf{H}$  表示成矩阵相乘的形式:

$$\mathbf{H} = \Psi \mathbf{a}, \quad (3)$$

式中,  $\Psi$  为  $M$  阶简正波的模态函数在  $N$  个接收阵元上的采样, 其维度为  $N \times M$ :

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1(z_1) & \Psi_2(z_1) & \cdots & \Psi_M(z_1) \\ \Psi_1(z_2) & \Psi_2(z_2) & \cdots & \Psi_M(z_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_1(z_N) & \Psi_2(z_N) & \cdots & \Psi_M(z_N) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$\mathbf{a}$  为  $M \times 1$  维的列向量:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \gamma \Psi_1(z_s) \frac{e^{i(k_{r_1} + i\alpha_1)r}}{\sqrt{k_{r_1}r}} \\ \gamma \Psi_2(z_s) \frac{e^{i(k_{r_2} + i\alpha_2)r}}{\sqrt{k_{r_2}r}} \\ \vdots \\ \gamma \Psi_M(z_s) \frac{e^{i(k_{r_M} + i\alpha_M)r}}{\sqrt{k_{r_M}r}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中  $\gamma$  表示与水平波数和模态函数无关的系数, 其表达式为

$$\gamma = \frac{ie^{-i\pi/4}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi}}. \quad (6)$$

一般将  $\Psi$  称作模态函数矩阵, 将  $\mathbf{a}$  称作模态系数向量, 其元素为各阶模态对应的模态系数. 模态系数反映了简正波包含的信号能量; 当模态系数很小时, 该阶模态包含的信号能量很小, 对应简正波的模态函数对  $\mathbf{H}$  的影响也很小.

为估计声源功率,首先在频域建立垂直阵接收信号模型:

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}\mathbf{A} + \mathbf{N}, \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{X}$  为接收信号频域快拍, 是一个  $N \times 1$  维向量;  $A$  为信号幅度, 是一个常数;  $\mathbf{N}$  表示复高斯白噪声, 服从  $\mathcal{N}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$  分布,  $\sigma^2$  为噪声功率,  $\mathbf{I}$  为单位对角阵. 下面简要介绍匹配场声源功率估计方法, 及该方法面临的环境不确定性问题.

## 2.2 匹配场声源功率估计

匹配场声源功率估计方法<sup>[6]</sup>本质上是通过估计各频点的声源功率得到辐射信号的功率谱密度(power spectral density, PSD), 离散时间信号的 PSD 可由下式计算得到<sup>[25]</sup>:

$$P_{\text{PSD}}(k) = |S(k)|^2 / (L f_s), \quad (8)$$

式中, 下标“PSD”表示功率谱密度,  $L$  为时域快拍个数,  $f_s$  为采样频率,  $S(k)$  为离散时域信号  $s(l)$  的傅里叶变换:

$$\begin{aligned} S(k) &= \sum_{l=0}^{L-1} s(l) e^{-i \frac{2\pi}{L} kl} = \sum_{l=0}^{L-1} A e^{i \frac{2\pi}{L} kl} e^{-i \frac{2\pi}{L} kl} \\ &= LA, \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $A$  表示信号幅度. 将 (9) 式代入 (8) 式得:

$$P_{\text{PSD}}(k) = \frac{|LA|^2}{L f_s} = \frac{A^2}{f_s / L}, \quad (10)$$

式中,  $f_s / L$  为频率分辨率. 由 (10) 式可知, 估计声源功率可以转化成对信号幅度的估计问题; 当  $f_s / L = 1$  时, 幅度的平方即为声源功率.

匹配场声源功率估计方法<sup>[6]</sup>给出了信号幅度估计问题的理论最优解:

$$\hat{A}_c = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{X}, \quad (11)$$

式中, 下标“c”表示环境确定. (11) 式给出的是达到克拉美罗下界的信号幅度最小方差无偏估计, 其期望  $E[\hat{A}_c] = A$ , 方差  $D[\hat{A}_c] = \sigma^2 / (\mathbf{H}^H \mathbf{H})$ . 由前述推导, 声源功率估计值为

$$\hat{P}_c = (\hat{A}_c)^2 = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-2} \mathbf{H}^H \mathbf{R} \mathbf{H}, \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{R} = \mathbf{X} \mathbf{X}^H$  为基阵采样数据互谱密度矩阵. 声源功率估计值的期望为

$$\begin{aligned} E[\hat{P}_c] &= E[(\hat{A}_c)^2] = E[\hat{A}_c]^2 + D[\hat{A}_c] \\ &= A^2 + \frac{\sigma^2}{\mathbf{H}^H \mathbf{H}}, \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $\sigma^2 / (\mathbf{H}^H \mathbf{H})$  为环境噪声给匹配场声源功率估

计结果带来的误差, 可见, 除环境不确定性外, 环境噪声也是声源功率估计结果的误差来源. 本文采用控制变量法, 暂不考虑环境噪声, 只关注环境不确定性对匹配场声源功率估计的影响, 此时:

$$\hat{P}_c = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-2} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{H}^H \mathbf{H} A^2 = A^2. \quad (14)$$

(14) 式表明环境确定且不考虑噪声时,  $\hat{P}_c$  即为真实声源功率.

环境不确定时, 将信道传递函数估计值记为  $\hat{\mathbf{H}}$ , 由 (14) 式可得, 匹配场声源功率估计值为

$$\hat{P}_u = (\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}})^{-2} \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H} \mathbf{H}^H \hat{\mathbf{H}} A^2, \quad (15)$$

式中, 下标“u”表示环境不确定,  $\hat{P}_u$  只受环境不确定性影响. 本文以 (14) 式给出的功率估计结果为基准值, 对比 (15) 式得到的  $\hat{P}_u$  与 (14) 式给出的  $\hat{P}_c$ , 分析环境不确定时的声源功率估计性能损失.

## 3 声源功率估计性能损失分析

由 (14) 式和 (15) 式可以看出, 环境不确定性使得信道传递函数估计值存在偏差, 导致声源功率估计性能损失. 本节定义声源功率估计性能环境失配敏感度  $S_{\text{em}}$ , 量化表示声源功率估计性能损失, 下标“em”表示环境失配; 推导声源功率估计性能损失与信道传递函数估计偏差的关系, 分析环境不确定性影响声源功率估计的机理, 以及影响声源功率估计性能的关键环境参数.

### 3.1 声源功率估计性能环境失配敏感度

为了量化环境不确定性对声源功率估计性能的影响, 定义声源功率估计性能环境失配敏感度  $S_{\text{em}}$  为  $\hat{P}_u$  和  $\hat{P}_c$  的分贝表示形式的差, 表达式为

$$\begin{aligned} S_{\text{em}} &= 10 \lg \hat{P}_u - 10 \lg \hat{P}_c \\ &= 20 \lg \left| \frac{\hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H}}{\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}}} \right| = 20 \lg \left| \frac{\hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H}}{\|\hat{\mathbf{H}}\| \|\hat{\mathbf{H}}\|} \right|. \end{aligned} \quad (16)$$

环境确定时,  $S_{\text{em}} = 0$ , 声源功率估计性能最优; 环境不确定时,  $|S_{\text{em}}|$  越大, 表示环境不确定性对声源功率估计性能的影响越大.

由 (16) 式可知,  $S_{\text{em}}$  只与  $\hat{\mathbf{H}}$  和  $\mathbf{H}$  有关,  $\hat{\mathbf{H}}$  与  $\mathbf{H}$  的偏差程度决定了  $|S_{\text{em}}|$  的大小. 用模值偏差和夹角描述  $\hat{\mathbf{H}}$  与  $\mathbf{H}$  的偏差, 则  $S_{\text{em}}$  可以写为

$$S_{\text{em}} = 20 \lg \left| \frac{\|\mathbf{H}\| \|\hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H}\|}{\|\hat{\mathbf{H}}\| \|\hat{\mathbf{H}}\| \|\mathbf{H}\|} \right|$$

$$= 20 \lg |D_{\text{Mod}}| + 20 \lg |\cos \theta|, \quad (17)$$

$$D_{\text{Mod}} \triangleq \|\mathbf{H}\| / \|\hat{\mathbf{H}}\|, \quad (18)$$

$$\cos \theta = \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H} / (\|\hat{\mathbf{H}}\| \|\mathbf{H}\|), \quad (19)$$

式中,  $D_{\text{Mod}}$  为  $\hat{\mathbf{H}}$  与  $\mathbf{H}$  的模值之比, 下标“Mod”表示信道传递函数模值,  $D_{\text{Mod}}$  的变化范围无法确定,  $D_{\text{Mod}} = 1$  表示模值没有偏差,  $|D_{\text{Mod}} - 1|$  越大,  $\hat{\mathbf{H}}$  与  $\mathbf{H}$  的模值偏差越大;  $\theta$  为  $\hat{\mathbf{H}}$  与  $\mathbf{H}$  的夹角, 其变化范围为  $[0, \pi]$ , 环境确定时,  $\theta$  为 0;  $\cos \theta$  为夹角余弦值, 环境不确定时,  $\cos \theta$  越小,  $\hat{\mathbf{H}}$  与  $\mathbf{H}$  的夹角越大. (17) 式给出了  $S_{\text{em}}$  与信道传递函数估计偏差的关系, 即  $S_{\text{em}}$  可以表示成信道传递函数模值之比和夹角余弦值的绝对值的对数和. 下面将从信道传递函数模值之比和夹角余弦值分析环境不确定性对声源功率估计的影响机理.

### 3.2 环境不确定性对声源功率估计的影响机理分析

将 (18) 式中的  $D_{\text{Mod}}$  进一步写成:

$$D_{\text{Mod}} = \frac{\|\mathbf{H}\|}{\|\hat{\mathbf{H}}\|} = \frac{\|\mathbf{H}\| \|\mathbf{H}\|}{\|\hat{\mathbf{H}}\| \|\mathbf{H}\|} = \frac{\mathbf{H}^H \mathbf{H}}{\|\hat{\mathbf{H}}\| \|\mathbf{H}\|}. \quad (20)$$

对比 (20) 式和 (19) 式可以看出,  $D_{\text{Mod}}$  和  $\cos \theta$  的区别在于,  $D_{\text{Mod}}$  的分子为  $\mathbf{H}$  与  $\mathbf{H}$  的点积  $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ ,  $\cos \theta$  的分子为  $\hat{\mathbf{H}}$  与  $\mathbf{H}$  的点积  $\hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H}$ . 不难看出, 与  $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$  相比,  $\hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H}$  受环境不确定性影响更大, 因此, 环境不确定性对  $\cos \theta$  的影响大于对  $D_{\text{Mod}}$  的影响, 信道传递函数估计值  $\hat{\mathbf{H}}$  与理想值  $\mathbf{H}$  的夹角增大是环境不确定性影响声源功率估计性能的主要原因. 下面将信道传递函数用简正波表示, 进一步分析  $\hat{\mathbf{H}}$  与  $\mathbf{H}$  的夹角增大的根本原因.

由 (3) 式可知:

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = \mathbf{a}^H \Psi^H \Psi \mathbf{a}, \quad (21)$$

式中,  $\Psi^H \Psi$  为  $M \times M$  维矩阵, 由 (4) 式可得:

$$\Psi^H \Psi = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \Psi_1^2(z_n) & \sum_{n=1}^N \Psi_1(z_n) \Psi_2(z_n) & \cdots & \sum_{n=1}^N \Psi_1(z_n) \Psi_M(z_n) \\ \sum_{n=1}^N \Psi_1(z_n) \Psi_2(z_n) & \sum_{n=1}^N \Psi_2^2(z_n) & \cdots & \sum_{n=1}^N \Psi_2(z_n) \Psi_M(z_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{n=1}^N \Psi_1(z_n) \Psi_M(z_n) & \sum_{n=1}^N \Psi_2(z_n) \Psi_M(z_n) & \cdots & \sum_{n=1}^N \Psi_M^2(z_n) \end{bmatrix}. \quad (22)$$

在浅海环境中, 假设海水密度为常数, 全水深布阵时, 由简正波的正交特性可知:

$$\sum_{n=1}^N \Psi_m^2(z_n) = 1, \quad (23)$$

$$\sum_{n=1}^N \Psi_{m_1}(z_n) \Psi_{m_2}(z_n) = 0, \quad m_1 \neq m_2. \quad (24)$$

即环境确定时,  $\Psi^H \Psi$  的对角线元素为 1, 交叉项为 0. 将 (23) 式和 (24) 式代入 (22) 式, 可得:

$$\Psi^H \Psi = \mathbf{I}. \quad (25)$$

将 (25) 式代入 (21) 式, 可得:

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = \mathbf{a}^H \mathbf{a}. \quad (26)$$

环境不确定时, 假设环境下声源激发的简正波阶数为  $\hat{M}$ , 各阶简正波的吸收系数、模态函数和水平波数分别为  $\hat{\alpha}_m$ ,  $\hat{\Psi}_m$  和  $\hat{k}_{r,m}$ . 由 (21) 式可知,

$\hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H}$  可写为

$$\hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{H} = \hat{\mathbf{a}}^H \hat{\Psi}^H \Psi \mathbf{a}, \quad (27)$$

式中,

$$\hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \gamma \hat{\Psi}_1(z_s) \frac{e^{i(\hat{k}_{r,1} + i\hat{\alpha}_1)r}}{\sqrt{\hat{k}_{r,1}r}} \\ \gamma \hat{\Psi}_2(z_s) \frac{e^{i(\hat{k}_{r,2} + i\hat{\alpha}_2)r}}{\sqrt{\hat{k}_{r,2}r}} \\ \vdots \\ \gamma \hat{\Psi}_M(z_s) \frac{e^{i(\hat{k}_{r,M} + i\hat{\alpha}_M)r}}{\sqrt{\hat{k}_{r,M}r}} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

$\hat{\Psi}^H \Psi$  为  $\hat{M} \times M$  维矩阵:

$$\hat{\Psi}^H \Psi = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_1(z_n) \Psi_1(z_n) & \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_1(z_n) \Psi_2(z_n) & \cdots & \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_1(z_n) \Psi_M(z_n) \\ \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_2(z_n) \Psi_1(z_n) & \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_2(z_n) \Psi_2(z_n) & \cdots & \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_2(z_n) \Psi_M(z_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_M(z_n) \Psi_1(z_n) & \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_M(z_n) \Psi_2(z_n) & \cdots & \sum_{n=1}^N \hat{\Psi}_M(z_n) \Psi_M(z_n) \end{bmatrix}. \quad (29)$$

由于环境不确定性, 简正波的正交准则无法应用, 交叉项不为 0, 非零交叉项严重影响  $\hat{\Psi}^H \Psi$ , 从而严重影响改变  $\hat{H}$  与  $H$  的夹角.

由上述分析可知,  $\hat{H}$  与  $H$  的夹角增大的根本原因在于, 环境不确定性导致非零交叉项增多, 模态函数之间的相互作用严重影响  $\hat{H}^H H$ .  $\hat{H}^H H$  受环境不确定性的影响程度与非零交叉项个数和环境不确定性对模态函数的影响程度有关. 频率增高, 声源激发的简正波个数增大, 环境不确定时非零交叉项个数增多, 环境不确定性对声源功率估计结果的影响也增大; 环境不确定性对模态函数的影响程度与具体环境参数有关, 下面将通过分析环境参数变化对模态函数的影响规律, 研究环境参数变化对声源功率估计结果的影响程度.

### 3.3 环境参数对声源功率估计影响的定性分析

美国海军实验室 (NRL)<sup>[23]</sup> 给出了标准浅海环境声速剖面, 以及海水深度、海水声速、沉积层声速、沉积层密度和沉积层吸收系数等参数的不确定范围, 后来被广泛应用于环境不确定性对声场的影响的研究中. 研究表明<sup>[16]</sup>, 沉积层密度和沉积层吸收系数变化对声传播影响很小. 因此, 本文主要研究海水深度  $d_1$ , 海水上表面声速  $c_1$  和下表面声速  $c_2$ , 沉积层上表面声速  $c_3$  和下表面声速  $c_4$  等不确定环境参数对声源功率估计的影响. 基于 NRL Workshop'93 提供的 Benchmark 标准浅海声速剖面, 给出本节分析使用的浅海声速剖面示意图, 如图 1 所示. 海水声速梯度为负梯度  $G_1$ , 沉积层梯度为正梯度  $G_2$ , 即  $c_2 < c_1 < c_3 < c_4$ , 基底半空间声速与沉积层下表面声速一致. 本节首先简要介绍简正波的基本传播特性, 随后将不同类型简正波模态函数的变化与环境参数联系起来, 以分析环境参数变化对声源功率估计结果的影响程度.

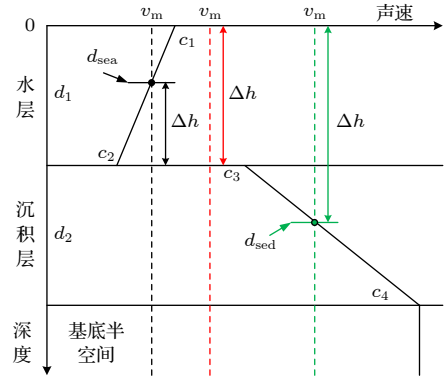


图 1 浅海声速剖面示意图

Fig. 1. Sound velocity profile in shallow water.

#### 3.3.1 简正波可传播深度范围

第  $m$  阶简正波的相速度为

$$v_m = \frac{\omega}{k_{rm}}. \quad (30)$$

低阶简正波水平波数较大, 简正波相速度较小. 垂直波数  $k_{zm}(z)$  是与深度  $z$  有关的物理量, 水平波数和垂直波数满足以下关系<sup>[24]</sup>:

$$k_{zm}^2(z) = \frac{\omega^2}{c^2(z)} - k_{rm}^2, \quad (31)$$

式中,  $\omega$  为角频率.  $k_{zm}^2(z) = 0$  时,  $v_m = c(z)$ . 一般将此时的深度值称为临界深度, 临界深度将海域分为  $v_m > c(z)$  和  $v_m < c(z)$  两个部分. 当  $v_m > c(z)$  时,  $k_{zm}^2 > 0$ , 称此时的模态函数形式为振荡型, 简正波在该深度范围内可以传播; 当  $v_m < c(z)$  时,  $k_{zm}^2 < 0$ , 称此时的模态函数形式为衰减型, 简正波不在该深度范围内传播. 振荡型和衰减型描述的是模态函数随深度的变化特性. 本文将模态函数形式为振荡型的深度范围称为简正波的可传播深度范围, 记作  $\Delta h$ . 图 2 给出了不同类型简正波对应的  $\Delta h$  示意图, 模态函数在  $\Delta h$  内随深度呈正弦或余弦振荡形式, 在  $\Delta h$  外呈指数衰减至零. 从图 2 可以看到, 不同类型简正波的  $\Delta h$  有明显差异.

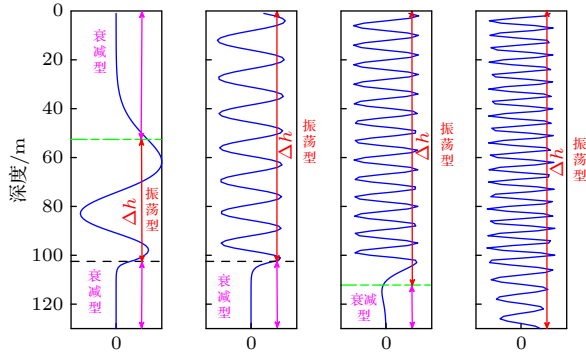

 图 2 不同简正波对应的  $\Delta h$  示意图

 Fig. 2.  $\Delta h$  of different kind of normal mode.

为了分析不同环境参数变化对声源功率估计结果的影响程度,使用水平波数与界面声速的大小关系对简正波进行分类,将不同种类简正波的模式函数变化与声速变化联系起来,同时使用  $\Delta h$  将不同种类简正波的模式函数变化与海水深度变化联系起来。

### 3.3.2 简正波分类

根据水平波数将简正波分为 3 类,分别为渐消模态 (evanescent modes, EM)、全深度传播模态 (full depth propagating modes, FPM) 以及部分深度传播模态 (partial depth propagating modes, PPM). 表 1 列出了各类简正波水平波数  $k_{rm}$  所处区间及可传播深度范围  $\Delta h$ 。

图 1 中虚线给出了不同简正波的相速度. 其中, EM 对应的水平波数  $k_{rm} < \omega/c_3$ , 相速度满足  $v_m > c_3$ , 由图 1 中绿色虚线表示. EM 对应的临界深度在沉积层, 记为沉积层临界深度  $d_{sed}$ . 沉积层声速梯度  $G_2$  可以写成:

$$G_2 = (c_4 - c_3)/d_2 = (v_m - c_3)/(d_{sed} - d_1). \quad (32)$$

则由 (32) 式可得  $d_{sed}$  为

$$d_{sed} = \frac{(v_m - c_3) d_2}{c_4 - c_3} + d_1. \quad (33)$$

EM 对应的  $\Delta h$  为  $[0, d_{sed}]$ ,  $\Delta h$  与沉积层有交叉, 模式函数在部分沉积层深度范围内表现为振荡型, 简正波会在沉积层内传播, 传播损失较大, 信号能量随距离增大迅速衰减. 简正波阶数增大, 相速度增大,  $d_{sed}$  随之增大, 信号能量衰减速度也增大。

FPM 对应的水平波数满足  $\frac{\omega}{c_3} \leq k_{rm} \leq \frac{\omega}{c_1}$ , 相速度满足  $c_1 \leq v_m \leq c_3$ , 由图 1 中红色虚线表示. FPM 对应的  $\Delta h$  为  $[0, d_1]$ , 简正波在整个海水深度范围内传播。

 表 1 各类简正波对应的水平波数  $k_{rm}$  及可传播深度范围  $\Delta h$ 

 Table 1.  $k_{rm}$  and  $\Delta h$  of different kind of normal mode.

简正波类型	$k_{rm}$	$\Delta h$
EM	$k_{rm} < \frac{\omega}{c_3}$	$[0, d_{sed}]$
FPM	$\frac{\omega}{c_3} \leq k_{rm} \leq \frac{\omega}{c_1}$	$[0, d_1]$
PPM	$\frac{\omega}{c_1} < k_{rm} \leq \frac{\omega}{c_2}$	$[d_{sea}, d_1]$

PPM 对应的水平波数满足  $\frac{\omega}{c_1} < k_{rm} \leq \frac{\omega}{c_2}$ , 相速度满足  $c_2 \leq v_m < c_1$ , 由图 1 中黑色虚线表示. PPM 对应的临界深度在水层, 记为海水临界深度  $d_{sea}$ . 海水声速梯度  $G_1$  可以写成:

$$G_1 = (c_2 - c_1)/d_1 = (v_m - c_1)/d_{sea}. \quad (34)$$

则由 (34) 式可得  $d_{sea}$  为

$$d_{sea} = (v_m - c_1) d_1 / (c_2 - c_1). \quad (35)$$

PPM 对应的  $\Delta h$  为  $[d_{sea}, d_1]$ , 简正波在部分海水深度范围内传播. PPM 和 FPM 均为传播模态, 模式函数在海水与沉积层分界面以下表现为衰减型, 简正波只在海水内传播, 传播损失较小, 信号能传播至较远距离, 两者的区别在于  $\Delta h$  不同。

### 3.3.3 环境参数变化对声源功率估计的影响

根据表 1 和 (33) 式、(35) 式分析不同环境参数变化对声源功率估计的影响, 不难看出, 不同环境参数变化影响的简正波类型不同, 其对声源功率估计的影响程度也不同:

1) 海水深度 ( $d_1$ ) 变化导致所有类型简正波的模式函数均会发生较大改变, 海水深度 ( $d_1$ ) 变化对  $\cos \theta$  的影响最大. 因此, 海水深度 ( $d_1$ ) 变化对声源功率估计性能影响很大。

2) 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化主要影响 PPM 的  $\Delta h$ , 并改变 PPM 和 FPM 的模式个数, PPM 和 FPM 的模式函数会有较大改变, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化对  $\cos \theta$  的影响较大. 因此, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化对声源功率估计性能影响较大。

3) 沉积层声速 ( $c_3, c_4$ ) 变化主要影响 EM 的可传播海域, EM 的模式函数会有较大改变, 由于 EM 对应的模式系数较小, EM 对信道传递函数贡献很小, 沉积层声速 ( $c_3, c_4$ ) 变化对  $\cos \theta$  的影响较小; 但沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 变化会导致少数

FPM 和 EM 发生转变, 这会较大程度地改变部分传播模态的模态函数, 导致与沉积层下表面声速 ( $c_4$ ) 相比, 沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 变化对  $\cos \theta$  的影响更大. 因此, 沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 变化对声源功率估计性能影响较大; 沉积层下表面声速 ( $c_4$ ) 变化对声源功率估计性能影响很小.

### 4 数值仿真分析

仿真研究中使用了 NRL Workshop'93 提供的 Benchmark 标准浅海声速剖面及参数不确定范围, 如图 3 所示. 图中黑色实线表示标称声速剖面, 海水中为线性负梯度声速剖面, 沉积层中为线性正梯度声速剖面, 基底半空间声速不随深度变化. 其中, 海水上表面声速  $c_1$  标称值为 1500 m/s, 下表面声速  $c_2$  标称值为 1480 m/s; 沉积层上表面声速  $c_3$  标称值为 1600 m/s, 下表面声速  $c_4$  标称值为 1750 m/s, 基底半空间声速与沉积层下表面声速保持一致; 左右两边的虚线分别代表声速可取值的最小值和最大值. 基底半空间的吸收系数  $\alpha$  和密度  $\rho$  与沉积层保持一致, 标称值分别为  $0.35 \text{ dB}/\lambda$  和  $1.75 \text{ g}/\text{cm}^3$ . 研究海域海水深度  $d_1$  标称值为 102.5 m, 沉积层厚度  $d_2 = 100 \text{ m}$  始终保持不变. 海洋环境各参数的变化范围在图 3 中给出, 环境参数在变化范围内均服从均匀分布.

声场计算采用基于简正波方法的 KrakenC 声场软件, 使用阵元间距为 1 m 的 100 元均匀垂直

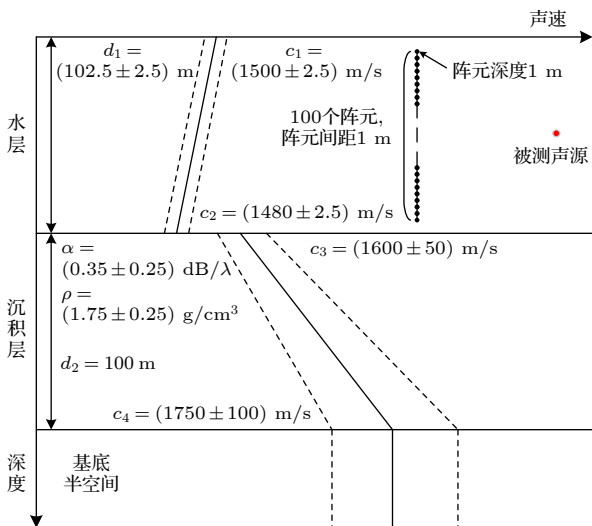


图 3 NRL Workshop'93 提供的 Benchmark 标准浅海声速剖面

Fig. 3. NRL Workshop'93 Benchmark standard shallow water sound profile.

线列阵接收数据, 其中最靠近海面的阵元深度为 1 m. 被测声源深度为 50 m, 声源到接收基阵的距离为 500 m, 声源辐射信号多为宽带信号, 假设信号频率变化范围为 100—1000 Hz, 仿真分析采用的蒙特卡罗次数均为 1000 次.

### 4.1 环境不确定性对声源功率估计的影响

假设声源频率为 500 Hz, 声源功率标称值为 100 dB. 图 4 给出了环境不确定性对信道传递函数模值偏差和夹角以及声源功率估计的影响. 表 2 为信道传递函数模值偏差和夹角及声源功率估计结果的 1000 次蒙特卡罗仿真的统计结果.  $20 \lg |D_{\text{Mod}}|$  的均值为  $-0.11 \text{ dB}$ , 方差为 0.24;  $20 \lg |\cos \theta|$  的均值为  $-5.78 \text{ dB}$ , 方差为 28.52. 结合图 4(a) 可以看出, 环境不确定性对  $\cos \theta$  的影响远大于对信道传递函数模值的影响,  $\cos \theta$  对环境不确定性比较敏感, 信道传递函数的模值对环境不确定性更稳健. 环境不确定时, 声源功率估计值  $\hat{P}_u$  的均值为  $94.11 \text{ dB}$ , 方差为 28.37, 声源功率估计误差为  $-5.78 \text{ dB}$ . 结合图 4(b) 可以看出, 匹配场声源功率估计结果对环

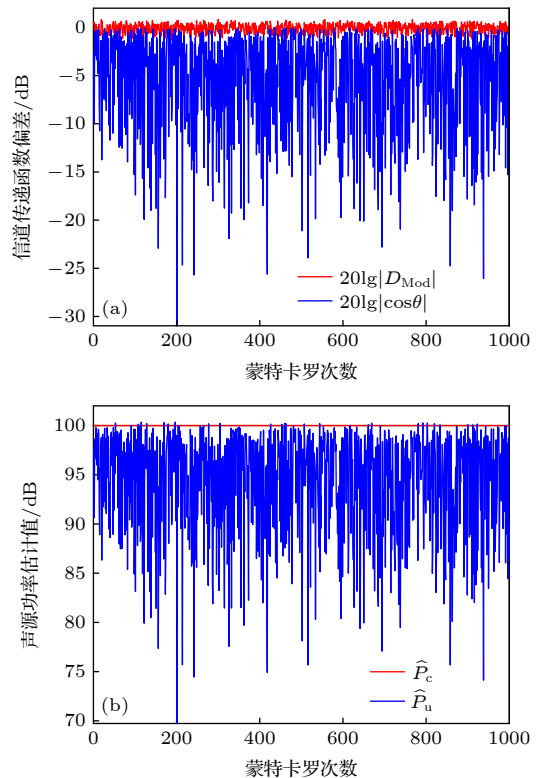


图 4 环境不确定性对信道传递函数以及声源功率估计的影响 (a) 信道传递函数; (b) 声源功率估计

Fig. 4. Influence of environmental uncertainty on acoustic transfer function and source power estimation: (a) Acoustic transfer function; (b) source power estimation.

境不确定性非常敏感. 由 (17) 式可知,  $S_{em}$  可以表示成  $20 \lg |D_{Mod}|$  和  $20 \lg |\cos \theta|$  之和, 由表 2 可知,  $S_{em}$  与  $20 \lg |\cos \theta|$  基本一致, 可以看出信道传递函数估计值与理想值的夹角增大是环境不确定性影响声源功率估计的主要原因.

表 2 信道传递函数和声源功率估计的统计结果  
Table 2. Statistical results of acoustic transfer function and source power estimation.

物理量	最大值/dB	最小值/dB	均值/dB	方差
$20 \lg  D_{Mod} $	0.83	-1.49	-0.11	0.24
$20 \lg  \cos \theta $	-0.02	-30.97	-5.78	28.52
$\hat{P}_c$	100	100	100	0
$\hat{P}_u$	100.35	69.73	94.11	28.37
$S_{em}$	0.35	-30.27	-5.89	28.37

### 4.2 不同环境参数变化对声源功率估计的影响程度

假设声源频率为 500 Hz, 声源功率标称值为 100 dB. 使用图 3 给出的环境参数不确定范围, 采用控制变量法分析不同环境参数变化对声源功率估计的影响程度. 以环境参数分别取标称值和最大值为例, 分析环境参数变化对模态函数的影响.

表 3 列出了环境参数取标称值和不同环境参数分别取最大值时各类简正波的阶数. 分别选取第 3 阶和第 15 阶简正波代表 PPM 和 FPM, 选取第 30 阶和第 40 阶简正波代表 EM, 图 5 给出了海水深度 ( $d_1$ ) 取标称值和最大值时各类简正波的模态函数图, 图中虚线表示海底. 海水深度变化时, PPM, FPM 和 EM 的模态函数均有较大改变. 图 6 给出了海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 取标称值和最大值时各类简正波的模态函数图, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化会影响传播模态的模态函数, 其中 PPM 的模态函数变化较大, FPM 的模态函数变化很小. 图 7 给出了

沉积层声速 ( $c_3, c_4$ ) 取标称值和最大值时各类简正波的模态函数图, 沉积层下表面声速 ( $c_4$ ) 变化会影响渐消模态 (EM) 的模态函数, 但几乎不会影响传播模态的模态函数; 沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 由标称值变化为最大值时, 第 30 阶由 EM 变为 FPM, 第 30 阶简正波的模态系数增大, 模态函数的变化会对  $\cos \theta$  产生较大影响.

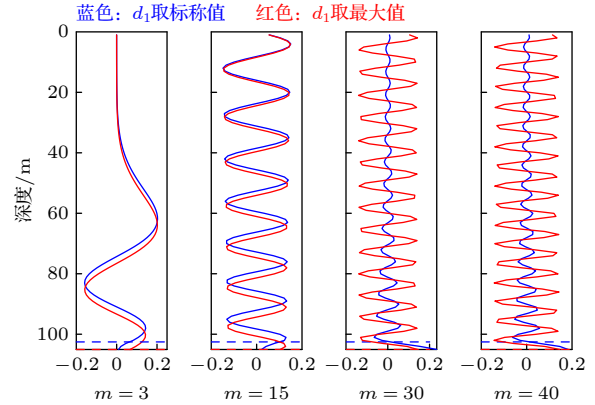


图 5 海水深度 ( $d_1$ ) 变化对各类简正波的影响

Fig. 5. Influence of the variation of water depth on different kind of normal mode.

图 8 给出了不同环境参数变化时的声源功率估计结果. 海水深度 ( $d_1$ ) 变化对声源功率估计影响最大, 海水深度 ( $d_1$ ) 变化时, 声源功率估计结果为 94.22 dB,  $|S_{em}|$  为 5.78 dB; 其他环境参数变化,  $|S_{em}|$  不超过 0.3 dB; 除海水深度外, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化对声源功率估计影响较大; 由于沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 变化使得部分传播模态和渐消模态发生转变, 沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 变化对声源功率估计的影响大于沉积层下表面声速 ( $c_4$ ) 变化对声源功率估计的影响. 沉积层下表面声速 ( $c_4$ ) 变化对声源功率估计影响很小,  $|S_{em}|$  不超过 0.1 dB.

表 3 不同环境参数条件下各类简正波的阶数

Table 3. The number of different kind of normal mode under different environmental parameters.

环境参数条件	PPM	FPM	EM
环境参数均为标称值	1—7 (共7阶)	8—25 (共18阶)	26—127 (共102阶)
$d_1 = 105$ m (最大值)	1—7 (共7阶)	8—26 (共19阶)	27—129 (共103阶)
$c_1 = 1502.5$ m/s (最大值)	1—8 (共8阶)	9—25 (共17阶)	26—127 (共102阶)
$c_2 = 1482.5$ m/s (最大值)	1—7 (共7阶)	8—25 (共18阶)	26—126 (共101阶)
$c_3 = 1650$ m/s (最大值)	1—7 (共7阶)	8—30 (共23阶)	31—124 (共94阶)
$c_4 = 1850$ m/s (最大值)	1—7 (共7阶)	8—25 (共18阶)	26—126 (共101阶)

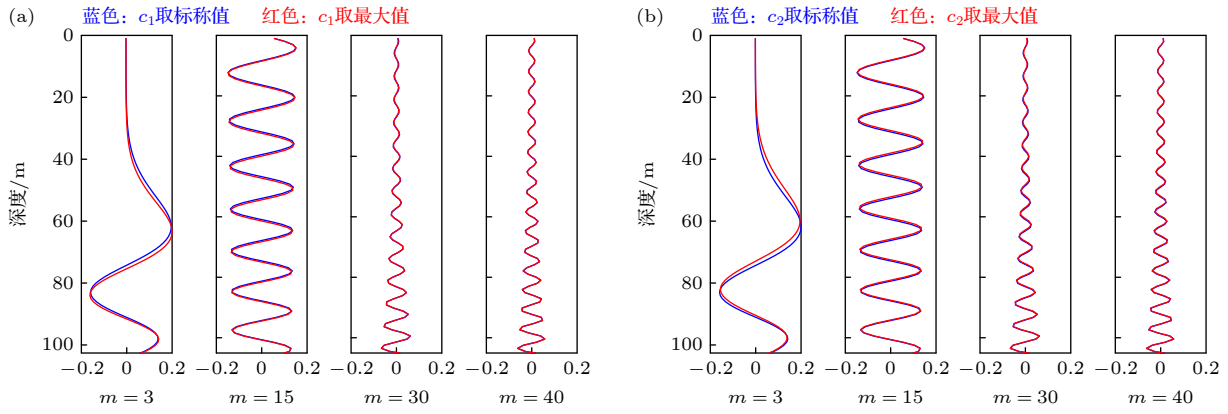


图 6 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化对各类简正波的影响 (a)  $c_1$  变化; (b)  $c_2$  变化

Fig. 6. Influence of the variation of sound velocity of water on different kind of normal mode: (a) The variation of  $c_1$ ; (b) the variation of  $c_2$ .

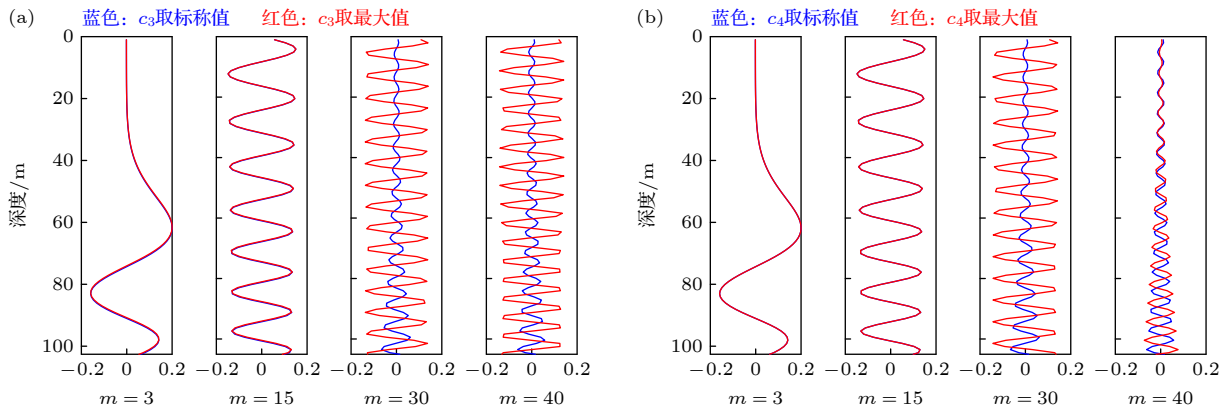


图 7 沉积层声速 ( $c_3, c_4$ ) 变化对各类简正波的影响 (a)  $c_3$  变化; (b)  $c_4$  变化

Fig. 7. Influence of the variation of sound velocity of sediment on different kind of normal mode: (a) The variation of  $c_3$ ; (b) the variation of  $c_4$ .

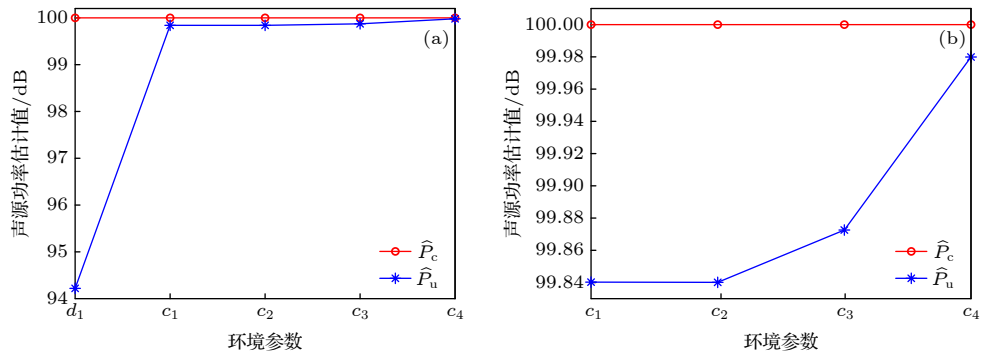


图 8 不同环境参数变化时的声源功率估计结果 (a) 整体图; (b) 局部放大图

Fig. 8. Source power estimation when different environmental parameters change: (a) Overall; (b) partial enlargement.

### 4.3 环境不确定性对不同频率声源功率估计的影响

取信号频率变化范围为 100—1000 Hz, 各频点处的声源功率标称值为 100 dB. 图 9 给出了环境不确定性对不同频率声源功率估计的影响. 在低

频段, 环境不确定性对声源功率估计的影响很小, 频率为 100 Hz 时, 声源功率估计结果为 99.46 dB,  $|S_{em}|$  为 0.54 dB. 频率升高,  $|S_{em}|$  逐渐增大, 环境不确定性对声源功率估计的影响呈增大趋势, 频率 1000 Hz 时, 声源功率估计结果为 92.88 dB,  $|S_{em}|$  为 7.12 dB.

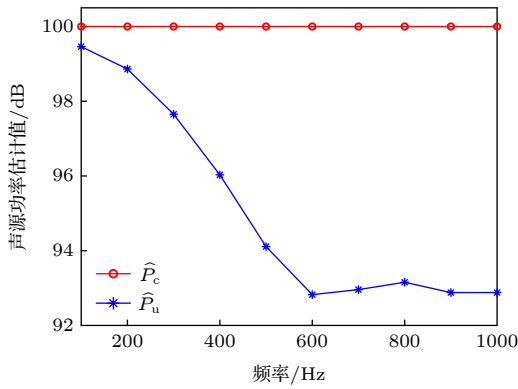


图 9 环境不确定性对不同频率声源功率估计的影响  
Fig. 9. Influence of environmental uncertainty on source power estimations at different frequencies.

图 10(a) 给出了不同环境参数变化对不同频率声源功率估计的影响, 图 10(b) 给出了除海水深度外其他环境参数对声源功率估计性能的影响的局部放大图. 对不同频段的信号, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 和沉积层声速 ( $c_3, c_4$ ) 变化时,  $|S_{em}|$  不超过 1 dB; 海水深度变化时,  $|S_{em}|$  随频率升高迅速增大, 频率

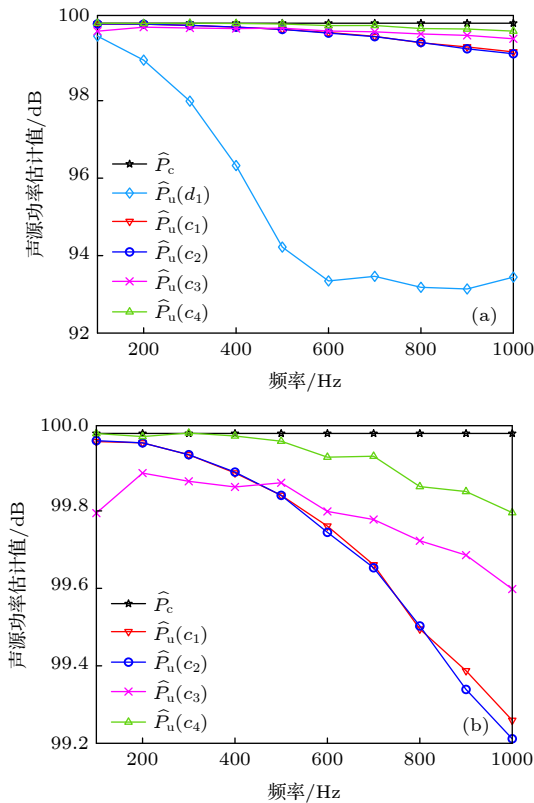


图 10 不同环境参数变化对不同频率声源功率估计的影响 (a) 整体图; (b) 局部放大图

Fig. 10. Influence of different environmental parameters on source power estimations at different frequencies: (a) Overall; (b) partial enlargement.

1000 Hz 时,  $|S_{em}|$  约为 6.5 dB. 可见, 海水深度变化对功率估计结果的影响明显大于其他环境参数.

除海水深度外, 频率 100—500 Hz 时, 沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 变化对声源功率估计性能的影响大于其他环境参数. 这与沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 变化会改变渐消模态和传播模态的个数有关, 在信号频率较低时, 沉积层上表面声速 ( $c_3$ ) 变化仍然可以较大程度地影响部分传播模态的模态函数, 对  $\cos \theta$  造成较大影响. 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 主要影响传播模态, 在低频段声源激发的传播模态个数很少, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化对  $\cos \theta$  的影响也很小. 因此, 在低频段, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化对声源功率估计性能的影响小于沉积层上表面声速 ( $c_3$ ). 频率 500—1000 Hz 时, 声源激发的传播模态个数增多, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 变化对  $\cos \theta$  的影响迅速增大; 而沉积层声速 ( $c_3, c_4$ ) 变化对  $\cos \theta$  的影响很小, 且随频率升高增长缓慢. 因此, 在高频段, 海水声速 ( $c_1, c_2$ ) 是影响声源功率估计性能的主要参数.

在上述分析中, 本文假定声源位于深度 50 m, 距离接收阵 500 m 进行分析. 可以验证, 在不同声源位置情况下, 以上结论也成立, 为避免重复, 本文不再赘述.

## 5 结 论

本文通过分析环境不确定时简正波和信道传递函数的变化, 研究了环境不确定性对匹配场声源功率估计结果的影响. 环境不确定性将导致信号功率估计值有偏, 该估计误差与信道传递函数估计值与理想值的模值偏差成正比、夹角余弦值的绝对值成反比. 在此基础上, 研究发现环境不确定性对信道传递函数模值的影响很小; 但由于环境不确定性, 简正波模态函数之间的正交特性无法应用, 非零交叉项增多使得信道传递函数估计值与理想值的夹角余弦值减小, 导致声源功率估计性能严重下降. 信道传递函数估计值与理想值的夹角变化程度与简正波个数和简正波模态函数的变化程度有关. 由于简正波个数随频率增大而增大, 环境不确定性对声源功率估计性能的影响也随频率增大而增大. 简正波模态函数的变化程度与具体环境参数有关, 本文结合 Benchmark 标准浅海声速剖面, 研究了海水深度、海水声速和沉积层声速等环境参数变化对模态函数的影响, 发现海水深度变化会显著改变

所有类型简正波的模态函数,相应地,海水深度变化对声源功率估计结果影响最大;沉积层声速变化主要影响渐消模态的模态函数,因此沉积层声速变化对声源功率估计结果影响很小,由于沉积层上表面声速变化可以较大程度地改变部分传播模态的模态函数,其对声源功率估计结果的影响与沉积层下表面声速相比更大;海水声速变化主要影响传播模态的模态函数,在高频段,传播模态个数较多,海水声速变化对声源功率估计结果影响较大,在低频段,传播模态个数较少,海水声速变化对声源功率估计结果的影响甚至小于沉积层上表面声速。

## 参考文献

- [1] Jiang G Q, Sun C, Liu X H, Jiang G Y 2020 *Journal of Harbin Engineering University* **41** 1493 (in Chinese) [蒋国庆, 孙超, 刘雄厚, 蒋光禹 2020 哈尔滨工程大学学报 **41** 1493]
- [2] Wu G Q, Wang M G, Chen S H, Ma L 2007 *Acta Acustica* **32** 398 (in Chinese) [吴国清, 王美刚, 陈守虎, 马力 2007 声学学报 **32** 398]
- [3] Gao Y, Shi S G 2010 *Technical Acoustics* **29** 80 (in Chinese) [高原, 时胜国 2010 声学技术 **29** 80]
- [4] Fang E Z, Yang D S 2009 *Technical Acoustics* **28** 91 (in Chinese) [方尔正, 杨德森 2009 声学技术 **28** 91]
- [5] Sun G Q, Yang D S, Zhang L Y 2002 *Acta Acustica* **27** 429 (in Chinese) [孙贵青, 杨德森, 张揽月 2002 声学学报 **27** 429]
- [6] Xiang L F, Sun C 2014 *Acta Acustica* **39** 570 (in Chinese) [向龙凤, 孙超 2014 声学学报 **39** 570]
- [7] Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalevsky P N 1993 *IEEE J. Oceanic Eng.* **18** 401
- [8] Bucker H P 1976 *J. Acoust. Soc. Am.* **59** 368
- [9] Yang T C 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 1736
- [10] Yang T C 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **87** 2072
- [11] Lin J H, Chang D Q, Ma L, Li X J, Jiang G J 2001 *Acta Acustica* **26** 217 (in Chinese) [林建恒, 常道庆, 马力, 李学军, 蒋国健 2001 声学学报 **26** 217]
- [12] Xiang L F, Sun C, Li M Y 2015 *Acta Acustica* **40** 779 (in Chinese) [向龙凤, 孙超, 李明杨 2015 声学学报 **40** 779]
- [13] Shang E C, Wang Y Y 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 2285
- [14] Del Balzo D R, Feuillade C, Rowe M M 1988 *J. Acoust. Soc. Am.* **83** 2180
- [15] Hamson R M, Heitmeyer R M 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 1950
- [16] Feuillade C, Del Balzo D R, Rowe M M 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **85** 2354
- [17] Zhao H F, Li J L, Gong X Y 2011 *Journal of Harbin Engineering University* **32** 200 (in Chinese) [赵航芳, 李建龙, 宫先仪 2011 哈尔滨工程大学学报 **32** 200]
- [18] Liu Z W, Sun C, Du J Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064303 (in Chinese) [刘宗伟, 孙超, 杜金燕 2013 物理学报 **62** 064303]
- [19] Li M Y, Sun C, Shao X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 204302 (in Chinese) [李明杨, 孙超, 邵炫 2014 物理学报 **63** 204302]
- [20] Dosso S E, Morley M G, Giles P M, Brooke G H, McCammon D F, Pecknold S, Hines P C 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 2560
- [21] Kong D Z, Sun C, Li M Y, Zhuo J, Liu X H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 174301 (in Chinese) [孔德智, 孙超, 李明杨, 卓颀, 刘雄厚 2019 物理学报 **68** 174301]
- [22] Jia Y Q, Su L, Guo S M, Ma L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 174302 (in Chinese) [贾雨晴, 苏林, 郭圣明, 马力 2018 物理学报 **67** 174302]
- [23] Porter M B, Tolstoy A 1994 *J. Comput. Acoust.* **2** 161
- [24] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2000 *Computational Ocean Acoustics* (Vol. 2) (New York: American Institute of Physics) p338–358
- [25] Duan Z M, Yin X P 2020 *Signals and Systems* (Vol. 4) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p84 (in Chinese) [段哲民, 尹熙鹏 2020 信号与系统 (第四版) (北京: 电子工业出版社) 第84页]

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

Zhang Shao-Dong<sup>1)2)3)</sup> Sun Chao<sup>1)2)3)†</sup> Xie Lei<sup>1)2)3)</sup>

Liu Xiong-Hou<sup>1)2)3)</sup> Wang Xuan<sup>1)2)3)</sup>

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

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

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

( Received 6 May 2021; revised manuscript received 29 June 2021 )

## Abstract

The method of estimating matched field power solves the problem that the traditional method of estimating power under the assumption of spherical or cylindrical wave is greatly affected by the shallow water waveguide. However, the accuracy of the matched field power estimation is seriously affected by the environmental uncertainty. In this work, the environmental sensitivity in source power estimation is defined, and the loss of the source power estimation performance is quantified when the environment is uncertain. The relation between the loss of the source power estimation performance and the estimation deviation of the acoustic transfer function is derived by using the modulus deviation and the angle between the estimated acoustic transfer function and the ideal value. On this basis, we study the mechanism of the influence of environmental uncertainty on source power estimation, and the influences of water depth, sound speed of water and sound speed of sedimentary layer on the estimation of source power. The results show that the influences of different environmental parameters on the modulus are small, and the decline of the power estimation performance is mainly due to the fact that the angle varies greatly. The change of water depth has the most significant influence on the power estimation results, and the change of sound speed of sedimentary layer exerts little influence on the power estimation results. Beside the water depth, the change of sound speed of water has a greater influence on the power estimation results at high frequencies.

**Keywords:** environmental uncertainty, acoustic transfer function, mode shape function, power estimation

**PACS:** 43.20.+g, 43.30.+m, 43.58.+z

**DOI:** [10.7498/aps.70.20210852](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210852)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11974285).

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