

不确定浅海环境中水平阵角度域子空间检测

王宣 孙超 李明杨 张少东

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

Wang Xuan Sun Chao Li Ming-Yang Zhang Shao-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 084304 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211742

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211742>

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>

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>

浅海环境中基于模态衰减规律加权的子空间检测方法

Weighted subspace detection method based on modal attenuation law in shallow water

物理学报. 2020, 69(16): 164301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191948>

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>

深海波导中基于采样简正波模态降维处理的广义似然比检测

Dimension-reduced generalized likelihood ratio detection based on sampling of normal modes in deep ocean

物理学报. 2019, 68(17): 174301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190700>

不确定浅海环境中水平阵角度域子空间检测*

王宣¹⁾²⁾ 孙超^{1)2)†} 李明杨³⁾ 张少东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)

3) (浙江大学信息与电子工程学院, 杭州 310058)

(2021 年 9 月 18 日收到; 2021 年 12 月 9 日收到修改稿)

在复杂浅海波导中, 环境参数的不确定性影响检测的稳健性, 故稳健检测是浅海检测中的重要问题. 本文结合简正波模型, 定义和估计了不确定环境中的水平阵角度域子空间, 提出了水平阵角度域子空间检测器及其稳健形式. 角度域子空间利用了不同环境参数条件下的水平阵远场观测模型, 包含了不确定环境参数信息, 估计过程中利用了硬海底条件下传播模态的水平波数与水体、沉积层声速之间的关系, 具有较少的先验信息要求和较低的实现复杂度. 在此基础上提出的水平阵角度域子空间检测器实现简单, 在不确定环境中具有一定的稳健性, 但其检测性能随目标方位角起伏. 将角度域子空间变换到维数恒定的子空间中, 得到角度域子空间检测器的稳健形式, 即稳健水平阵角度域子空间检测器, 该检测器在不确定环境中具有一定的稳健性, 同时检测性能在各目标方位上一致. 不确定浅海环境中的仿真结果表明, 稳健水平阵角度域子空间检测器具有和能量检测器近似的稳健性, 同时提高了检测能力.

关键词: 浅海波导, 不确定环境, 检测, 水平阵

PACS: 43.60.Bf, 43.30.+m, 43.60.+d, 43.60.Cg

DOI: 10.7498/aps.71.20211742

1 引言

浅海环境中, 多变的水体声速剖面和复杂的海底底质导致波导的起伏多变^[1], 给水下目标的检测带来困难. 水平线列阵 (horizontal linear array, HLA) 是一种具有水平孔径的水听器阵列, 被广泛应用于测向、波束形成等领域^[2,3], 其孔径不受海深的限制, 可以通过增加阵元的方式提高阵列信噪比, 将其固定布放于海底时, 还可以减少风浪等因素对阵形的影响, 这两个优势使得 HLA 可以在较为复杂的浅海环境中获得较好的检测性能.

HLA 的接收信号模型可由水下声传播模型建立^[3-6], 当环境参数不确定时, 结合先验信息和水下声传播模型可以得到多种宽容检测方法, 如贝叶

斯检测方法、广义似然比检测方法、子空间类检测方法等. 贝叶斯检测方法利用了不确定参数的分布信息, 具有统计上最优的检测性能^[7]; 广义似然比检测方法利用了参数不确定范围信息, 检测性能趋近贝叶斯检测方法^[8]. 但这两种方法在部分参数条件下会出现信号波前失配的情况, 导致稳健性不足. 子空间类检测方法通常具有更高的稳健性, 被广泛应用于水下检测^[9-13]. 其中, 李明杨^[11]通过信号波前矩阵构建了包含不确定环境信息的子空间, 并提出了不确定环境中稳健的子空间检测器, 该检测器在不确定环境中具有接近能量检测器的稳健性. 但是 HLA 的信号特征子空间维数较大, 而子空间类检测器的检测性能与所利用子空间的维数成反比, 则该子空间检测器用于 HLA 时检测能力偏低. 常见的改进方法是通过截断信噪比较低的子

* 国家自然科学基金 (批准号: 11974285) 和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

空间成分^[14], 降低子空间维数, 提高检测器的检测能力. 但信号特征子空间中信噪比较低的成分无法确定, 任意截断子空间会导致在部分参数条件下信号投影能量损失过大, 与稳健需求相矛盾.

本文在简正波模型的基础上, 结合 HLA 远场观测矩阵和不确定环境参数, 定义了不确定环境中的 HLA 角度域子空间. 在不同环境参数条件下, HLA 接收到的信号均能落入该子空间中, 表明该子空间在不确定环境中具有很高的有效性. 因为 HLA 远场观测矩阵是对简正波中行波信息的采样, 而采样到的行波相关性较高^[15], 所以角度域子空间具有较低的维数. 理想的角度域子空间的构造中需要利用所有的不确定环境参数, 在实际中是无法实现的, 需要对角度域子空间进行估计. 本文结合硬海底环境中可远场传播模态的水平波数与声速剖面间的关系, 提出角度域子空间的估计方法, 该方法只需要海底声速和沉积层声速的不确定范围信息, 降低了先验信息的要求, 同时通过波数采样的形式, 避免了对各环境的水平波数的计算, 降低了计算复杂度. 在角度域子空间估计的基础上, 结合子空间检测思想^[12]和广义似然比检测中不确定参数的优化方法^[8], 本文提出了水平阵角度域子空间检测器 (HLA angle-domain subspace detector, HASD). 因为角度域子空间包含了不确定环境信息, 在任意环境参数条件下均能近似完整地利用信号能量, 所以 HASD 在不确定环境中具有一定的稳健性.

受角度域子空间维数变化的影响, HASD 检测概率在水平方位上存在较大的起伏, 使得 HASD 在不同方位的检测中稳健性不足. 本文对影响角度域子空间维数的因素进行分析, 通过将角度域子空间变换到恒定维数的子空间中, 构造了新的角度域子空间, 并提出了 HASD 的稳健形式, 即稳健水平阵角度域子空间检测器 (robust HLA angle-domain subspace detector, RHASD). RHASD 在不确定环境中不同目标方位时均具有稳健的检测性能.

本文其他部分安排如下: 第 2 节结合海洋波导中传播模态的特性, 定义了不确定浅海环境中 HLA 角度域子空间并给出其估计方法; 第 3 节提出了 HASD 检测方法及其稳健改进 RHASD, 分析了两种方法的稳健性; 第 4 节通过仿真实验分析了 HASD 和 RHASD 的检测性能, 并与几种宽容检测方法进行了对比; 第 5 节给出相关结论.

2 不确定浅海环境中 HLA 角度域子空间估计及其有效性量度

2.1 HLA 接收信号模型

在浅海波导环境中, 深度为 z_s 的单频点源与远场 (r_0, z_0) 之间的传递函数可以表示为多阶简正波叠加的形式^[4]:

$$g(\Phi, r_0, z_0) = \frac{e^{j\pi/4}}{\rho(z_s)} \sum_{m=1}^M \psi_m(z_0) \psi_m(z_s) \frac{e^{jk_{rm}r_0}}{\sqrt{k_{rm}r_0}}, \quad (1)$$

式中, Φ 表示海洋环境参数集, 通常包含水体声速剖面、水体深度、水体密度、沉积层声速、基底声速、沉积层密度和吸收系数等海洋环境参数; M 表示该环境下声源激发的传播模态数; k_m 和 ψ_m 分别表示 Φ 条件下第 m 阶传播模态的水平波数和模态函数; ρ 表示水体密度.

布放在 z_a 深度处的 N 元 HLA 各阵元与远场声源间的水平距离可以近似为

$$r_n \approx r_s + (n-1)d \sin \theta_s, \quad (2)$$

式中, r_s 表示阵中心与第 1 号阵元间的水平距离; d 表示阵元间距; θ_s 表示目标方位. 目标声源与 HLA 的空间关系如图 1 所示. 图中 Oxy 表示海平面, z 表示深度, S 表示声源. 将 (2) 式代入 (1) 式, 可以得到 HLA 各阵元与声源间的传递函数:

$$\mathbf{g} = [g(\Phi, r_1, z_a), \dots, g(\Phi, r_N, z_a)]^T, \quad (3)$$

式中, \mathbf{g} 为 $N \times 1$ 维列向量, 上标 T 表示转置. 那么, HLA 的频域接收模型可以表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{s} + \mathbf{n} = \mathbf{g}a_0 + \mathbf{n}, \quad (4)$$

式中, \mathbf{r} , \mathbf{s} , \mathbf{n} 均为 $N \times 1$ 维列向量, 分别表示阵列接收数据、声源辐射信号和背景噪声; a_0 表示目标

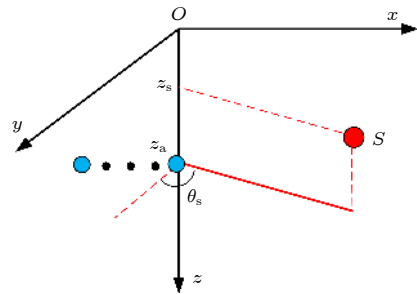


图 1 目标声源与 HLA 空间位置关系

Fig. 1. Geometric relationship between target sound source and HLA space.

声源的复幅度. 假设背景噪声为空间白噪声, 服从 $\mathbf{n} \sim CN(0, 2\sigma^2 \mathbf{I}_N)$, 其中 $2\sigma^2$ 表示单个阵元上的噪声功率. 定义阵列信噪比 SNR 为阵列接收到的信号能量与单个阵元上的噪声功率之比, 其分贝表示形式为 $10 \log_{10}(\|\mathbf{s}\|_2^2 / (2\sigma^2))$, 其中 $\|\cdot\|_2$ 表示向量 $l-2$ 范数.

$$\mathbf{E}(\Phi, \theta_s) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{jk_{r-1}d \sin \theta_s} & e^{jk_{r-2}d \sin \theta_s} & \cdots & e^{jk_{r-M}d \sin \theta_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j(N-1)k_{r-1}d \sin \theta_s} & e^{j(N-1)k_{r-2}d \sin \theta_s} & \cdots & e^{j(N-1)k_{r-M}d \sin \theta_s} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$a_m = a_0 \frac{e^{j\pi/4}}{\rho(z_s)} \psi_m(z_a) \psi_m(z_s) \frac{e^{jk_{rm}r_s}}{\sqrt{k_{rm}r_s}}, \quad (7)$$

$\mathbf{E}(\Phi, \theta_s)$ 为 $N \times M$ 维的 HLA 远场观测矩阵^[3,6], 表示各阵元对 M 阶模态行波的采样^[15]; $\mathbf{a} = [a_1, \cdots, a_M]^T$ 为 $M \times 1$ 维列向量, 表示 HLA 各采样行波的复幅度.

定义不确定海洋环境中的 HLA 角度域子空间 $W(\theta_s)$:

$$W(\theta_s) = \text{Col}(\tilde{\mathbf{E}}(\theta_s)), \quad (8)$$

式中

$$\tilde{\mathbf{E}}(\theta_s) = [\mathbf{E}(\Phi_1, \theta_s), \cdots, \mathbf{E}(\Phi_i, \theta_s), \cdots]. \quad (9)$$

矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}(\theta_s)$ 由不确定海洋环境中所有可能的环境参数集对应的观测矩阵构成, Φ_i 表示第 i 个环境参数集, $\text{Col}(\cdot)$ 表示矩阵的列空间. 不同环境参数条件下, 声源激发的传播模态数可能不同, 设不同环境参数条件下的传播模态数之和为 M_s , 则矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}(\theta_s)$ 的维数为 $N \times M_s$. 显然, 矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}$ 包含了不确定环境中各参数情况下的各阶行波采样情况, 此时, 对于任意环境参数条件下的 \mathbf{s} , 存在与环境参数和目标深度、距离有关的 $M_s \times 1$ 维列向量 $\tilde{\mathbf{a}}$, 使得

$$\mathbf{s} \approx \tilde{\mathbf{E}}(\theta_s) \tilde{\mathbf{a}}, \quad (10)$$

即对于任意环境参数条件和任意目标距离和深度条件, \mathbf{s} 均近似位于目标水平方位角 θ_s 对应的角度域子空间 $W(\theta_s)$ 中.

理想的角度域子空间 $W(\theta_s)$ 需要利用所有可能的环境参数集, 在实际中无法获得, 这使得角度域子空间 $W(\theta_s)$ 难以利用, 因此需要对 $W(\theta_s)$ 进行估计. 图 2 为美国 1993 年 NRL 使用的浅海标准失配测试模型^[4], 图中各参数意义及不确定范围如表 1 所列. 图 2 所示环境为硬海底环境 (沉积层声

2.2 HLA 角度域子空间及其估计

对于浅海波导环境中的远场单频点源, HLA 接收到的声源辐射信号 \mathbf{s} 可以近似表示为^[6]

$$\mathbf{s} \approx \mathbf{E}(\Phi, \theta_s) \mathbf{a}, \quad (5)$$

式中,

速大于水体声速), 水体中声速剖面为负梯度, 根据简正波理论^[4] 中水平波数范围可知, 可远场传播的模态 (陷获于水体中的模态) 对应的水平波数满足 $k_d < k_{rm} < k_b$, 其中, $k_d = 2\pi f/c_d$, $k_b = 2\pi f/c_b$, 分别表示沉积层上表面和海底声速对应的波数. 那么

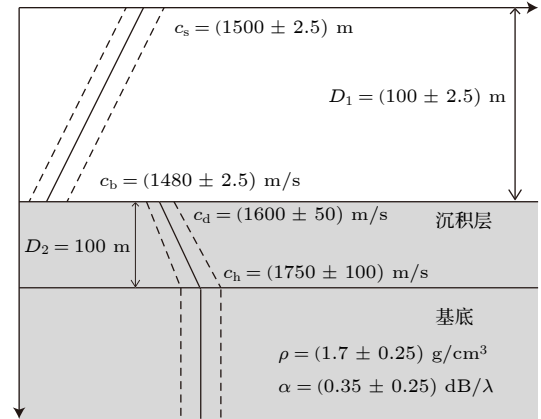


图 2 浅海标准失配测试模型

Fig. 2. Standard mismatch test model in shallow-water.

表 1 浅海标准失配测试模型中参数意义及取值范围

Table 1. The value range of standard mismatch test model.

环境参数/单位	符号	取值范围
海水深度/m	D_1	100 ± 2.5
海面声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	c_s	1500 ± 2.5
海底声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	c_b	1480 ± 2.5
沉积层声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	c_d	1600 ± 50
基底声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	c_h	1750 ± 100
底质密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	ρ	1.7 ± 0.25
底质吸收系数/($\text{dB} \cdot \lambda^{-1}$)	α	0.35 ± 0.25
沉积层厚度/m	D_2	100

可以推知, 不确定环境中传播模态的水平波数满足

$$k_{\min} < k_{rm} < k_{\max}, \quad (11)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s) = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ e^{jk_1 d \sin \theta_s} & \cdots & e^{jk_z d \sin \theta_s} & \cdots & e^{jk_Z d \sin \theta_s} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j(N-1)k_1 d \sin \theta_s} & \cdots & e^{j(N-1)k_z d \sin \theta_s} & \cdots & e^{j(N-1)k_Z d \sin \theta_s} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

$\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 为 $N \times Z$ 维矩阵, $Z > N$, k_z 是第 z 个采样. 可以看出, 矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 与 (6) 式中矩阵 $\mathbf{E}(\Phi, \theta_s)$ 具有类似的结构, 不同是矩阵 $\mathbf{E}(\Phi, \theta_s)$ 的列表征了一个确定环境参数集下的模态, 而矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 的列表征了不确定环境中可能的水平波数. 可以认为, 通过在水平波数范围内的采样, 矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 包含了不确定环境参数信息. 当采样数 $Z \gg M$ 时, 对于任意环境参数条件下的行波采样向量, 矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 中均存在列向量与其近似平行. 此时矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 中各列向量可近似由矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 的列向量线性表示, 即存在矩阵 \mathbf{B} 满足:

$$\tilde{\mathbf{E}}(\theta_s) \approx \tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s) \mathbf{B}. \quad (13)$$

矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 列向量之间的相关性较高, 由文献 [9] 可知, 对矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 奇异值分解, 其中有效秩对应的成分包含了主要信息, 为有效成分, 而余下成分包含的信息可忽略不计, 为冗余成分. 则矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 可以近似表示为

$$\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s) \approx \mathbf{U}(\theta_s) \mathbf{\Lambda}(\theta_s) \mathbf{V}^H(\theta_s), \quad (14)$$

式中, 上标 H 表示共轭转置运算. $\mathbf{U}(\theta_s)$, $\mathbf{\Lambda}(\theta_s)$, $\mathbf{V}(\theta_s)$ 分别表示有效秩 $K(\theta_s)$ 对应的左奇异向量矩阵、奇异值对角矩阵、右奇异向量矩阵. 为了保证子空间投影过程中信号能量损失较小, 有效秩可以由 Frobenius 范数比的平方 ν^2 确定:

$$\nu^2 = \frac{\lambda_1^2 + \cdots + \lambda_{K(\theta_s)}^2}{\lambda_1^2 + \cdots + \lambda_N^2} \geq \nu_0^2, \quad (15)$$

式中, $\lambda_1, \cdots, \lambda_{K(\theta_s)}$ 表示前 $K(\theta_s)$ 个大奇异值, $\lambda_1, \cdots, \lambda_N$ 表示全部 N 个奇异值, ν_0^2 是接近 1 的阈值. 将 (14) 式和 (13) 式代入 (10) 式可得:

$$\mathbf{s} \approx \mathbf{U}(\theta_s) \mathbf{b}, \quad (16)$$

式中, $\mathbf{b} = \mathbf{\Lambda}(\theta_s) \mathbf{V}^H(\theta_s) \mathbf{B} \tilde{\mathbf{a}}$. 显然, HLA 接收到的信号 \mathbf{s} 可以由矩阵 $\mathbf{U}(\theta_s)$ 各列向量线性表示, 将矩

式中, $k_{\min} = 2\pi f / \max\{c_d\}$, $k_{\max} = 2\pi f / \min\{c_b\}$. 在 (k_{\min}, k_{\max}) 中 Z 次等间隔采样并构建矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$,

阵 $\mathbf{U}(\theta_s)$ 张成的 K_{θ_s} 维空间作为角度域子空间的估计,

$$\hat{\mathbf{W}}(\theta_s) = \text{Col}(\mathbf{U}(\theta_s)), \quad (17)$$

其中, $\mathbf{U}(\theta_s)$ 的列向量为 $\hat{\mathbf{W}}(\theta_s)$ 的一组标准正交基. 结合 (11) 式和 (12) 式可知, $\hat{\mathbf{W}}(\theta_s)$ 与 c_b 和 c_d 之外的海洋环境参数无关, 降低了对先验信息的要求. 同时, 波数采样的方式避免了求解不同环境参数对应的水平波数, 降低了实现复杂度.

2.3 有效性量度

将 HLA 接收数据正交投影至 $\hat{\mathbf{W}}(\theta_s)$, 损失的能量为 $\|(\mathbf{I} - \mathbf{U}(\theta_s) \mathbf{U}^H(\theta_s)) \mathbf{s}\|_2^2$. 当信号能量损失较低时, 相应的可利用的信号能量较高, 表明 $\hat{\mathbf{W}}(\theta_s)$ 是有效的. 文献 [13] 定义了相对信号能量损失 (relative signal-energy loss, RSL), 这里使用这个量度量 $\hat{\mathbf{W}}(\theta_s)$ 的有效性:

$$\text{RSL}(\theta_s) = 1 - \frac{\|\mathbf{P} \mathbf{s}\|_2^2}{\|\mathbf{s}\|_s^2}, \quad (18)$$

式中, $\mathbf{P} = \mathbf{U}(\theta_s) \mathbf{U}^H(\theta_s)$, 表示 $\hat{\mathbf{W}}(\theta_s)$ 的正交投影矩阵; $\text{RSL}(\theta_s)$ 表示 \mathbf{s} 正交投影至 $\hat{\mathbf{W}}(\theta_s)$ 过程中损失的信号能量与总信号能量的比值, 值域为 $[0, 1]$. $\text{RSL}(\theta_s) = 0$ 时, 表明投影过程中无信号能量损失; $\text{RSL}(\theta_s) = 1$ 时, 表明投影过程中信号能量完全损失. 当 c_b 和 c_d 的先验信息准确且 Z 足够大时, 任意环境参数条件下均能满足 $\text{RSL}(\theta_s) \approx 0$, 此时 $\hat{\mathbf{W}}(\theta_s)$ 在不确定环境中具有较高的有效性.

3 HLA 角度域子空间检测方法及其稳健改进形式

3.1 HLA 角度域子空间检测方法

对不确定浅海环境中的远场单频点源检测问题, 可以建立频域检测模型:

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_0: \mathbf{r} &= \mathbf{n}, \\ \mathcal{H}_1: \mathbf{r} &= \mathbf{s} + \mathbf{n}.\end{aligned}\quad (19)$$

(19) 式描述了一个二元假设检验问题, \mathcal{H}_0 为 0 假设, 表示只存在噪声; \mathcal{H}_1 为备选假设, 表示存在信号和噪声.

根据角度域子空间的分析可知, HLA 接收到的声源辐射信号 \mathbf{s} 近似地位于 $\hat{W}(\theta_s)$ 中, 将 (16) 式代入 (19) 式, 则两种假设下的似然函数为

$$\begin{aligned}p(\mathbf{r}|\mathcal{H}_0) &= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^N} \exp[-\mathbf{r}^H \mathbf{r} / (2\sigma^2)], \\ p(\mathbf{r}|\mathcal{H}_1, \theta_s, \mathbf{b}) &= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^N} \exp[-(\mathbf{r} - \mathbf{U}(\theta_s)\mathbf{b})^H \\ &\quad \times [\mathbf{r} - \mathbf{U}(\theta_s)\mathbf{b}] / (2\sigma^2)].\end{aligned}\quad (20)$$

两种假设下的条件似然比可以写为

$$L(\mathbf{r}) = \frac{p(\mathbf{r}|\mathcal{H}_1, \theta_s, \mathbf{b})}{p(\mathbf{r}|\mathcal{H}_0)}.\quad (21)$$

检测过程中目标方位往往是不确定的, 故 θ_s 是未知参量. 由前文 $\hat{W}(\theta_s)$ 的推导过程可知, \mathbf{b} 与目标位置及环境参数有关, 故 \mathbf{b} 同样为未知参量. 分两步分别求得 \mathbf{b} 和 θ_s 的最大似然估计值:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{b}} &= \mathbf{U}^H(\theta_s)\mathbf{r}, \\ \hat{\theta}_s &= \arg \max_{\theta \in C} p(\mathbf{r}|\mathcal{H}_1, \theta, \hat{\mathbf{b}}),\end{aligned}\quad (22)$$

式中, θ 是搜索参量, $C = [-90^\circ, 90^\circ]$ 为 θ 的搜索区间. 将 (22) 式代入 (21) 式并取自然对数, 在此基础上, 本文提出 HASD, 其检验统计量为

$$T_H(\mathbf{r}) = \ln L(\mathbf{r}) = \max_{\theta \in C} \frac{\|\mathbf{U}^H(\theta)\mathbf{r}\|_2^2}{2\sigma^2},\quad (23)$$

式中, $T_H(\mathbf{r})$ 表示 C 范围内, 接收数据在角度域子空间 $\hat{W}(\theta)$ 上的正交投影能量与噪声功率的最大比值.

HASD 的检验统计量在两种假设下分别为

$$\begin{aligned}T_H(\mathbf{r})|\mathcal{H}_0 &= \max_{\theta \in C} \frac{\|\mathbf{U}^H(\theta)\mathbf{n}\|_2^2}{2\sigma^2}, \\ T_H(\mathbf{r})|\mathcal{H}_1 &= \max_{\theta \in C} \frac{\|\mathbf{U}^H(\theta)(\mathbf{s} + \mathbf{n})\|_2^2}{2\sigma^2}.\end{aligned}\quad (24)$$

将 \mathcal{H}_1 假设下的检验统计量改写为

$$T_H(\mathbf{r})|\mathcal{H}_1 = \max_{\theta \in C} \{l(\theta)\},\quad (25)$$

式中 $l(\theta)$ 满足

$$2l(\theta) = \frac{\|\mathbf{U}^H(\theta)(\mathbf{s} + \mathbf{n})\|_2^2}{\sigma^2} \sim \chi_{2K(\theta)}'^2(\beta(\theta)),\quad (26)$$

式中 $K(\theta)$ 为角度域子空间 $\hat{W}(\theta)$ 的维数, $\chi_{2K(\theta)}'^2(\beta(\theta))$ 表示自由度为 $2K(\theta)$ 的非中心化卡方分布, 非中心化参量

$$\beta(\theta) = \frac{\|\mathbf{U}^H(\theta)\mathbf{s}\|_2^2}{\sigma^2}\quad (27)$$

与接收信号 \mathbf{s} 在角度域子空间 $\hat{W}(\theta)$ 中的正交投影能量成正比. 结合 (18) 式, 将 (27) 式表示为

$$\beta(\theta) = (1 - \text{RSL}(\theta)) \frac{\|\mathbf{s}\|_2^2}{\sigma^2},\quad (28)$$

式中, $\text{RSL}(\theta)$ 表示 \mathbf{s} 正交投影至 $\hat{W}(\theta)$ 的相对能量损失. 结合 (25) 式、(21) 式、(28) 式可以看出, HASD 的检测性能受 $\{\text{RSL}(\theta)|\theta \in C\}$ 和阵列信噪比 $\|\mathbf{s}\|_2^2/(2\sigma^2)$ 的影响.

由第 2 节分析可知, 当 $\theta = \theta_s$, 任意环境参数条件下 $\text{RSL}(\theta) \approx 0$. 而当 θ 逐渐远离 θ_s , $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta)$ 的列向量与 $\tilde{\mathbf{E}}'(\theta_s)$ 的列向量间相关性迅速下降, $\text{RSL}(\theta)$ 迅速增大至 1. 给定一个接近 0 的量 ϵ , 定义 θ_s 的邻域 $C_1(\theta_s) = \{\theta|\text{RSL}(\theta) < \epsilon\}$, 使非中心化参量满足

$$\beta(\theta) \begin{cases} > 0, & \theta \in C_1(\theta_s), \\ \approx 0, & \theta \notin C_1(\theta_s). \end{cases}\quad (29)$$

将 \mathcal{H}_1 假设下的检验统计量进一步改写为

$$T_H(\mathbf{r})|\mathcal{H}_1 = \max\{T_s, T_n\},\quad (30)$$

式中

$$\begin{aligned}T_s &= \max_{\theta \in C_1(\theta_s)} \{l(\theta)\}, \\ T_n &= \max_{\theta \notin C_1(\theta_s)} \{l(\theta)\}.\end{aligned}\quad (31)$$

T_n 对应的各非中心化参量近似为 0, 没有包含信号信息, 而 T_s 对应的各非中心化参量大于 0, 包含了信号信息, 是影响 $T_H(\mathbf{r})|\mathcal{H}_1$ 的主要因素.

假设阵列接收信噪比和目标方位不变, 当环境参数改变, $C_1(\theta_s)$ 变化较小, T_s 和 T_n 分布的变化较小, 表明 HASD 的检测性能在不同环境参数条件下具有一定的稳健性. 而当目标方位由 $\pm 90^\circ$ 趋近 0° , 矩阵 $\tilde{\mathbf{E}}'$ 列向量间相关性上升导致 $\hat{W}(\theta_s)$ 的维数 $K(\theta_s)$ 减小. 而 $K(\theta_s)$ 减小使 T_s 中各卡方分布的自由度减小, 导致 T_s 的右尾概率降低, 进一步使 $T_H(\mathbf{r})|\mathcal{H}_1$ 的右尾概率降低, 导致 HASD 的检测概率降低. 这意味着即使接收信噪比不变时, HASD 的检测概率仍随目标方位起伏, 影响检测过程中的稳健性.

3.2 稳健改进形式

为了使 HASD 的检测概率不随目标方位起伏, 从而获得稳健的检测性能, 需要构造维数恒定的角度域子空间. 观察 (12) 式, 参数集 $\{k_i \sin \theta_s\}_{i=1}^Z$ 的值域宽度 $|(k_{\max} - k_{\min}) \sin \theta_s|$ 随 θ_s 变化, 导致 $K(\theta_s)$ 随之变化. 构造区间 $[\Delta_1, \Delta_2]$, 通过平移量 δ_{θ_s} 将参数集 $\{k_i \sin \theta_s\}_{i=1}^Z$ 平移至该确定区间中, 对应的矩阵变换关系将使 $\hat{W}(\theta_s)$ 变换到区间 $[\Delta_1, \Delta_2]$ 对应的空间中. 区间 $[\Delta_1, \Delta_2]$ 对应的空间是一个固定的空间, 那么通过矩阵间线性关系即可得到所求维数恒定的角度域子空间.

参数集 $\{k_i \sin \theta_s\}_{i=1}^Z$ 值域宽度在 $\theta_s = \pm\pi/2$ 时达到最大值 $k_{\max} - k_{\min}$. 为了满足 $\Delta_2 - \Delta_1 \geq k_{\max} - k_{\min}$, 同时保证新的角度域子空间维数不大于 $\hat{W}(\theta_s)$ 维数的最大值, 选取 $\Delta_1 = (k_{\min} - k_{\max})/2$, $\Delta_2 = (k_{\max} - k_{\min})/2$, 此时平移量 $\delta_{\theta_s} = (k_{\max} + k_{\min}) \sin \theta_s / 2$ 即可将参数集平移到 $[\Delta_1, \Delta_2]$ 中.

将参数平移过程表示为矩阵形式, 即对矩阵 $\tilde{E}'(\theta_s)$ 左乘 $N \times N$ 维的对角阵 $A(\theta_s)$:

$$A(\theta_s) = \text{diag}\{1, e^{j\delta_{\theta_s}d}, \dots, e^{j(N-1)\delta_{\theta_s}d}\}, \quad (32)$$

得到 $N \times Z$ 维矩阵

$$A(\theta_s)\tilde{E}'(\theta_s) = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ e^{j(k_1 \sin \theta_s + \delta_{\theta_s})d} & \dots & e^{j(k_i \sin \theta_s + \delta_{\theta_s})d} & \dots & e^{j(k_Z \sin \theta_s + \delta_{\theta_s})d} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j(N-1)(k_1 \sin \theta_s + \delta_{\theta_s})d} & \dots & e^{j(N-1)(k_i \sin \theta_s + \delta_{\theta_s})d} & \dots & e^{j(N-1)(k_Z \sin \theta_s + \delta_{\theta_s})d} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

此时

$$\forall \theta_s: \{k_i \sin \theta_s + \delta_{\theta_s}\}_{i=1}^Z \in [\Delta_1, \Delta_2], \quad (34)$$

表明平移后的参数集 $\{k_i \sin \theta_s + \delta_{\theta_s}\}_{i=1}^Z$ 均在同一个区间 $[\Delta_1, \Delta_2]$ 中. 取 $\theta_s = \pi/2$, 令 $k'_i = k_i + \delta_{\theta_{\pi/2}}$, $F = A(\delta_{\theta_{\pi/2}})\tilde{E}'(\theta_s)$,

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ e^{jk'_1d} & \dots & e^{jk'_id} & \dots & e^{jk'_Zd} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j(N-1)k'_1d} & \dots & e^{j(N-1)k'_id} & \dots & e^{j(N-1)k'_Zd} \end{bmatrix}, \quad (35)$$

式中, k'_i 的值域为 $[\Delta_1, \Delta_2]$. 结合 (34) 式可知, 对于任意 θ_s , 存在矩阵 B_F , 满足

$$A(\theta_s)\tilde{E}'(\theta_s) \approx FB_F. \quad (36)$$

类比 (14) 式, 将矩阵 F 近似表示为

$$F \approx U_F \Lambda_F V_F^H, \quad (37)$$

式中, Λ_F , U_F 和 V_F 分别表示有效秩 K_F 对应的奇异值矩阵和奇异向量矩阵. 将 (37) 式、(36) 式和 (13) 式代入 (10) 式可得:

$$s \approx A(-\theta_s)U_F b_F, \quad (38)$$

式中, $b_F = \Lambda_F V_F^H B_F B \tilde{a}$. 由 (38) 式可知, s 近似地位于 $A(-\theta_s)U_F$ 的列空间 $\text{Col}(A(-\theta_s)U_F)$ 中. 因

为矩阵 $A(-\theta_s)$ 为对角阵, 矩阵 U_F 由 K_F 个互相正交的单位向量构成, 且 $(A(-\theta_s)U_F)^H(A(-\theta_s)U_F) \equiv I_{K_F}$, 所以 $\text{Col}(A(-\theta_s)U_F)$ 的维数恒为 K_F , $\text{Col}(A(-\theta_s)U_F)$ 即为所求角度域子空间 $\hat{W}_R(\theta_s)$:

$$\hat{W}_R(\theta_s) = \text{Col}(A(-\theta_s)U_F). \quad (39)$$

$\hat{W}_R(\theta_s)$ 的有效性也可以用 $\text{RSL}(\theta_s)$ 度量, $\text{RSL}(\theta_s)$ 中的正交投影矩阵由 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 的正交投影矩阵 $P = A(-\theta_s)U_F U_F^H(\theta_s)A(\theta_s)$ 替换.

用 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 替换 $\hat{W}(\theta_s)$, 类比 HASD 检验统计量的推导过程, 提出 RHASD, 其检验统计量为

$$T_R(r) = \max_{\theta \in C} \frac{\|U_F^H A(\theta)r\|_2^2}{2\sigma^2}, \quad (40)$$

式中, $U_F^H A(\theta)r$ 表示将 r 正交投影至 $\hat{W}_R(\theta)$ 中, 也可以看作是先通过对角阵 $A(\theta)$ 对接收数据 r 进行相位补偿, 再向 U_F 的列空间正交投影. 因为信号 s 通过补偿后近似落入 U_F 的列空间中, 所以这一过程保证了信号能量又抑制了噪声成分. 类比 HASD 的分析过程可知, 不同环境参数条件下, 投影过程中的信号能量损失均可忽略不计, RHASD 在不确定环境中同样具有一定的稳健性, 同时, 由于 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 的维数不随 θ_s 变化, 因此 RHASD 的检测性能不随 θ_s 起伏.

4 仿真与讨论

本节通过仿真实验, 结合角度域子空间有效性和维数变化, 仿真分析了 HASD 和 RHASD 的平均检测能力、不确定环境中的稳健性、随 θ_s 的起伏特性, 给出了先验信息失配时 RHASD 的性能变化, 并将 RHASD 与不确定环境中的 3 种宽容检测器——蒙特卡罗优化广义似然比检测器 (Monte Carlo-generalized likelihood ratio detector, MC-GLRD)、子空间检测器 (subspace detector, SD)、能量检测器 (energy detector, ED) 进行比较. 仿真实验中不确定浅海环境如图 2 所示, 各参数不确定范围如表 1 所列. 目标声源发射 300 Hz 单频信号, 接收阵为固定布放在海底的 100 元 HLA, 阵元间隔 2.5 m. 由于本文研究的是低频浅海中的远场问题, 因此仿真过程中不同环境条件下模态函数和水平波数由 KRAKEN 软件进行计算, 具体声场均由 (1) 式计算获得.

4.1 角度域子空间有效性分析

在表 1 所列不同海洋环境参数的取值范围内采样 1000 次, 得到 1000 个不同的环境参数实现. 在 1000 个环境参数条件下, 可远场传播的模态数如图 3(a) 所示, 可以看出, 目标激发出的可远场传播的模态数是不同的, 这意味着 HLA 能采样到的行波信息也是不同的. 已知海底声速和沉积层上表面声速的不确定范围时, 可以得到海底声速的最小值 $\min\{c_b\} = 1477.5$ m/s, 沉积层上表面的最大值 $\max\{c_d\} = 1650$ m/s. 此时, 估计角度域子空间所需的两个波数值 $k_{\min} = 1.14$, $k_{\max} = 1.28$. 图 3(a) 中各模态对应的水平波数值均在 k_1 和 k_2 之间, 如图 3(b) 所示. 在 (k_1, k_2) 内等间隔采样, 采样间隔为 0.001, 按照 (12) 式、(14) 式和 (17) 式, 选取 $\nu^2 = 0.9995$, 得到不同 θ_s 对应的角度域子空间 $\hat{W}(\theta_s)$. 给定 $\Delta_1 = (k_{\min} - k_{\max})/2$, $\Delta_2 = (k_{\max} - k_{\min})/2$, $\delta_s = -(k_{\min} + k_{\max})/2$, 按照 (35) 式、(37) 式和 (39) 式可以得到稳健角度域子空间 $\hat{W}_R(\theta_s)$. $\hat{W}(\theta_s)$ 和 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 的维数如图 4 所示, 图中理想的角

略小于 $W(\theta_s)$ 的维数. 而 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 的维数在各 θ_s 相同, 等于 $W(\theta_s)$ 的最大维数.

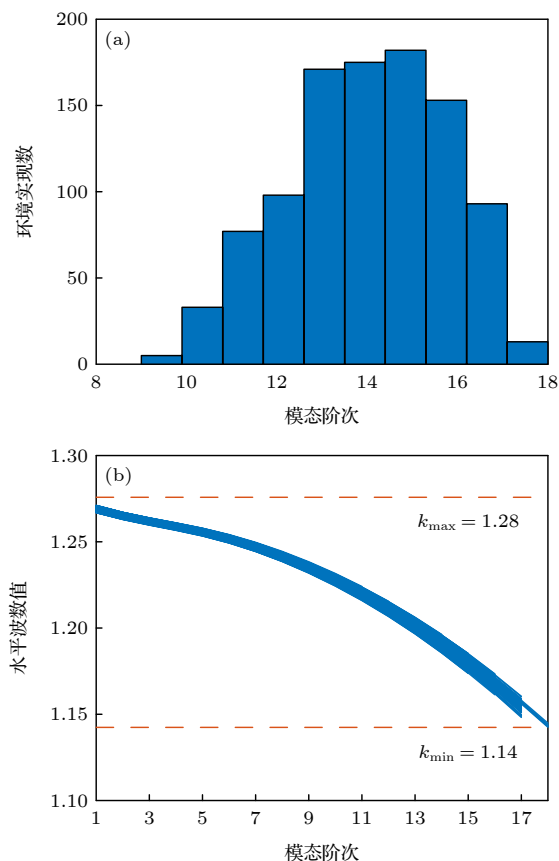


图 3 1000 个环境参数实现下传播模态的水平波数 (a) 传播模态阶数; (b) 水平波数

Fig. 3. Horizontal wave numbers of propagating modes in 1000 environmental realizations: (a) Numbers of propagating modes; (b) wave numbers.

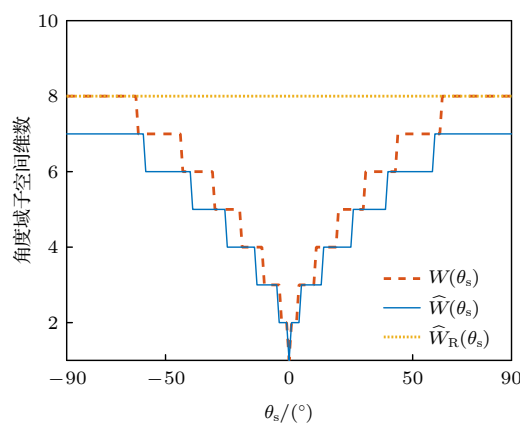


图 4 不同水平方位角对应的角度域子空间维数

Fig. 4. Subspace dimensions of angle-domain corresponding to different horizontal azimuth angles.

$\hat{W}(\theta_s)$ 和 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 在空间不同角度和距离处的有效性如图 5 所示, 图中每个空间点上的 $\text{RSL}(\theta_s)$

是 1000 个不同环境和目标深度条件下 $RSL(\theta_s)$ 的平均. 由图 5(a) 可以看出, 在 5000 m 范围外, 任意空间处均满足 $RSL(\theta_s) \approx 0$, 表明 $\hat{W}(\theta_s)$ 在远场有效性较高; 而在 5000 m 范围内且 θ_s 趋近 0° 时, $RSL(\theta_s) \approx 1$, 这是由于当目标位于该区域时, 目标与各阵元间的连线和 HLA 法线的夹角不能近似等于 θ_s , 即不能满足 (5) 式和 (6) 式, 此时 $\hat{W}(\theta_s)$ 在该范围内失效. 对于 $\hat{W}_R(\theta_s)$, 图 5(b) 表明 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 在 2000 m 范围外的任意空间处均有效. 对比图 5(a) 和图 5(b), $\hat{W}_R(\theta_s)$ 的有效范围更大, 这是由于 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 在 θ_s 趋近 0° 时维数远大于 $\hat{W}(\theta_s)$, 包含了更多的信号信息.

由第 3 节分析可知, HASD 和 RHASD 分别

在 $\hat{W}(\theta_s)$ 和 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 的有效范围内成立, 即 HASD 和 RHASD 适用于远场检测问题.

4.2 HASD 和 RHASD 在不确定环境中的稳健性

考虑图 2 所示不确定环境中的两个实现, 具体参数如表 2 所列. 在这两个环境实现中, 目标激发的可远场传播模态数分别为 12 和 18, 对应的水平波数如图 6(a) 所示. 显然, 由于环境 1 对应的沉积层上表面声速接近表 1 中不确定范围的最小值, 而环境 2 对应的沉积层上表面声速接近不确定范围的最大值, 故环境 1 中传播模态的数目较环境 2 中少. 当目标深度 $z_s = 50$ m, 水平距离 $r_s = 6000$ m, 水平方位角 $\theta_s = 40^\circ$ 时, HLA 采样到的各阶模态行

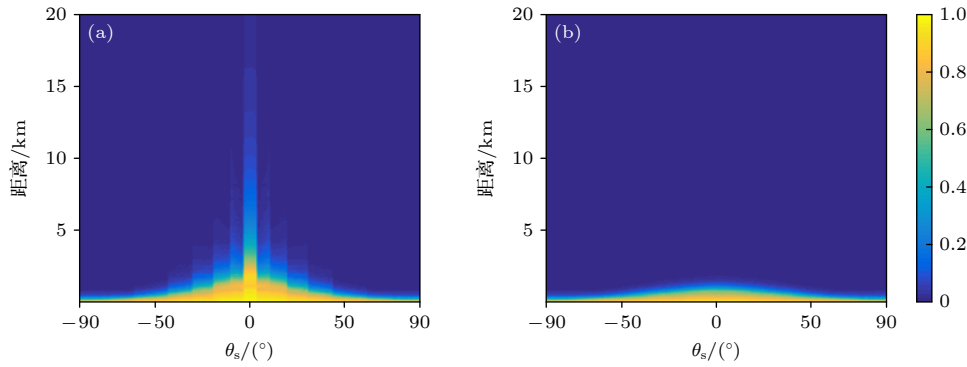


图 5 角度域子空间在不同空间位置处的有效性 (a) $\hat{W}(\theta_s)$; (b) $\hat{W}_R(\theta_s)$

Fig. 5. Validity of angle-domain subspaces at different spatial positions: (a) $\hat{W}(\theta_s)$; (b) $\hat{W}_R(\theta_s)$.

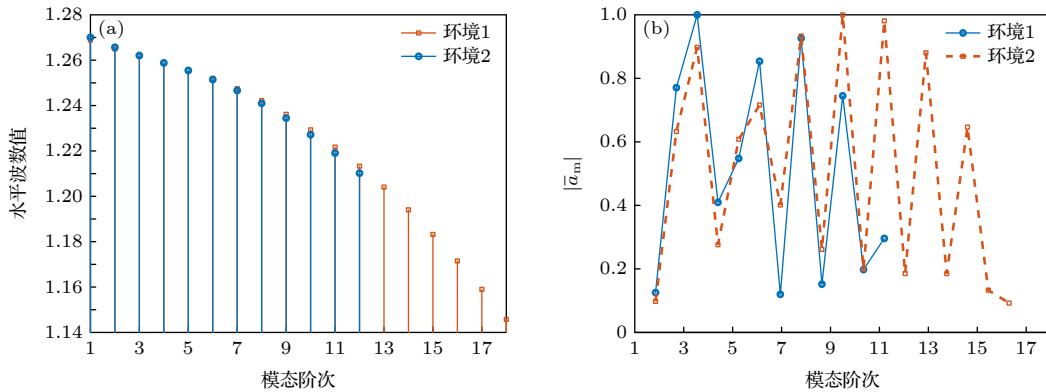


图 6 两个环境实现下的水平波数和 HLA 接收到的归一化行波幅度 (a) 水平波数; (b) 归一化行波幅度

Fig. 6. The horizontal wave numbers and the amplitude of the normalized traveling wave received by HLA in two realizations: (a) Horizontal wave numbers; (b) normalized traveling wave received.

表 2 不确定浅海波导中的两个环境实现

Table 2. Two realizations of the uncertain shallow waveguide.

环境参数	D_1/m	$c_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$c_b/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$c_d/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$c_h/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\alpha/(\text{dB} \cdot \lambda^{-1})$	D_2/m
环境1	98.06	1501.33	1478.21	1552.63	1716.98	1.59	0.25	100
环境2	102.36	1500.58	1480.05	1633.20	1791.55	1.93	0.36	100

波的归一化幅度由图 6(b) 给出. 因为环境 1 中激发的传播模态数少, 所以 HLA 在环境 1 中采样到的行波信息更少.

在两个环境实现中, 将 HLA 接收信号 s 投影到不同 θ 对应的角度域子空间 $\hat{W}(\theta)$ 和 $\hat{W}_R(\theta)$ 中, 得到 $RSL(\theta)$ 曲线如图 7 所示. 由图 7(a) 可以看出, 两条 $RSL(\theta)$ 曲线近似相同, 且均在 $\theta = \theta_s$ 处近似为 0, 对应信号能量损失可忽略不计. 这一现象表明, 尽管在两个环境中 HLA 接收到的信息不同, 角度域子空间 $\hat{W}(\theta)$ 均可以利用到近似全部的信号能量. 结合第 3.1 节可知, 由于信号能量损失可忽略且 $RSL(\theta)$ 曲线近似, 这两个环境实现下 HASD 应具有接近的检测性能, 此时 HASD 检测概率只与阵列信噪比有关. HASD 在两个环境中的检测概率如图 8(a) 所示, 图中 SNR 为阵列信噪比的分贝形式, 虚警概率 $P_f = 0.1$, 每个 SNR 点上的检测概率 P_d 由 10000 次独立试验计算获得. 可以看出, HASD 在各 SNR 点上的检测概率在两个环境实现下近似,

检测概率仅有 0.2 的差异. 图 7(b) 和图 7(a) 类似, 角度域子空间 $\hat{W}_R(\theta)$ 中同样可以利用到近似全部的信号能量, 对应两个环境实现下的 RHASD 检测性能同样只与阵列信噪比有关. 如图 8(b) 所示, RHASD 的检测概率差异不足 0.01.

为了进一步验证 HASD 和 RHASD 的检测性能在不确定环境中具有稳健性, 给出 1000 个不同环境实现下 HASD 和 RHASD 的检测概率, 如图 9 所示. 在图 9(a) 中, HASD 在 1000 个环境参数条件下的 P_d -SNR 曲线均在平均曲线的附近, 对于相同检测概率, HASD 所需 SNR 起伏约为 1 dB; 在相同 SNR 下, 检测概率起伏约为 0.1. RHASD 的检测概率如图 9(b) 所示, 对于固定检测概率, HASD 所需 SNR 起伏约为 0.4 dB; 在相同 SNR 下, 检测概率起伏约为 0.05. 根据前文分析可知, 由于 $\hat{W}(\theta_s)$ 和 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 能包含不同环境条件下 HLA 采集到的信息, 故 HASD 和 RHASD 在不确定环境中均具有一定的稳健性, 其中 RHASD 的稳健性略高于 HASD.

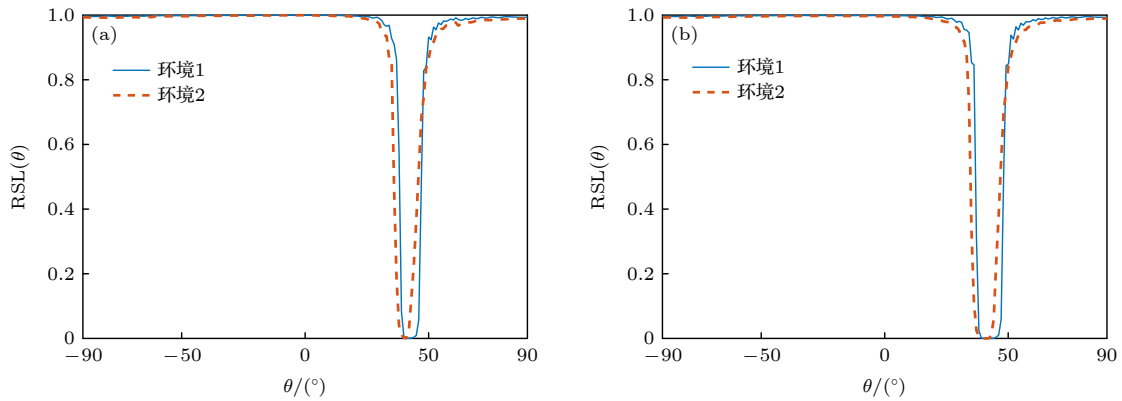


图 7 两个环境实现下的 $RSL(\theta)$ 曲线 (a) $\hat{W}(\theta)$; (b) $\hat{W}_R(\theta)$

Fig. 7. $RSL(\theta)$ in two realizations: (a) $\hat{W}(\theta)$; (b) $\hat{W}_R(\theta)$.

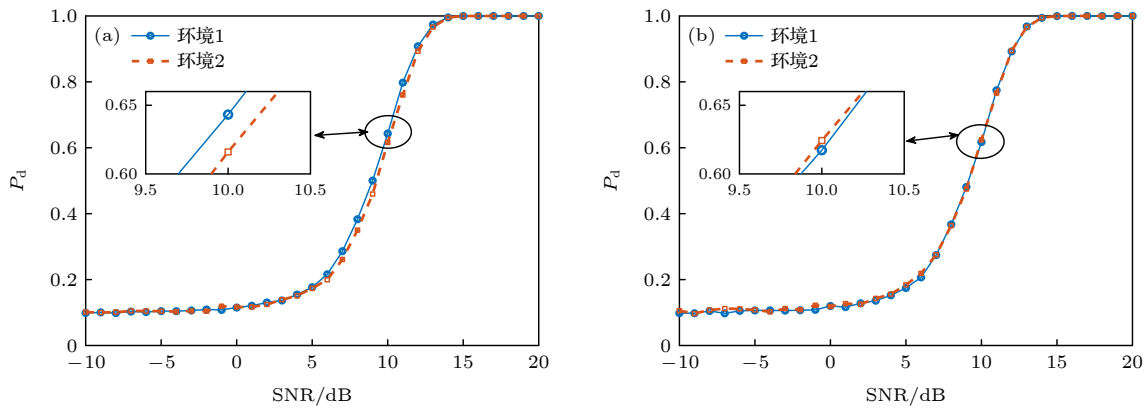


图 8 两个环境参数实现下 HASD 和 RHASD 的检测性能 (a) HASD; (b) RHASD

Fig. 8. Detection performances of HASD and RHASD in two realizations: (a) HASD; (b) RHASD.

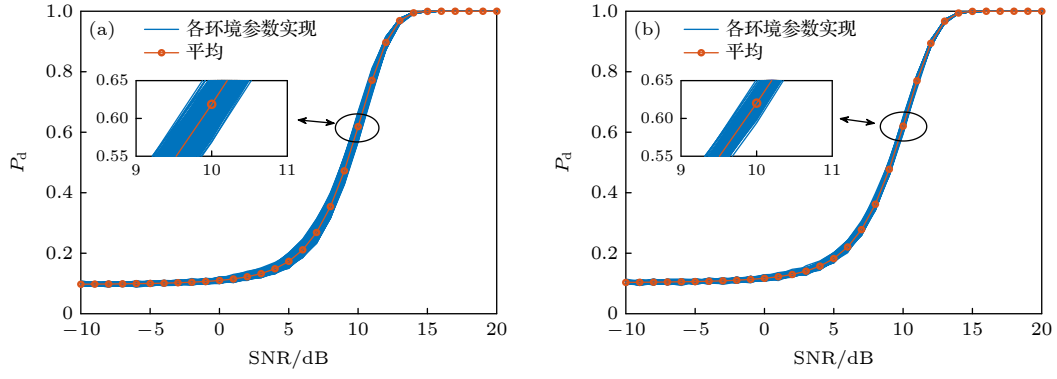


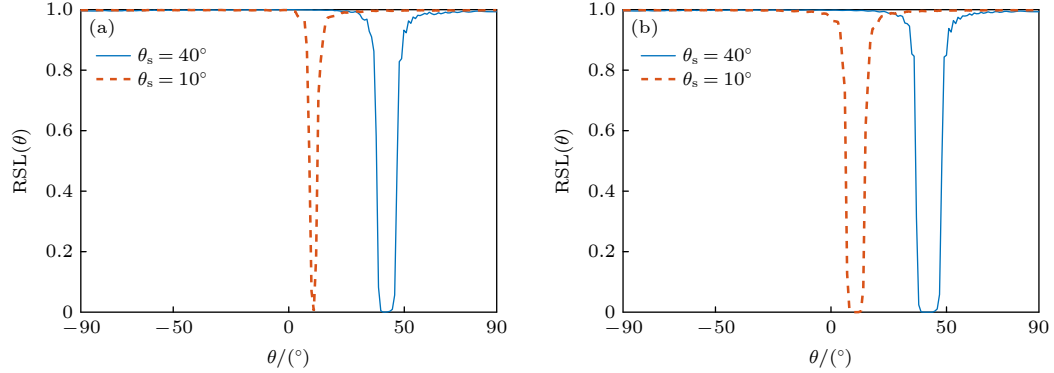
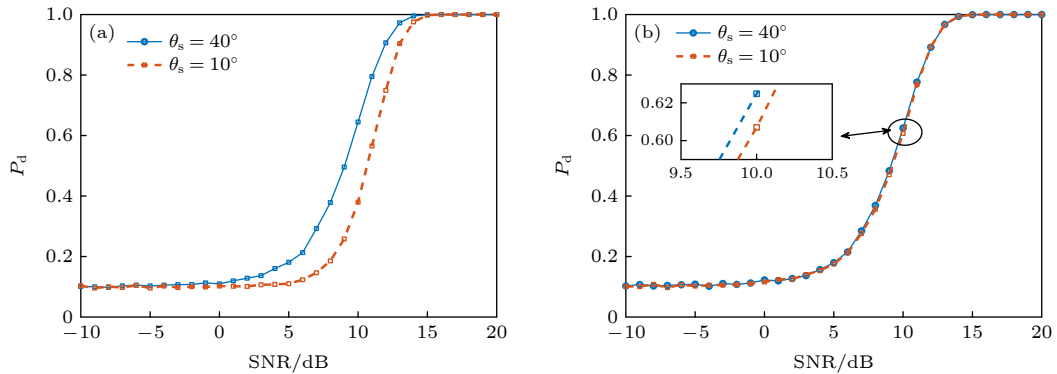
图 9 1000 个环境参数实现下 HASD 和 RHASD 的检测性能 (a) HASD; (b) RHASD

Fig. 9. Detection performances of HASD and RHASD in 1000 realizations: (a) HASD; (b) RHASD.

4.3 HASD 和 RHASD 检测性能随目标方位起伏特性分析

假设环境参数为表 2 中所列的环境 1, 目标的深度和距离仍为 $z_s = 50$ m 和 $r_s = 6000$ m, 目标的水平方位角 θ_s 分别为 40° 和 10° . 此时, \mathbf{s} 投影至角度域子空间 $\hat{W}(\theta)$ 和 $\hat{W}_R(\theta)$ 中, 得到 RSL(θ) 曲线如图 10 所示. 图 10(a) 中, 两条曲线在各自 θ_s 处达到最小值, 此时 $\theta_s = 40^\circ$ 的邻域范围 $C_1(\theta_s) = [39^\circ, 46^\circ]$, 结

合图 4 可知, 在 $C_1(\theta_s)$ 范围内 $\hat{W}(\theta)$ 的维数为 6, 而 $\theta_s = 10^\circ$ 的邻域范围 $C_1(\theta_s) = [10^\circ, 11^\circ]$, 对应维数为 3 和 4. 根据 3.1 节分析可知, 目标位于 $\theta_s = 10^\circ$ 时 HASD 的检测概率会小于目标位于 $\theta_s = 40^\circ$ 时对应的 HASD 的检测概率. 给出 HASD 在不同 SNR 时 HASD 的检测概率如图 11(a) 所示, 在 SNR = 0—15 dB 条件下, $\theta_s = 40^\circ$ 时 HASD 的检测概率均大于 $\theta_s = 10^\circ$ 时的检测概率. 而在图 10(b)

图 10 目标分别位于 40° 和 10° 的 RSL(θ) 曲线 (a) $\hat{W}(\theta)$; (b) $\hat{W}_R(\theta)$ Fig. 10. RSL(θ) when the source bearing are at 40° and 10° : (a) $\hat{W}(\theta)$; (b) $\hat{W}_R(\theta)$.图 11 目标分别位于 40° 和 10° 时 HASD 和 RHASD 的检测性能 (a) HASD; (b) RHASDFig. 11. Detection performances of HASD and RHASD when the source bearing are at 40° and 10° : (a) HASD; (b) RHASD.

中, $\theta_s = 40^\circ$ 的邻域范围 $C_1(\theta_s) = [38^\circ, 47^\circ]$, $\theta_s = 10^\circ$ 的邻域范围 $C_1(\theta_s) = [7^\circ, 14^\circ]$, 由于 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 的维数恒定, 故这两个邻域对应维数均为 8. 此时 RHASD 的检测概率如图 11(b) 所示, 目标在不同方位上时 RHASD 具有近似的检测概率. 由上文分析可知, 受角度域子空间 $\hat{W}(\theta_s)$ 维数变化的影响, HASD 的检测概率随目标方位起伏, 而 RHASD 利用了维数恒定的角度域子空间 $\hat{W}_R(\theta_s)$, 其检测概率不随目标方位起伏.

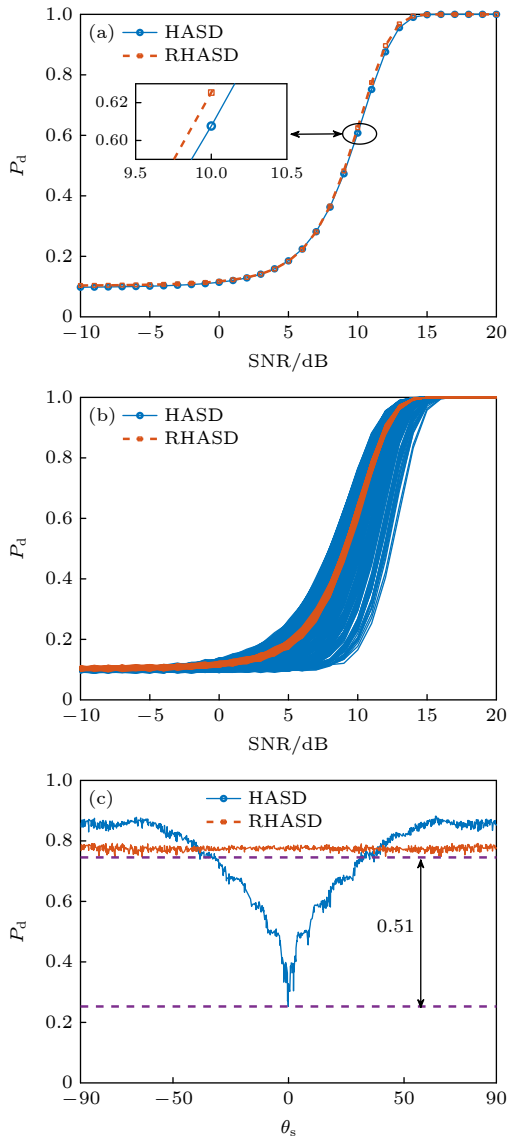


图 12 不同目标位置和环境参数条件下 HASD 和 RHASD 的检测性能 (a) 平均检测性能; (b) 各参数条件下检测性能; (c) 检测概率随目标方位起伏

Fig. 12. Detection performances of HASD and RHASD in different environments and source positions: (a) Average detection performance; (b) detection performance in different realizations; (c) detection probability fluctuates with the target bearing.

为了进一步比较 HASD 和 RHASD 在目标位置变化和环境参数变化时的检测性能, 随机选取 1000 个不同的目标位置, 结合 1000 个不同环境参数实现, 构成了 1000 个检测过程. 其中, 为了保证 HASD 和 RHASD 的适用性, 需要满足目标位置在 $\hat{W}(\theta_s)$ 和 $\hat{W}_R(\theta_s)$ 的有效范围内, 结合图 5, 设目标深度、水平距离、水平方位角在 1—100 m, 5—20 km, -90° — 90° 范围内. 这 1000 个检测过程中, HASD 和 RHASD 的平均检测性能如图 12(a) 所示, 在不同目标位置和环境参数条件下, HASD 和 RHASD 具有接近相同的检测概率. 这 1000 个检测过程对应的不同 P_d -SNR 曲线, 如图 12(b) 所示, HASD 在相同检测概率条件下, 对 SNR 的需求差异在 4 dB 以上, 而 RHASD 仅为 0.5 dB, 即 RHASD 显著地提高了 HASD 的稳健性. 在 SNR = 11 dB 时, 给出两种检测器的检测概率随 θ_s 的变化, 如图 12(c) 所示. 图 12(c) 中, θ_s 由 $\pm 90^\circ$ 到 0° 时, HASD 检测概率下降, 而在相同 θ_s 上检测概率近似相同, 表明 HASD 的检测概率随 θ_s 明显起伏, 而受环境参数、目标深度距离变化的影响不大. 而 RHASD 在 1000 个检测过程中检测概率近似相同, 其最低检测概率比 HASD 的最低检测概率高达 0.51. 结合图 12 中 3 个图示可知, RHASD 具有和 HASD 近似相同的平均检测概率, 同时稳健性远高于 HASD.

4.4 RHASD 与 MC-GLRD, SD, ED 性能比较

由于 RHASD 具有和 HASD 近似相同的平均性能, 同时较 HASD 更为稳健, 故将 RHASD 作为本文最终得到的稳健检测器, 与常用宽容检测方法, 即 MC-GLRD, SD, ED 进行比较. 为了更好地比较在同样条件下的检测性能, 仿真中设 MC-GLRD 的参数搜索数为 1000, 以达到和 RHASD 接近的计算量. SD 方法所需的信号特征子空间由 1000 个环境参数对应的信号波前矩阵估计.

随机选取 1000 个不同的目标位置, 结合 1000 个不同环境参数实现, 构成了 1000 个检测过程. 4 种检测器的平均检测概率如图 13 所示. 由于 ED 没有利用任何先验信息, 在各信噪比条件下平均检测概率是 4 种检测器中最低的. MC-GLRD 利用了所有参数的不确定范围, 在各信噪比条件下具有最高的平均检测概率. SD 与 MC-GLRD 利用

的先验信息相同,但由于HLA的信号特征子空间维数此时为100,退化为能量检测器,故各信噪比条件下平均检测概率与ED一致.本文提出的RHASD只利用了海水中的海底声速和沉积层上表面声速的不确定范围,在各信噪比条件下平均检测概率高于SD和ED,相同信噪比条件下信噪比要求低于SD达2 dB,高于MC-GLRD约0.5 dB.选取 $\text{SNR} = 11 \text{ dB}$,给出1000次实现下的4个方法的检测概率如图13(b)所示.在接近的计算量条件下,MC-GLRD由于其本身的特性,会出现检测概率明显下降的情况,稳健性较低.RHASD的检测概率在各参数条件下近似一致,具有与SD和ED相近的稳健性,同时比SD检测概率高约0.3.综上所述, RHASD在不确定环境中具有较高的平均检测性能,同时还具有较高的稳健性.

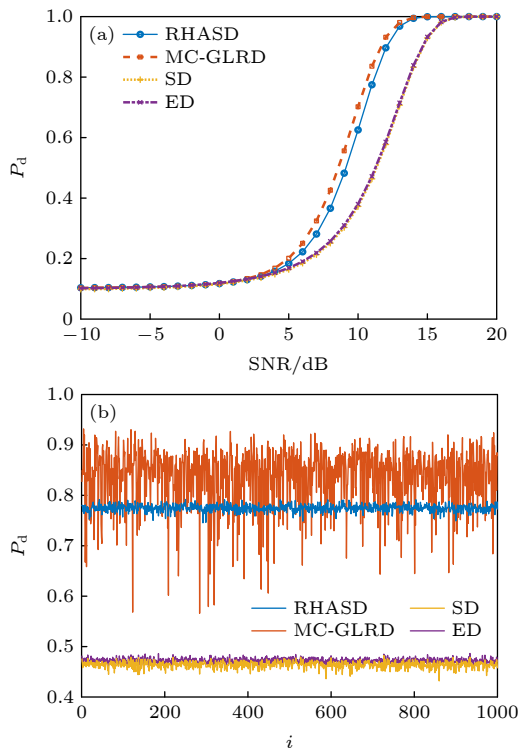


图13 RHASD与MC-GLRD, SD, ED性能对比 (a) 平均检测性能; (b) 不同实现下的检测概率

Fig. 13. Detection performances of HASD, MC-GLRD, SD, ED: (a) Average detection performance; (b) detection probability in different realizations.

5 结 论

本文定义了不确定环境中的角度域子空间并给出了一个先验信息要求少、计算复杂度低的估计

方法,提出了角度域子空间检测器HASD.在此基础上,构造了维数恒定的角度域子空间并得到了HASD的稳健形式RHASD.

通过仿真实验分析了角度域子空间的有效性和HASD和RHASD在不同环境参数和目标位置处的检测性能,结果表明:1) 角度域子空间在远场有效性高,故HASD和RHASD适用于远场条件;2) HASD和RHASD在不确定环境参数中具有一定的稳健性;3) HASD的检测性能随目标方位的变化而起伏;4) RHASD与HASD平均检测性能近似一致,同时改善了HASD性能随目标方位起伏的问题.将RHASD和常用的宽容检测器进行仿真对比,仿真结果表明RHASD平均检测能力略低于MC-GLRD,但平均性能远高于SD方法和ED方法;其稳健性与ED近似,高于MC-GLRD方法.

参考文献

- [1] Porter M B 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **2** 161
- [2] Li J, Stoica P, Wang Z 2004 *IEEE Trans. Signal Process.* **52** 2407
- [3] Yi F, Sun C, Bai X H 2013 *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.* **43** 174 (in Chinese) [易锋, 孙超, 白晓慧 2013 中国科学: 物理学力学天文学 **43** 174]
- [4] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B 2011 *Computational Ocean Acoustics* (New York: Springer Science and Business Media) pp337-360
- [5] Zhang T W, Yang K D, Ma Y L, Li X G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3294 (in Chinese) [张同伟, 杨坤德, 马远良, 黎雪刚 2010 物理学报 **59** 3294]
- [6] Conan E, Bonnel J, Nicalas B 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **142** 2276
- [7] Sha L, Nolte L W 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **117** 1942
- [8] Liu Z W, Sun C, Lv L G 2015 *Acta Acustica* **40** 5949 (in Chinese) [刘宗伟, 孙超, 吕连港 2015 声学学报 **40** 5949]
- [9] 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]
- [10] Li M, Sun C, Willett P 2018 *IEEE J. Ocean Eng.* **43** 131
- [11] Li M Y 2019 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [李明杨 2019 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [12] Kong D Z, Sun C, Li M Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 164301 (in Chinese) [孔德智, 孙超, 李明杨 2020 物理学报 **69** 164301]
- [13] Wang X, Sun C, Li M Y 2020 *J. Northwestern Polytechnical University* **38** 1171 (in Chinese) [王宣, 孙超, 李明杨 2020 西北工业大学学报 **38** 1171]
- [14] Hari V N, Anand G V, Permkumar A B 2013 *Digital Signal Process.* **23** 1645
- [15] 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]

Detection by angle-domain subspace with horizontal array in uncertain shallow-water environment^{*}

Wang Xuan¹⁾²⁾ Sun Chao^{1)2)†} Li Ming-Yang³⁾ Zhang Shao-Dong¹⁾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*)

3) (*College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*)

(Received 18 September 2021; revised manuscript received 9 December 2021)

Abstract

The uncertainties of environmental parameters affect the robustness of detection method in complex shallow water. We define and estimate the angle-domain subspaces of horizontal linear array in a proper way under an uncertain environment. According to the angle-domain subspaces, we propose an angle-domain subspace detector and its robust form. Angle-domain subspaces contain an uncertain information by using the observation matrices in different environmental parameters. The relationship between the horizontal wave number of propagating modes and the sound speed of the bottom and sediment in hard seabed is used to estimate the angle-domain subspaces. The proposed angle-domain subspace detector is robust in an uncertain environment, but its detection performance fluctuates with target bearings. The angle domain subspace is transformed into a constant dimension subspace, robust form of the angular domain subspace detector, whose detection performance is consistent in all source bearings. The simulation results in the uncertain shallow-water environment show that the robust angle domain subspace detector has a similar robustness to the energy detector, and better detection capability.

Keywords: shallow water, uncertain environment, detection, horizontal array

PACS: 43.60.Bf, 43.30.+m, 43.60.+d, 43.60.Cg

DOI: 10.7498/aps.71.20211742

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11974285) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11534009).

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