

基于多途模型匹配的浅海噪声源聚焦定位方法

时 洁, 杨德森, 时胜国

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 本文在建立符合水声相干多途信道特点的阵列信号模型的基础上, 提出了基于多途模型匹配的浅海噪声源聚焦定位方法. 该方法在本质上利用了基于模型和数据匹配的相干处理思想, 充分利用了多途信道信息, 生成与实际声传播特性相匹配的空间聚焦导向矢量, 从而有效克服了多途效应的影响, 提高了定位精度. 进而结合基于最差性能优化的稳健聚焦处理器设计方法, 对空间聚焦导向矢量实施约束, 并划归为具有单一非线性约束的二次最小化问题, 求解最优权矢量, 修正得到新的空间谱形式. 通过对空间谱、定位误差、-3dB波束宽度及主峰与最大旁瓣比性能进行对比分析, 讨论了约束参数选取与失配误差程度之间的关系, 并证明了新算法在存在失配误差的情况下, 可有效提高MVDR(Minimum Variance Distortionless Response)高分辨算法的稳健性, 保持较尖锐的谱峰及较强的背景起伏抑制能力.

关键词: 多途; 浅海; 最差性能优化; 稳健性

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2013)03-0575-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.03.026

Research on Noise Sound Source Localization Method in Shallow Water Based on the Multi-Path Model Match

SHI Jie, YANG De-sen, SHI Sheng-guo

(Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The noise sound sources localization method used in shallow water is proposed. The proposed method establishes the array signal model according to the characteristics of the underwater acoustic multi-path channel, and makes use of the multi-path information and the coherent matched idea to construct the spatial focused steering vector which is in accordance with the actual sound propagation characteristics. As a result, the proposed method can not only overcome the multi-path effect but also improve the localization accuracy. Furthermore, we take the ideas of the focused beamforming based on the worst-case performance optimization for reference, and impose constraint conditions on the actual focused steering vectors to improve the optimum weight vectors and spatial spectrum form. It turns out that this method involves a quadratic minimum problem subject to non-linear constraints. Through the discussion and analysis of the spatial spectrum structure, localization errors, -3dB beamwidth, peak and sidelobe ratio (PSR), we present the relationships between the constraint parameter choices and the mismatch errors. It is proved that the proposed algorithm can improve the robustness of the high resolution method MVDR(Minimum Variance Distortionless Response), and obtain sharper spectrum peaks and better noise interference suppression ability.

Key words: multi-path; shallow water; worst-case performance optimization; robustness

1 引言

对于浅海近程噪声源定位问题而言, 多途效应的存在会导致通常使用的常规及高分辨类聚焦定位方法存在定位偏差, 同时在空间谱图像上出现较高的旁瓣级起伏, 对聚焦定位性能产生严重影响. 针对浅海环境下的信号处理问题, 基于模型的信号处理思想(Model Based Processing, MBP)受到了广大学者的青睐, 该思想是设计

一种融合海洋传播模型, 并且可以用来完成各种各样的信号处理功能的处理器. Candy等人将MBP方法广泛的应用到水下声纳被动定位, 海洋环境参数反演, 水下目标检测、估计、识别等方面, 取得了一定的成果^[1-5]. 目前, 在浅海噪声源聚焦定位方面, 对浅海多途效应的影响以及可行性方法的研究普遍集中于时间反转镜方法^[6-8], 但对于单频线谱信号而言, 由于带宽窄, 时反处理的增益有限.

基于此,本文将多途信道模型与最差性能优化稳健约束优化方法相结合,提出了具有高稳健性的浅海噪声源聚焦定位方法.该方法一方面利用射线理论建立了符合水声传播特点的阵列信号模型,生成与实际声传播特性相匹配的空间聚焦导向矢量,从而有效克服了多途效应的影响,提高了定位精度.另一方面,基于最差性能优化的稳健聚焦处理器设计方法,对空间聚焦导向矢量实施约束,克服多种失配误差对 MVDR 高分辨算法空间分辨率及背景起伏抑制能力的影响.文中通过对空间谱、定位误差、-3dB 波束宽度及主峰与最大旁瓣比性能进行对比分析证明了新方法的有效性.

2 水平线阵接收信号模型

在近程声传播条件下,利用基于射线理论的虚源法对浅海水平线阵接收信号进行建模,如图 1 所示.海水深度为 H ,一个 N 元水平均匀线阵入水深度为 z_a ,阵元间距为 d ,设 1 号阵元为参考阵元.空间中共存在 M 个点声源,入水深度均为 z_s ,第 m 个单频点声源的空间位置坐标为 (x_m, y_m, z_s) .

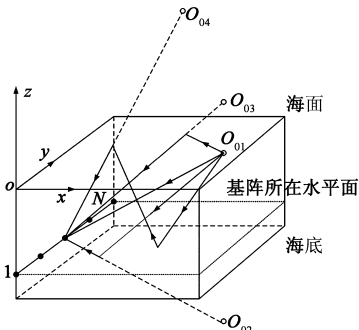


图1 浅海水平线阵接收信号模型示意图

$$\mathbf{A}^{(m)} = \begin{bmatrix} A^{(m,1)} \\ \vdots \\ A^{(m,n)} \\ \vdots \\ A^{(m,N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{l=0}^{\infty} \left[(VV_{l1}^{(m,1)})^l \frac{e^{jkR_{l1}^{(m,1)}}}{R_{l1}^{(m,1)}} + (VV_{l2}^{(m,1)})^l V_{l2}^{(m,1)} \frac{e^{jkR_{l2}^{(m,1)}}}{R_{l2}^{(m,1)}} + (VV_{l3}^{(m,1)})^l V_{l3}^{(m,1)} \frac{e^{jkR_{l3}^{(m,1)}}}{R_{l3}^{(m,1)}} + (VV_{l4}^{(m,1)})^{l+1} \frac{e^{jkR_{l4}^{(m,1)}}}{R_{l4}^{(m,1)}} \right] \\ \vdots \\ \sum_{l=0}^{\infty} \left[(VV_{l1}^{(m,n)})^l \frac{e^{jkR_{l1}^{(m,n)}}}{R_{l1}^{(m,n)}} + (VV_{l2}^{(m,n)})^l V_{l2}^{(m,n)} \frac{e^{jkR_{l2}^{(m,n)}}}{R_{l2}^{(m,n)}} + (VV_{l3}^{(m,n)})^l V_{l3}^{(m,n)} \frac{e^{jkR_{l3}^{(m,n)}}}{R_{l3}^{(m,n)}} + (VV_{l4}^{(m,n)})^{l+1} \frac{e^{jkR_{l4}^{(m,n)}}}{R_{l4}^{(m,n)}} \right] \\ \vdots \\ \sum_{l=0}^{\infty} \left[(VV_{l1}^{(m,N)})^l \frac{e^{jkR_{l1}^{(m,N)}}}{R_{l1}^{(m,N)}} + (VV_{l2}^{(m,N)})^l V_{l2}^{(m,N)} \frac{e^{jkR_{l2}^{(m,N)}}}{R_{l2}^{(m,N)}} + (VV_{l3}^{(m,N)})^l V_{l3}^{(m,N)} \frac{e^{jkR_{l3}^{(m,N)}}}{R_{l3}^{(m,N)}} + (VV_{l4}^{(m,N)})^{l+1} \frac{e^{jkR_{l4}^{(m,N)}}}{R_{l4}^{(m,N)}} \right] \end{bmatrix} \quad (6)$$

则称 $\mathbf{A}^{(m)}$ 为第 m 个声源对应的浅海多途空间聚焦导向矢量.空间聚焦导向矢量的构造与传统导向矢量的生成存在本质上的不同,射线模型下的空间聚焦

略去时间因子,基阵第 n 号阵元的接收到的由第 m 个声源发射的声压信号可表示为:

$$p^{(m,n)} = \sum_{l=0}^{\infty} \left[(VV_{l1}^{(m,n)})^l \frac{e^{jkR_{l1}^{(m,n)}}}{R_{l1}^{(m,n)}} + (VV_{l2}^{(m,n)})^l V_{l2}^{(m,n)} \frac{e^{jkR_{l2}^{(m,n)}}}{R_{l2}^{(m,n)}} + (VV_{l3}^{(m,n)})^l V_{l3}^{(m,n)} \frac{e^{jkR_{l3}^{(m,n)}}}{R_{l3}^{(m,n)}} + (VV_{l4}^{(m,n)})^{l+1} \frac{e^{jkR_{l4}^{(m,n)}}}{R_{l4}^{(m,n)}} \right] \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z_{l1} = 2Hl + z_s - z_a \\ Z_{l2} = 2H(l+1) - z_s - z_a \\ Z_{l3} = -2Hl - z_s - z_a \\ Z_{l4} = -2H(l+1) + z_s - z_a \end{cases} \quad (2)$$

$$R_{li}^{(m,n)} = \sqrt{(x_m - x_a(n))^2 + (y_m - y_a(n))^2 + (Z_{li})^2} \quad (3)$$

其中, k 为波数. $R_{li}^{(m,n)}$ 表示第 l 阶虚源第 i 条声线所对应的虚源与观察点之间的距离, Z_{li} 为其垂直距离, $i = 1 \sim 4$ 即每增加一阶虚源所增加的 4 条声线.当 $l = 0$ 时, Z_{01} 代表直达声, Z_{02} 代表声线经过一次海底反射, Z_{03} 代表声线经过一次海面反射, Z_{04} 代表声线先后经过一次海底和一次海面反射; V 表示海面反射系数(文中设为 -1), $V_{li}^{(m,n)}$ 表示第 l 阶虚源第 i 条声线的海底反射系数,满足瑞利反射,其表达式如下:

$$V_{li}^{(m,n)} = \frac{m_p \cos \theta_{li}^{(m,n)} - \sqrt{n_c^2 - \sin^2 \theta_{li}^{(m,n)}}}{m_p \cos \theta_{li}^{(m,n)} + \sqrt{n_c^2 - \sin^2 \theta_{li}^{(m,n)}}} \quad (4)$$

式中, m_p 为海水和海底介质的密度之比, n_c 为海水与海底中的声速之比, $\theta_{li}^{(m,n)}$ 为第 l 阶虚源第 i 条声线对应的俯仰角.

基阵接收信号可写为如下矩阵形式:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} = \sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} P^{(m,1)} \\ P^{(m,2)} \\ \vdots \\ P^{(m,N)} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{s}^{(m)} = \sum_{m=1}^M \mathbf{A}^{(m)} \cdot \mathbf{s}^{(m)} \quad (5)$$

导向矢量是多根本征声线贡献的叠加,不同本征声线在空间聚焦导向矢量中的贡献将会对定位结果产生严重影响.

3 基于多途模型匹配的聚焦定位方法

3.1 空间聚焦导向矢量的生成

$$A'(f) = \begin{bmatrix} A^{(1)}(f) \\ \vdots \\ A^{(n)}(f) \\ \vdots \\ A^{(N)}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{l=0}^{\infty} \left[(VV'_{l1})^l \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l1}^{(1)}}}{R_{l1}^{(1)}} + (VV'_{l2})^l V'_{l2} \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l2}^{(1)}}}{R_{l2}^{(1)}} + (VV'_{l3})^l V \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l3}^{(1)}}}{R_{l3}^{(1)}} + (VV'_{l4})^{l+1} \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l4}^{(1)}}}{R_{l4}^{(1)}} \right] \\ \vdots \\ \sum_{l=0}^{\infty} \left[(VV'_{l1})^l \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l1}^{(n)}}}{R_{l1}^{(n)}} + (VV'_{l2})^l V'_{l2} \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l2}^{(n)}}}{R_{l2}^{(n)}} + (VV'_{l3})^l V \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l3}^{(n)}}}{R_{l3}^{(n)}} + (VV'_{l4})^{l+1} \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l4}^{(n)}}}{R_{l4}^{(n)}} \right] \\ \vdots \\ \sum_{l=0}^{\infty} \left[(VV'_{l1})^l \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l1}^{(N)}}}{R_{l1}^{(N)}} + (VV'_{l2})^l V'_{l2} \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l2}^{(N)}}}{R_{l2}^{(N)}} + (VV'_{l3})^l V \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l3}^{(N)}}}{R_{l3}^{(N)}} + (VV'_{l4})^{l+1} \frac{e^{j(2\pi f/c)R_{l4}^{(N)}}}{R_{l4}^{(N)}} \right] \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_{li}^{(n)} = \sqrt{(\hat{x} - x_a(n))^2 + (\hat{y} - y_a(n))^2 + (Z_{li})^2} \quad (8)$$

$$V_{li}^{(n)} = \frac{m_p \cos \theta_{li}^{(n)} - \sqrt{n_c^2 - \sin^2 \theta_{li}^{(n)}}}{m_p \cos \theta_{li}^{(n)} + \sqrt{n_c^2 - \sin^2 \theta_{li}^{(n)}}} \quad (9)$$

其中, $R_{li}^{(n)}$ 为扫描点至第 n 号阵元的距离, $V_{li}^{(n)}$ 表示扫描点对应的第 l 阶虚源第 i 条声线的海底反射系数。

由于不同扫描点到达基阵参考阵元的距离不同, 为消除距离对匹配聚焦的影响, 对空间聚焦导向矢量进行二范数下的归一化处理:

$$\hat{A}'(f) = \frac{A'(f)}{\|A'(f)\|_2} \quad (10)$$

令 $\hat{R} = \mathbf{X}\mathbf{X}^H/L$ 为采样数据协方差矩阵, 则基于 Bartlett 处理器的匹配常规算法空间谱和基于 MVDR 处理器的匹配 MVDR 算法可分别写为:

$$P_1 = (\hat{A}'(f))^H \hat{R} (\hat{A}'(f)) \quad (11)$$

$$P_2 = \frac{1}{(\hat{A}'(f))^H \hat{R}^{-1} (\hat{A}'(f))} \quad (12)$$

3.2 基于最差性能优化的稳健聚焦处理器设计

最差性能优化 (worst-case performance optimization)^[9~13] 的主要思想是定义了所谓的不确定集并使最差性能优化, 可归类到对角加载类技术^[14]。本文利用该准则对空间聚焦导向矢量实施优化, 以提高匹配 MVDR 算法在失配误差条件下的稳健性。

空间聚焦导向矢量误差 ΔA 的范数可以由常数 $\epsilon > 0$ 进行约束:

$$\|\Delta A\| \leq \epsilon \quad (13)$$

则实际的空间聚焦导向矢量 $\hat{A}'_{\text{true}}(f)$ 属于下面的集合:

$$A(\epsilon) = \{\hat{A}'_{\text{true}}(f) \mid \hat{A}'_{\text{true}}(f) = \hat{A}'(f) + \Delta A, \|\Delta A\| \leq \epsilon\} \quad (14)$$

其中, $\hat{A}'(f)$ 即为由式(10)得到的理论上无任何失配误差下的空间聚焦导向矢量。

对所有属于集合 $A(\epsilon)$ 的导向矢量进行约束, 即阵

在与声源等深水平面 S 上进行扫描, 设某一扫描点坐标为 (\hat{x}, \hat{y}, z_s) , 则在分析频率 f 上的空间聚焦导向矢量可表示为:

列响应的绝对值不小于 1。则稳健聚焦处理器可以表示成约束最优问题, 并可进一步等价于具有单一非线性约束的二次最小化问题:

$$\begin{cases} \min_w \mathbf{w}^H \hat{R} \mathbf{w} \\ \text{s.t.} \quad |\mathbf{w}^H \hat{A}'_{\text{true}}(f)| \geq 1 \text{ for all } \hat{A}'_{\text{true}}(f) \in A(\epsilon) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \min_w \mathbf{w}^H \hat{R} \mathbf{w} \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{w}^H \hat{A}'(f) \geq \epsilon \|\mathbf{w}\| + 1, \text{Im}\{\mathbf{w}^H \hat{A}'(f)\} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

3.3 稳健聚焦处理器的二阶锥规划求解

对采样数据协方差矩阵进行 Cholesky 分解 $\hat{R} = \mathbf{U}^H \mathbf{U}$, 则约束最优问题中的目标函数可转化为:

$$\min_w \mathbf{w}^H \hat{R} \mathbf{w} = \min(\mathbf{U} \mathbf{w})^H (\mathbf{U} \mathbf{w}) = \min \|\mathbf{U} \mathbf{w}\|^2 \quad (16)$$

引进一个非负标量 c , 并构造一个新的约束 $\|\mathbf{U} \mathbf{w}\| \leq c$, 则约束最优问题可转化成:

$$\begin{cases} \min_{c, \mathbf{w}} c \\ \text{s.t.} \quad \epsilon \|\mathbf{w}\| \leq \mathbf{w}^H \hat{A}'(f) - 1, \text{Im}\{\mathbf{w}^H \hat{A}'(f)\} = 0, \|\mathbf{U} \mathbf{w}\| \leq c \end{cases} \quad (17)$$

上式的实值形式可表示为:

$$\begin{cases} \min_{c, \mathbf{w}} c \\ \text{s.t.} \quad \epsilon \|\hat{\mathbf{w}}\| \leq \hat{\mathbf{w}}^T \hat{A}'(f) - 1, \hat{\mathbf{w}}^T \hat{A}'(f) = 0, \|\hat{\mathbf{U}} \hat{\mathbf{w}}\| \leq c \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\hat{\mathbf{w}} = [\text{Re}\{\mathbf{w}\}^T, \text{Im}\{\mathbf{w}\}^T]^T$, $\hat{A}'(f) = [\text{Re}\{\hat{A}'(f)\}^T, \text{Im}\{\hat{A}'(f)\}^T]^T$, $\hat{A}'(f) = [\text{Im}\{\hat{A}'(f)\}^T, -\text{Re}\{\hat{A}'(f)\}^T]^T$,

$$\hat{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{\mathbf{U}\} & -\text{Im}\{\mathbf{U}\} \\ \text{Im}\{\mathbf{U}\} & \text{Re}\{\mathbf{U}\} \end{bmatrix}.$$

上式可进一步表达为:

$$\begin{cases} \min_y \mathbf{d}^T \mathbf{y} \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{f} + \mathbf{F}^T \mathbf{y} \in S_1^{2N+1} \times S_2^{2N+1} \times \{\mathbf{0}\} \end{cases} \quad (19)$$

其中, S_1 和 S_2 表示空间的二阶锥, $\{\mathbf{0}\}$ 表示为零锥. $\mathbf{d} = [1, \mathbf{0}^T] \in R^{(2N+1) \times 1}$, $\mathbf{y} = [c, \hat{\mathbf{w}}^T]^T \in R^{(2N+1) \times 1}$,

$$\mathbf{f} = [\mathbf{0}^T, -1, \mathbf{0}^T]^T \in R^{(4N+1) \times 1}, \mathbf{F}^T = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^T \\ 0 & \dot{\mathbf{U}} \\ 0 & \hat{\mathbf{A}}'(f)^T \\ 0 & \epsilon \mathbf{I} \\ 0 & \overline{\mathbf{A}}'(f)^T \end{bmatrix} \in R^{(4N+3) \times (2N+1)}$$

求解得到的最优化权矢量可最终表示为:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = [\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_N]^T + j[\hat{w}_{N+1}, \dots, \hat{w}_{2N}]^T \quad (20)$$

至此,已将式(15)的稳健聚焦约束最优问题转化成式(20)的二阶锥规划(SOCP, Second Order Cone Programming)^[15]求解问题.通过利用 Sedumi 软件可以方便的进行求解.

则基于最差性能优化的匹配稳健 MVDR 算法的空间谱为:

$$P_3 = \mathbf{w}_{\text{opt}}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w}_{\text{opt}} \quad (21)$$

4 性能对比分析

4.1 空间谱对比

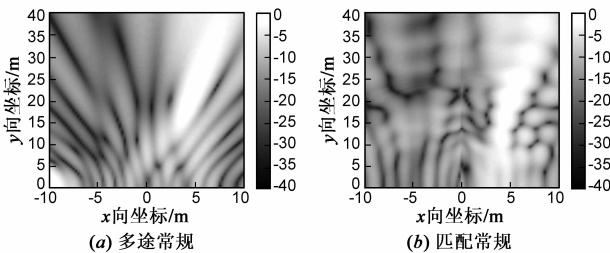


图2 空间谱对比效果图

(1)多途下的常规算法由于无法与真实的声信道模型向匹配,存在一定的定位偏差,且 x 向的定位偏差明显大于 y 向的定位偏差;同时,由于多途效应的存在,加剧了在垂直于基阵方向上(即 x 向)的背景起伏.

(2)文中给出的三种基于多途模型匹配类算法由于本质上利用了基于模型和数据匹配的相干处理思想,充分利用了多途信道信息,生成与实际声传播特性相“匹配”的空间聚焦导向矢量,从而有效克服了多途效应的影响,提高了定位精度.

(3)对比三种基于多途模型匹配类算法的空间谱图可知,匹配常规算法的背景起伏剧烈,这对于目标与背景区分十分不利;匹配 MVDR 算法的谱峰较为尖锐,背景起伏较小,但在存在失配误差的情况下,出现了明显的性能下降,无法体现高分辨 MVDR 算法的优势;匹配稳健 MVDR 算法由于利用了约束优化思想,有效改善了高分辨 MVDR 算法的稳健性,空间谱表现出更大的动态范围、更为尖锐的聚焦峰尺度以及更强的背景起伏压制能力.

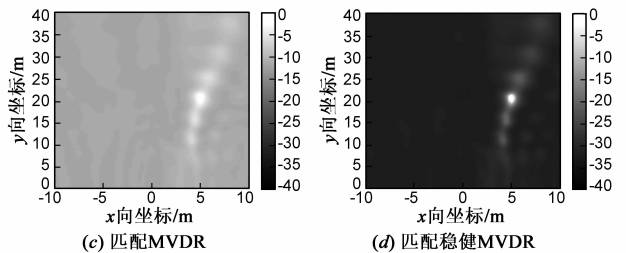
4.1.2 海洋环境声学参数失配情况下的空间谱

4.1.1 空间聚焦导向矢量扰动下的空间谱

文中利用空间聚焦导向矢量扰动量 $\text{Disturb} = 10\log_{10}\left(\frac{\|\Delta \mathbf{A}\|_F^2}{\|\mathbf{A}'(f)\|_F^2}\right)$ 来度量其存在失配误差的程度.

基本仿真参数:坐标系如图 1 所示,点声源入水深度 4m,其直角坐标系下的坐标为(20,5,-4)m,基阵入水深度为 10m,阵元个数 11 个,阵元间距 165m.海水深度为 15m,水中声速为 1500m/s, $m_p = 1.8$, $n_c = 0.85$, $V = -1$.系统采样率为 20kHz,单频信号频率为 1kHz,信噪比为 20dB,数据快拍数为 4096,失配误差 $\text{Disturb} = -10\text{dB}$.在 x 向的扫描范围 0m~40m,在 y 向的扫描范围 -10m~10m,扫描步长 0.25m.图 2 给出多途条件下的常规算法(简称多途常规)与文中式(11)、(12)、(21)给出的三种基于多途模型匹配类算法(简称匹配常规、匹配 MVDR、匹配稳健 MVDR)的空间谱对比效果图.其中,针对仿真中的失配程度,匹配稳健 MVDR 算法的约束参数选取为 $\epsilon = 0.3$.

由存在空间聚焦导向矢量扰动误差下的空间谱结果可以看出:



真实海洋环境参数与 4.1.1 中相同.以下给出水深、水中声速、 m_p 及 n_c 存在误差等多种环境声学参数失配情况下的空间谱.图 3 至图 6 依次给出四种算法分别在声源位置处的 x 向和 y 向空间谱切片对比效果图.

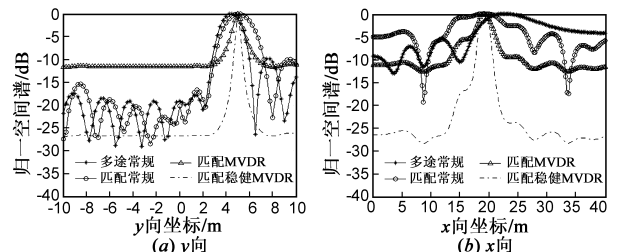


图3 水深存在5%误差下的空间谱切片($\epsilon=0.25$)

由以上海洋环境声学参数失配情况下的空间谱结果可知:

(1)海洋环境声学参数失配对于匹配 MVDR 算法的影响较大,此时的空间谱在分辨率及背景抑制能力上均出现明显的退化,这是高分辨算法普遍存在的问题.

(2)由于水深、水中声速、 m_p 及 n_c 存在误差等情况

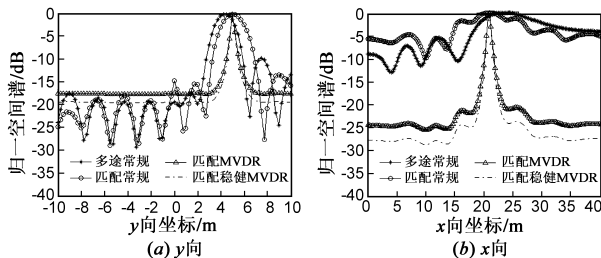


图4 水中声速取1480m/s下的空间谱切片($\epsilon=0.03$)

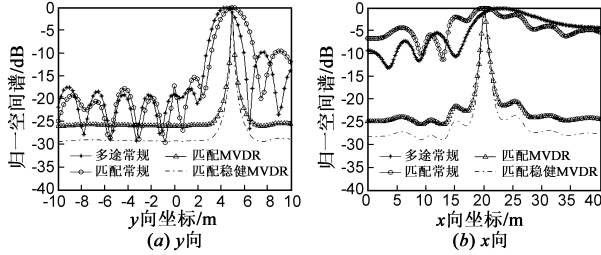


图5 海水和海底介质的密度之比 m_p 存在30%的误差下的空间谱切片($\epsilon=0.03$)

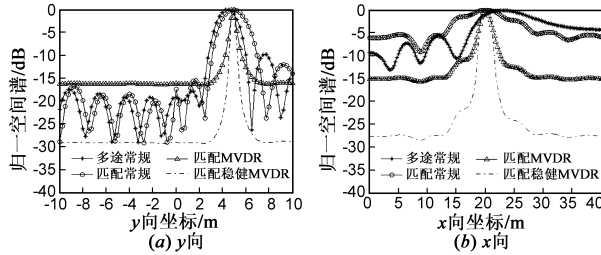


图6 海水与海底中的声速之比 n_c 存在30%的误差下的空间谱切片($\epsilon=0.2$)

均可视为空间聚焦导向矢量存在误差,因此分析结果呈现的规律与4.1中的仿真一相同。

(3)约束参数的选取与误差的程度有关,需要根据失配程度的大小适当选取优化参数.在约束参数选取适当的情况下,采用匹配稳健 MVDR 算法可以有效提高 MVDR 算法的稳健性,保持较尖锐的谱峰及较强的背景起伏抑制能力。

4.2 定位误差对比分析

基本参数不变,讨论不同信噪比条件下,多途常规算法与匹配稳健 MVDR 的定位误差.设置步长精度为0.0001m,约束参数选取为 $\epsilon=0.3$.表1中给出两种算法的定位偏差、方差及均方根误差统计结果。

由表1可知:

(1)定位误差由偏差、方差和均方根误差共同体现,多途常规算法的定位偏差、方差及均方根误差均较大,同时在x向的定位精度远低于y向的定位精度。

(2)匹配稳健 MVDR 算法由于采用模型匹配思想,可有效修正定位误差,在偏差、方差和均方根方面均有较大的改善,具有较高的定位精度.证明了模型匹配思想在浅海声源定位的重要性和有效性。

表1 不同信噪比条件下的定位误差对比表(单位:m)

SNR (dB)		y 向		x 向	
		多途常规	匹配稳健 MVDR	多途常规	匹配稳健 MVDR
0	偏差	0.8696	0.0050	1.3246	0.0234
	方差	0.2558	0.0000	1.5545	0.0006
	均方根误差	1.0060	0.0070	1.8191	0.0331
10	偏差	0.9938	0.0014	1.9716	0.0075
	方差	0.0001	0.0000	0.1374	0.0001
	均方根误差	0.9938	0.0020	2.0062	0.0106
20	偏差	0.9213	0.0005	1.7333	0.0022
	方差	0.2417	0.0000	2.7349	0.0000
	均方根误差	1.0442	0.0007	2.3957	0.0031
30	偏差	0.8737	0.0001	1.7758	0.0007
	方差	0.0394	0.0000	0.0509	0.0000
	均方根误差	0.8959	0.0002	1.7901	0.0010

4.3 -3dB 波束宽度 Θ_{-3dB} 及主峰与最大旁瓣比 PSR 对比分析

真实海洋环境参数与4.1.1中相同.以下评价存在环境参数失配下的聚焦性能差异,其中,-3dB波束宽度 Θ_{-3dB} 反映算法的空间分辨率,最大旁瓣比 PSR 反映算法的处理增益及对背景起伏的抑制能力.扫描步长取0.01m.下表中为书写简练,将多途常规、匹配常规、匹配 MVDR 和匹配稳健 MVDR 依次记为 M1、M2、M3 和 M4。

表2 约束参数 $\epsilon=0.1$ 下的性能统计结果

(a) y 向及 x 向聚焦-3dB波束宽度(单位:m)

扰动(dB)	y 向				x 向			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
-20	1.85	2.22	0.22	0.17	13.63	—	1.06	0.85
-15	1.91	2.24	0.48	0.28	13.95	—	1.60	0.97
-10	1.96	2.30	0.87	0.68	14.08	—	2.50	2.03
-5	1.97	2.38	1.34	1.15	—	—	3.38	2.84
0	2.17	2.47	2.91	2.43	—	—	—	—

(b) y 向及 x 向聚焦 PSR(单位:dB)

扰动(dB)	y 向				x 向			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
-20	10.0243	10.6321	20.8580	38.6098	5.4865	1.7285	15.0035	32.2735
-15	9.9148	9.8558	15.0251	21.6480	4.5110	1.4278	10.0625	16.4682
-10	8.9066	8.4585	9.8394	12.9588	4.3392	1.3206	5.8987	8.2793
-5	6.9474	6.5418	6.2615	7.4344	3.9972	1.2382	4.3113	5.3118
0	5.9000	4.3599	2.6704	3.0677	1.6549	0.5436	0.8188	0.9310

表3 约束参数 $\epsilon=0.3$ 下的性能统计结果

(a) y 向及 x 向聚焦-3dB波束宽度(单位:m)

扰动(dB)	y 向				x 向			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
-20	1.86	2.14	0.25	0.78	12.72	—	0.98	2.84
-15	1.87	2.18	0.44	0.69	13.86	—	1.78	2.60
-10	1.90	2.20	0.78	0.50	14.09	—	2.80	1.80
-5	1.95	2.35	1.29	0.59	—	—	4.65	2.38
0	2.17	2.45	3.43	2.32	—	—	—	—

(b) y 向及 x 向聚焦 PSR(单位: dB)

扰动 (dB)	y 向				x 向			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
-20	11.6155	11.2020	19.4753	38.9202	5.2366	1.7592	15.8571	30.0439
-15	9.6973	9.6218	15.0040	37.6880	4.5508	1.4305	10.3987	29.4867
-10	9.3649	8.5703	10.6374	37.6269	4.4076	1.3123	6.0542	27.6029
-5	7.6894	6.5929	6.4733	15.2381	3.1537	1.0658	3.5685	8.0814
0	4.5892	4.5989	2.3680	3.8637	2.1040	0.6795	0.3620	0.5898

表 4 约束参数 $\epsilon = 0.5$ 下的性能统计结果(a) y 向及 x 向聚焦 -3dB 波束宽度(单位: m)

扰动(dB)	y 向				x 向			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
-20	1.81	2.15	0.22	1.29	12.81	—	1.04	4.05
-15	1.86	2.16	0.41	1.26	13.37	—	1.12	4.00
-10	1.90	2.20	0.81	1.19	14.07	—	2.75	3.93
-5	1.93	2.35	1.37	0.77	—	—	3.56	3.75
0	2.17	2.38	3.02	0.38	—	—	—	0.95

(b) y 向及 x 向聚焦 PSR(单位: dB)

扰动 (dB)	y 向				x 向			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
-20	9.8567	10.1556	20.5621	39.0734	4.6361	1.7743	14.8968	18.6478
-15	9.2680	9.9821	15.6467	39.2029	4.3260	1.4480	12.7657	18.9654
-10	7.9866	8.0624	9.9939	37.1229	4.2192	1.2710	5.2873	24.2768
-5	7.0956	6.7085	6.5957	34.7711	4.1017	1.0195	2.8908	23.8772
0	5.4690	4.8585	3.4440	22.8073	1.3611	0.4240	0.7542	13.2241

表 2 至表 4 给出导向矢量扰动误差由小到大 (-20dB 至 0dB), 在不同大小约束参数 ϵ 下的 -3dB 波束宽度 Θ_{-3dB} 及主峰与最大旁瓣比 PSR 性能统计结果. 经过对比分析可知:

(1) 由总体规律可以看出, 对于相同程度的扰动误差, 约束参数 ϵ 取值越大, 算法 Θ_{-3dB} 性能越接近常规处理器, 即获取的谱峰越平坦, 分辨率越低, 背景起伏的抑制能力越弱; 约束参数 ϵ 取值越小, 算法 Θ_{-3dB} 性能越接近理想的高分辨处理器, 即获取的谱峰越尖锐, 分辨率越高, 背景起伏的抑制能力越强. 可见, 约束参数的选取对于算法性能的影响较大, 为获得较为理想的处理效果, 需要根据导向矢量扰动误差大小适当选取约束参数.

(2) 约束参数 ϵ 的选取需根据扰动误差确定, 一般地, 随着扰动误差的加大, 应当选取较大的约束参数 ϵ 以获得更高的 Θ_{-3dB} 性能. 当选取的约束参数 ϵ 较小时, 算法对于扰动误差较小情况下的处理性能较好, 而随着扰动误差的逐渐加大, 处理效果严重恶化; 当选取的约束参数 ϵ 较大时, 算法对于扰动误差较小情况下的处理性能一般, 接近常规处理方法, 甚至较模型匹配 MVDR 算法更差, 而随着扰动误差的加大, 处理效果明显提高, 获取的谱峰更为尖锐, 同时背景起伏的抑制能力越强.

(3) 对比多途常规与匹配常规算法可知, 多途常规算法对于较小的导向矢量扰动误差较不敏感, 但其 Θ_{-3dB} 过大, 空间分辨率较差, 同时该方法存在严重的定位误差; 匹配常规算法尽管利用多途模型匹配思想修正了定位误差, 但却具有较大的背景起伏, PSR 均小于 3dB, 无法对目标或背景进行区分. 多途常规与匹配常规算法均无法适用于浅海环境, 这也证明了本文提出方法的重要性.

5 结论

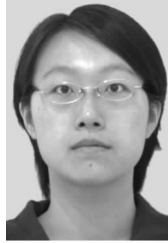
本文基于相干多途信道特点, 建立了符合水声传播特点的阵列信号模型, 提出了基于多途模型匹配的浅海噪声源聚焦定位方法. 新方法由两部分组成: 一, 利用基于模型和数据匹配的相干处理思想, 充分利用了多途信道信息, 生成与实际声传播特性相“匹配”的空间聚焦导向矢量, 从而有效克服了多途效应的影响, 提高了定位精度. 二, 结合最差性能优化的稳健聚焦处理器设计方法, 对空间聚焦导向矢量实施约束, 并划归为具有单一非线性约束的二次最小化问题, 进而通过二阶锥规划方法求解最优权矢量, 最终得到优化后的空间谱形式, 从而克服 MVDR 高分辨聚焦处理器在存在各种失配误差下出现性能下降的问题.

参考文献

- [1] J V Candy, E J Sullivan. Model-based environmental inversion: a shallow water ocean application[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 98(3): 1446 - 1454.
- [2] J V Candy, E J Sullivan. Passive localization in ocean acoustics: a model-based approach[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 98(3): 1455 - 1471.
- [3] J V Candy, E J Sullivan. Model-based identification: an adaptive approach to ocean acoustic processing[J]. IEEE Transactions on Oceanic Engineering, 1996, 21(3): 273 - 289.
- [4] J V Candy, E J Sullivan. Model-based processor design for a shallow water ocean acoustic experiment[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(4): 2038 - 2051.
- [5] J V Candy, E J Sullivan. Model-based processing of a large aperture array[J]. IEEE Transactions on Oceanic Engineering, 1994, 19(4): 519 - 528.
- [6] 惠俊英, 余 ■, 惠娟, 滕超. 多途信道中声屏蔽及声聚焦[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(3): 299 - 306.
Hui J Y, Yu Y, Hui J, Teng C. Acoustic shielding and acoustic focusing[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(3): 299 - 306. (in Chinese)
- [7] 时洁, 杨德森, 刘伯胜. 基于虚拟时间反转镜的噪声源近场定位方法研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(10): 1215 - 1219.
SHI Jie, YANG De-sen, LIU Bo-sheng. Radiated noise sources

- near-field location based on virtual time reversal mirror[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(10): 1215 – 1219. (in Chinese)
- [8] 惠娟, 胡丹, 惠俊英, 殷敬伟. 聚焦波束形成声图测量原理研究[J]. *声学学报*, 2007, 32(4): 356 – 361.
HUI Juan, HU Dan, HUI Jun-ying, YIN Jing-wei. Researches on the measurement of distribution image of radiated noise using focused beamforming[J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(4): 356 – 361. (in Chinese)
- [9] 时洁, 杨德森, 时胜国. 基于最差性能优化的运动声源稳健聚焦定位识别方法研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 064301, 1 – 11.
Shi Jie, Yang De-Sen, Shi Sheng-Guo. Robust localization and identification method of moving sound sources based on worst-case performance optimization[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(6): 064301, 1 – 11. (in Chinese)
- [10] 刘聪锋, 廖桂生. 基于模约束的稳健 Capon 波束形成算法[J]. *电子学报*, 2008, 36(3): 440 – 445.
LIU Cong-feng, LIAO Gui-sheng. Robust capon beamformer under norm constraint [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(3): 440 – 445. (in Chinese)
- [11] 刘聪锋, 廖桂生. 基于二次约束的稳健 LCMP 波束形成算法[J]. *电子学报*, 2010, 38(9): 1990 – 1996.
LIU Cong-feng, LIAO Gui-sheng. Robust LCMP beamformer under quadratic constraint [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 1990 – 1996. (in Chinese)
- [12] 刘聪锋, 廖桂生. 最差性能最优的稳健波束形成算法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(1): 1 – 7.
LIU Cong-feng, LIAO Gui-sheng. Robust beamforming algorithm using worse-case performance optimization [J]. *Journal of Xidian Universit*, 2010, 37(1): 1 – 7. (in Chinese)
- [13] Vorobyov S A, Gershman A B, Luo Z Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: a solution to the signal mismatch problem [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(2): 313 – 324.
- [14] Jian Li, Petre Stoica, Zhi song Wang. On robust capon beamforming and diagonal loading [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(7): 1702 – 1715.
- [15] 鄢社锋, 马远良. 二阶锥规划方法对于时空域滤波器的优化设计与验证 [J]. *中国科学 E 辑, 信息科学*, 2006, 36(2): 153 – 171.

作者简介



时 洁 女, 1982 年出生, 博士学位, 讲师.
研究方向为减振降噪及水声信号处理.
E-mail: shijie080428@yahoo.com.cn



杨德森 男, 1957 年出生, 博士学位, 教授,
博士生导师. 研究方向为水声信号处理、减振降噪和矢量声学.



时胜国 男, 1973 年出生, 博士学位, 教授,
博士生导师. 研究方向为水下噪声与减振降噪.