

# 稀疏系数腐蚀平滑后重构的拖线阵强噪声干扰抑制

郑义<sup>1,2,3</sup>, 聂东虎<sup>1,2,3,4</sup>, 孙宗鑫<sup>1,2,3,4</sup>, 李东奇<sup>1,2,3</sup>, 乔钢<sup>1,2,3,4</sup>, 周锋<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 4. 哈尔滨工程大学 三亚南海创新发展基地, 海南 三亚 572024)

**摘要:**针对水声强噪声干扰会导致被动拖线阵目标方位估计性能严重下降的问题, 本文提出了一种稀疏系数腐蚀平滑后重构的强噪声干扰抑制方法。利用宽带阵列信号频域压缩感知方法, 对拖线阵数据进行空间稀疏表示, 引入数字图像处理中的腐蚀和平滑方法, 对稀疏系数表示的方位历程图进行处理, 估计降噪加权因子并对稀疏系数进行修正, 修正后的稀疏系数进行重构得到降噪后的数据。仿真和海试数据处理结果表明: 在本文参数条件下, 所提方法能够有效抑制接收数据中的强噪声干扰, 处理后的仿真和海试数据中的噪声干扰功率有明显的降低, 为提高后续目标检测性能打下基础。

**关键词:**被动拖曳线列阵; 频域压缩感知; 腐蚀; 平滑; 稀疏重构; 时间方位历程; 噪声抑制; 干扰抑制

**DOI:** 10.11990/jheu.202506008

**网络出版地址:** <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250624.0935.018>

**中图分类号:** TB566 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1618-07

## Strong noise interference suppression of a passive towed linear array based on sparse coefficient reconstruction after eroding and smoothing

ZHENG Yi<sup>1,2,3</sup>, NIE Donghu<sup>1,2,3,4</sup>, SUN Zongxin<sup>1,2,3,4</sup>, LI Dongqi<sup>1,2,3</sup>, QIAO Gang<sup>1,2,3,4</sup>, ZHOU Feng<sup>1,2,3,4</sup>

(1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 4. Sanya Nanhai Innovation and Development Base of Harbin Engineering University, Sanya 572024, China)

**Abstract:** To address the issue of significant performance degradation in bearing estimation of passive towed linear arrays caused by strong acoustic noise interference underwater, a novel method for noise suppression is proposed to reconstruct sparse coefficients after eroding and smoothing. This method leverages spatial sparse representation of towed linear array data through the application of a compressed sensing technique at signal frequency domains of a wideband array. By incorporating erosion and smoothing algorithms that are commonly utilized in digital image processing, the bearing-time recording represented by sparse coefficients was processed to estimate a noise reduction weighting factor. Subsequently, the sparse coefficients were adjusted accordingly, resulting in the reconstruction of denoised data. The simulation and sea trial data analysis demonstrated the efficacy of the proposed method in mitigating significant noise interference in the received data within the specified parameters. The noise interference power in the processed simulation data and sea trial data was observed to be considerably reduced. These findings provide a basis for enhancing the performance of target detection in the future.

**Keywords:** passive towed linear array; frequency domain compressive sensing; eroding; smoothing; sparse reconstruction; bearing-time recording; noise suppression; interference suppression

在被动拖曳线列阵声呐工作过程中, 强噪声干

扰, 特别是平台噪声干扰会导致目标检测和方位估计算法的性能严重下降, 因此提升阵列信号处理算法的噪声干扰抑制能力, 提高目标的信干噪比, 是当前水下目标检测和方位估计中的研究重点<sup>[1]</sup>。在阵列信号处理中, 常用的空域噪声抑制方法包括空域矩阵滤波器和波束形成方法等<sup>[2]</sup>, 它们能够使得期望方向的信号尽量无失真通过, 而其他方向的噪

收稿日期: 2025-06-05.

网络出版日期: 2025-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11974090, 11774074); 国家重点研发计划(2023YFC3010800); 黑龙江省自然科学基金项目(JQ2023A004); 深圳市科技计划(JSGG20220831103800001).

作者简介: 郑义, 男, 博士研究生;

聂东虎, 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 聂东虎, E-mail: niedonghu@hrbeu.edu.cn.

声干扰受到一定程度的抑制。

空域矩阵滤波器通过设置阻带和通带来实现对噪声的抑制,且其输出依然是阵元域数据。Vaccaro 等<sup>[3-4]</sup>首先提出空域矩阵滤波器的概念,给出了通过求解优化问题设计空域滤波器的方法。鄢社峰等<sup>[5]</sup>将空域滤波器的设计转化为二阶锥规划问题,提升了空域矩阵滤波器的稳健性。韩东等<sup>[6]</sup>提出了一种宽带最优空域滤波器的设计方法,提高了空域滤波器的设计效率,分析了特定频带空域矩阵滤波器对其他频带阵列流形的影响。梁国龙等<sup>[7]</sup>为解决降维滤波矩阵设计存在的维数与滤波性能之间的矛盾,提出了一种结合 K-L 变换的降维空域矩阵滤波器的设计方法,获得的低维矩阵滤波器具有更好的空域滤波性能和更小的通带响应误差。陈敬军等<sup>[8]</sup>推导出了对平台噪声零响应的窄带空域滤波器,并提出了降低宽带空域矩阵滤波器计算量的方法,使用宽带空域矩阵滤波器对拖曳线列阵平台噪声进行压制,提高了拖曳线列阵声呐远程弱目标的探测能力。这些方法通常需要对目标和干扰先验已知或方位角度的粗略信息。

另一类噪声抑制方法是波束形成方法,它对基阵的各个传感器接收的数据进行加权处理,在干扰或噪声方向上产生阵列响应的零点,从而对噪声进行抑制,除了常规波束形成 (conventional beamforming, CBF) 之外,最小方差无畸变响应 (minimum variance distortionless response, MVDR) 算法是该类算法的典型代表。1969 年, Capon<sup>[9]</sup>提出 MVDR 算法,该算法也被称为 Capon 滤波器,其在目标方向信号源能量不变的条件下,调整加权矢量,使得噪声输出功率最小。在理想情况下, MVDR 算法具有良好的输出性能,但由于该算法对误差较为敏感,降低了算法的稳健性,且需要对信号自相关矩阵求逆,增加了运算量。因此,后续研究者将工作重点转到提升 MVDR 的稳健性方面,取得较大成果,包括线性约束最小方差<sup>[10]</sup> (linearly constraint minimum variance, LCMV) 算法、二次约束方法<sup>[11]</sup>、超指向性方法<sup>[12]</sup>、对角减载方法<sup>[13]</sup>等。除此之外,还有基于子空间类的干扰抑制方法,但此类方法在低信噪比条件下,难以精确获取信号和噪声子空间的维度,为该方法的使用带来困难。

近年来,压缩感知<sup>[14-15]</sup>作为改变“奈奎斯特”采样理论的方法被广泛应用到水声阵列信号处理领域中<sup>[16-18]</sup>。该方法以目标信号在空间上的稀疏特性为基础,根据阵列流形构造感知矩阵,将阵列接收信号作为测量值,通过求解凸优化问题可以得到目标在每个指向方向上的稀疏系数,进而利用稀疏系数合成空间谱,实现对目标方位的估计。通过压缩感

知方法进行目标方位估计可以得到较高的目标分辨率,然而现有基于压缩感知的目标方位估计方法是在频域完成的,存在较多干扰和噪声点,在低信噪比条件下存在性能退化问题<sup>[19]</sup>。

为抑制被动拖线阵接收数据中的强噪声干扰,本文提出一种稀疏系数腐蚀平滑后重构的强噪声干扰抑制方法,引入数字图像处理中的腐蚀和平滑方法,估计降噪加权因子,利用降噪后的稀疏系数重构得到降噪后的阵元域数据。该方法利用了压缩感知方法的高目标方位分辨力,同时通过腐蚀和平滑压制了空间谱中的噪声干扰。本文方法为波束形成处理前的预处理算法,通过对比噪声抑制前后的方位历程图可验证该方法的有效性。仿真数据和海试数据均表明,本文方法可有效抑制数据中的强噪声干扰。

## 1 强噪声干扰抑制方法

本文方法主要包含 3 个步骤,分帧和压缩感知、腐蚀和平滑、降噪和重构。通过分帧和压缩感知得到每帧阵列信号的频域稀疏表示,腐蚀和平滑操作对稀疏系数中的噪声干扰进行抑制,稀疏系数重构得到处理后的阵元域数据。本文方法的完整流程图如图 1 所示。

### 1.1 分帧和压缩感知

等间隔拖曳线列阵接收宽带频域数据可以建模为:

$$\mathbf{X}(f_n) = \mathbf{A}(f_n, \boldsymbol{\theta}) \mathbf{S}(f_n) + \mathbf{V}(f_n) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X}(f_n) = [\mathbf{X}_1(f_n) \ \mathbf{X}_2(f_n) \ \cdots \ \mathbf{X}_M(f_n)]^T$  为阵列接收数据的频域表示形式,  $M$  为阵元个数,  $f_n (n = 1, 2, \dots, N)$  表示每个子频带的中心频率,  $N$  为子频带个数,  $\mathbf{S}(f_n) = [\mathbf{S}_1(f_n) \ \mathbf{S}_2(f_n) \ \cdots \ \mathbf{S}_K(f_n)]^T$  为目标辐射信号的频域表示形式,  $K$  为目标个数;  $\mathbf{V}(f_n) = [\mathbf{V}_1(f_n) \ \mathbf{V}_2(f_n) \ \cdots \ \mathbf{V}_M(f_n)]^T$  为输入带限高斯白噪声;  $\mathbf{A}(f_n, \boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{a}(f_n, \theta_1) \ \mathbf{a}(f_n, \theta_2) \ \cdots \ \mathbf{a}(f_n, \theta_k)]$  为线列阵阵列流形;  $\mathbf{a}(f_n, \theta_k) = [1 \ \exp(-j(2\pi f_n/c)d \cos \theta_k) \ \cdots \ \exp(-j(2\pi f_n/c)(M-1)d \cos \theta_k)]^T$  为导向矢量;  $c$  为声速;  $d$  为相邻阵元间隔;  $\theta_k (k = 1, 2, \dots, K)$  为第  $k$  个目标信号的来波方向。

在得到被动拖曳线列阵接收数据后,首先须对数据进行分帧。令接收数据为  $\mathbf{x}_{\text{total}}$ , 时间总长度为  $T_{\text{total}}$ , 采样频率为  $f_s$ , 每帧数据时间长度为  $T_{\text{frame}}$ , 每帧数据步进时间长度为  $T_{\text{step}}$ , 则每帧数据采样点数为  $T_{\text{frame}} f_s$ , 接收数据总帧数为  $L = \lfloor (T_{\text{total}} - T_{\text{frame}}) / T_{\text{step}} + 1 \rfloor$ , 其中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整。令集合  $\{t_1, t_2, \dots, t_L\}$  表示帧号,  $\mathbf{x}(t_l) (l = 1, 2, \dots, L)$  表示第  $t_l$  帧数据, 则  $\mathbf{x}(t_l)$  是大小为  $M \times (T_{\text{frame}} f_s)$  的二维

矩阵。对  $\mathbf{x}(t_l)$  中每个阵元的数据进行快速傅里叶变换,得到各阵元数据在频点  $f_n$  处的频谱  $\mathbf{X}(f_n, t_l)$ , 矢量  $\mathbf{X}(f_n, t_l)$  大小为  $M \times 1$ , 则式 (1) 可以改写为:

$$\mathbf{X}(f_n, t_l) = \mathbf{A}(f_n, \boldsymbol{\theta}) \mathbf{S}(f_n, t_l) + \mathbf{V}(f_n, t_l) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{S}(f_n, t_l) = [\mathbf{S}_1(f_n, t_l) \ \mathbf{S}_2(f_n, t_l) \ \cdots \ \mathbf{S}_K(f_n, t_l)]^T$  为  $K$  个目标在第  $t_l$  帧时的信号矢量, 其大小为  $K \times 1$ ;  $\mathbf{V}(f_n, t_l)$  为第  $t_l$  帧时的输入噪声, 其大小为  $M \times 1$ 。

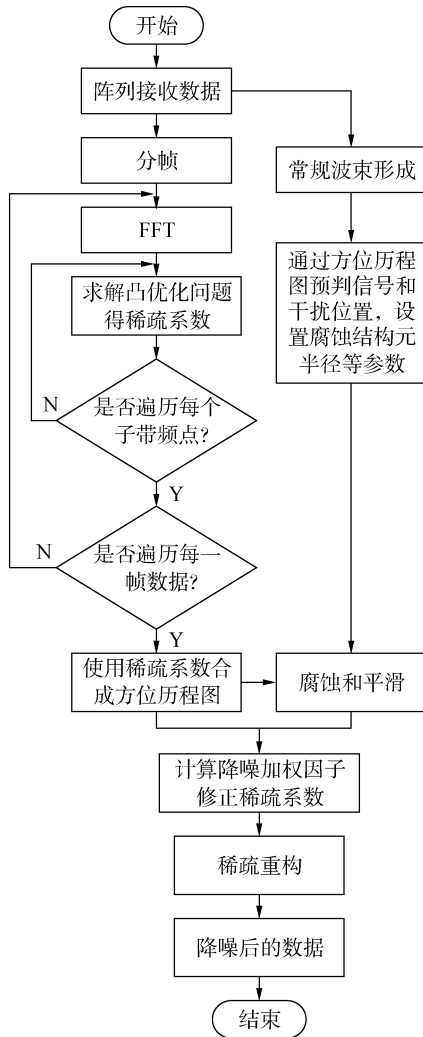


图 1 强噪声干扰抑制方法流程

Fig. 1 Flowchart of noise suppression methods

根据阵列信号频域压缩感知理论<sup>[19-20]</sup>,将探测空间按照足够小的角度间隔进行划分,则可得到新的来波方向集合  $\{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_H\} (H \gg K)$ 。假设每个来波方向  $\hat{\theta}_h (h = 1, 2, \dots, H)$  对应一个潜在的目标信号  $\hat{\mathbf{S}}_h(f_n) (h = 1, 2, \dots, H)$ , 则可得  $H$  个目标信号组成的信号矢量  $\mathbf{S}_a(f_n) = [\hat{\mathbf{S}}_1(f_n) \ \hat{\mathbf{S}}_2(f_n) \ \cdots \ \hat{\mathbf{S}}_H(f_n)]^T$ , 此时可得完备阵列流形矩阵  $\mathbf{A}_a(f_n, \hat{\boldsymbol{\theta}}) = [\mathbf{a}(f_n, \hat{\theta}_1) \ \mathbf{a}(f_n, \hat{\theta}_2) \ \cdots \ \mathbf{a}(f_n, \hat{\theta}_H)]$ , 其中  $\mathbf{a}(f_n, \hat{\theta}_h) = [1, \exp(-j(2\pi f_n/c)d \cos \hat{\theta}_h), \dots, \exp$

$(-j(2\pi f_n/c)(M-1)d \cos \hat{\theta}_h)]^T$ 。进而式(2)可以改写为:

$$\mathbf{X}_a(f_n, t_l) = \mathbf{A}_a(f_n, \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{S}_a(f_n, t_l) + \mathbf{V}_a(f_n, t_l) \quad (3)$$

式中  $\mathbf{S}_a(f_n, t_l)$  是频率为  $f_n$  时第  $t_l$  帧数据在空间上的稀疏表示。  $\mathbf{S}_a(f_n, t_l)$  为  $H \times 1$  矢量, 在原目标方向  $\theta_k (k = 1, 2, \dots, K)$  上对应的元素模值较大, 其他元素模值较小。根据压缩感知理论, 将  $\mathbf{S}_a(f_n, t_l)$  看作待求解稀疏系数,  $\mathbf{A}_a(f_n, \hat{\boldsymbol{\theta}})$  为感知矩阵,  $\mathbf{X}_a(f_n, t_l)$  为观测向量,  $\mathbf{V}_a(f_n, t_l)$  为观测噪声。可通过求解凸优化问题得到信号频域稀疏系数:

$$\begin{cases} \min \|\mathbf{S}_a(f_n, t_l)\|_1 \\ \text{s.t. } \mathbf{X}_a(f_n, t_l) = \mathbf{A}_a(f_n, \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{S}_a(f_n, t_l) \end{cases} \quad (4)$$

通过  $\mathbf{S}_a(f_n, t_l)$  可得到第  $t_l$  帧数据中频点  $f_n$  对应子带信号在不同扫描方向上的能量, 表达为:

$$\mathbf{P}_n(f_n, \hat{\boldsymbol{\theta}}, t_l) = |\mathbf{S}_a(f_n, t_l)|^2 \quad (5)$$

对每个频点的能量进行求和, 得到第  $t_l$  帧数据的空间谱  $\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t_l)$ 。  $\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t_l)$  为  $H \times 1$  矢量, 表达为:

$$\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t_l) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{P}_n(f_n, \hat{\boldsymbol{\theta}}, t_l) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\mathbf{S}_a(f_n, t_l)|^2 \quad (6)$$

### 1.2 腐蚀和平滑

将式(6)得到的每帧数据的空间谱进行组合, 得到方位历程图  $\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t) = [\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t_1) \ \mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t_2) \ \cdots \ \mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t_L)]$ ,  $\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t)$  是大小为  $H \times L$  的二维矩阵, 其中  $H$  为方位角总数,  $L$  为数据总帧数。在矩阵  $\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t)$  中, 每个元素值都为大于等于 0 的实数, 因此可将该矩阵视为二维数字图像, 可使用数字图像处理算法对其进行处理。

在矩阵  $\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t)$  中, 目标和噪声分别具有不同的空间稀疏特性。目标信号的能量聚集于目标运动的轨迹附近, 形成明显的亮带。而背景噪声能量随机分布于整个空间中, 以孤立点的形式存在。因此可以采用数字图像处理中的算法如腐蚀和平滑等消除其中的孤立点, 从而抑制噪声干扰。

根据数字图像处理理论<sup>[21]</sup>, 在二维图像中, 结构元  $\mathbf{E}$  对像素集合  $\mathbf{I}$  的腐蚀定义为  $\mathbf{I} \ominus \mathbf{E}$ , 其表达式为:

$$\mathbf{I} \ominus \mathbf{E} = \{z | (\mathbf{E})_z \subseteq \mathbf{I}\} \quad (7)$$

式中:  $z$  表示二维图像中某像素点;  $(\mathbf{E})_z$  表示在图像中以像素点  $z$  为中心被结构元  $\mathbf{E}$  覆盖的像素集合。若  $\mathbf{I}$  包含  $(\mathbf{E})_z$  中的全部像素, 则在腐蚀后的图像中保留像素点  $z$  的值, 否则像素点  $z$  的值置 0, 即像素  $z$  被腐蚀。在矩阵  $\mathbf{P}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, t)$  中, 令集合  $\mathbf{I} = \{\mathbf{P}(\hat{\theta}_h, t_l) | \mathbf{P}(\hat{\theta}_h, t_l) > 0, h = 1, 2, \dots, H; l = 1, 2, \dots, L\}$ , 令结构元  $\mathbf{E}$  为行列数为  $(2r + 1)$  的方形, 其中  $r$  为结构元

$E$  的半径,其单位为像素点个数。

由于噪声干扰在空间上的分布是非均匀的,因此在不同指向方向上应当采用不同的结构元半径,需要根据实际数据的情况进行预设。对接收数据进行 CBF 处理,根据 CBF 得到的方位历程图人为预设各方向上结构元半径的值,即每个方位角对应 1 个结构元半径。若某方向上存在较强的噪声干扰,干扰亮带的亮度和宽度较大,例如端射方向上通常存在较强的拖船干扰,则在噪声干扰方向上应当选择较大的结构元半径,反之对于目标较为密集或存在感兴趣弱目标的方向,应选择较小的结构元半径。设方向  $\hat{\theta}_h$  上对应的结构元半径为  $r(h)$ ,则经腐蚀后的方位历程图  $\mathbf{P}_{\text{erode}}(\hat{\theta}, t)$  中各元素的表达式为:

$$\mathbf{P}_{\text{erode}}(\hat{\theta}_h, t_l) = \begin{cases} \mathbf{P}(\hat{\theta}_h, t_l), & \prod_{a=h-r(h)}^{h+r(h)} \prod_{b=l-r(h)}^{l+r(h)} \mathbf{P}(\hat{\theta}_a, t_b) > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

为抑制噪声在时间上的起伏,需要按时间方向对空间谱进行平滑。本文采用均匀平滑方式,设  $R$  表示平滑窗口长度的 1/2,即在腐蚀后的空间谱中取某一帧及其前后各  $R$  帧数据,求其均值作为该帧平滑后的空间谱  $\mathbf{P}_{\text{smooth}}(\hat{\theta}, t)$ ,其表达式为:

$$\mathbf{P}_{\text{smooth}}(\hat{\theta}_h, t_l) = \frac{1}{2R+1} \sum_{b=l-R}^{l+R} \mathbf{P}_{\text{erode}}(\hat{\theta}_h, t_b) \quad (9)$$

平滑处理的结果  $\mathbf{P}_{\text{smooth}}(\hat{\theta}, t)$  为处理后的方位历程图矩阵。对于矩阵中的边缘点,可先将矩阵边缘进行复制扩展再进行腐蚀和平滑处理。经过腐蚀和平滑后的空间谱与原空间谱相比,噪声分量被抑制,信号分量没有较大的损失,利用处理后的空间谱构造降噪加权因子对稀疏系数进行修正,用修正后的稀疏系数可重构得到降噪后的数据。

### 1.3 降噪和重构

利用腐蚀和平滑后的空间谱与未经处理的空间谱中每个元素的比值构造降噪加权因子矩阵  $\mathbf{W}$ , 其每个元素的表达式为:

$$\mathbf{W}(\hat{\theta}_h, t_l) = \sqrt{\mathbf{P}_{\text{smooth}}(\hat{\theta}_h, t_l) / \mathbf{P}(\hat{\theta}_h, t_l)} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{P}(\hat{\theta}_h, t_l)$  为通过压缩感知得到的方位历程图中的元素,若该元素值为 0 则用极小值代替。

第  $t_l$  帧数据在频点  $f_n$  上的稀疏系数矢量为  $\mathbf{S}_a(f_n, t_l)$ , 令  $\mathbf{S}_a(f_n, t_l)$  的第  $h$  个元素为  $\mathbf{S}_a(f_n, \hat{\theta}_h, t_l)$ , 采用降噪加权因子对稀疏系数进行修正,得到降噪后的稀疏系数,表达式为:

$$\mathbf{S}_{\text{denoise}}(f_n, \hat{\theta}_h, t_l) = \mathbf{S}_a(f_n, \hat{\theta}_h, t_l) \times \mathbf{W}(\hat{\theta}_h, t_l) \quad (11)$$

从式(11)中可以看出,在同一帧同一指向方向上,不同频点对应的稀疏系数的加权因子相同。将

各个波束指向方向上降噪后的稀疏系数  $\mathbf{S}_{\text{denoise}}(f_n, \hat{\theta}_h, t_l)$  进行组合,得到降噪后的稀疏系数矢量  $\mathbf{S}_{\text{denoise}}(f_n, t_l)$ , 矢量  $\mathbf{S}_{\text{denoise}}(f_n, t_l)$  的大小为  $H \times 1$ 。

最后利用完备阵列流形矩阵  $\mathbf{A}_a(f_n, \hat{\theta})$ , 实现对阵列接收信号的重构,表达式为:

$$\mathbf{X}_{\text{denoise}}(f_n, t_l) = \mathbf{A}_a(f_n, \hat{\theta}) \mathbf{S}_{\text{denoise}}(f_n, t_l) \quad (12)$$

式中  $\mathbf{X}_{\text{denoise}}(f_n, t_l)$  为降噪后第  $t_l$  帧频点  $f_n$  处的阵列信号。依次得到各个子带频点对应的数据,对其进行逆傅里叶变换,可以得到第  $t_l$  帧降噪后的每个阵元的时域数据,继而依次对每一帧数据进行重构和逆傅里叶变换即可完成强噪声干扰抑制处理过程。利用处理后的阵元域数据,可以继续波束形成和信号检测等操作。

## 2 算法仿真数据分析

使用仿真数据对本文方法进行验证,仿真参数设置如下:拖曳线列阵的阵元个数为 45,工作频带为 500~1 000 Hz,阵元间隔为 0.75 m,仿真总时长为  $T_{\text{total}} = 120$  s,采样频率为 32 kHz。仿真远场 3 个目标的接收信噪比分别为 5、-5、0 dB,各组目标信号互不相关,目标与接收阵列处于相对运动状态,噪声为与信号互不相关的高斯白噪声。仿真实验示意图如图 2 所示。

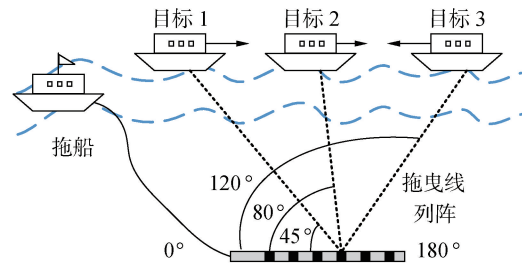


图 2 仿真实验示意

Fig. 2 Schematic diagram of simulation experiment

设置每帧数据长度  $T_{\text{frame}} = 1$  s,每帧数据步进时间长度  $T_{\text{step}} = 1$  s。设拖船船艏方向为  $0^\circ$ ,船艉方向为  $180^\circ$ 。由于本文只研究针对稀疏系数进行处理以实现噪声干扰抑制的方法,与凸优化算法本身无关,因此本文在所有实验数据的处理过程中均采用正交匹配追踪算法(orthogonal matching pursuit, OMP)求解凸优化问题。设波束总数  $H = 1\ 801$ ,  $\hat{\theta}_1 = 0^\circ$ ,  $\hat{\theta}_H = 180^\circ$ ,相邻方位角间隔  $0.1^\circ$ 。设置各个方向腐蚀操作的结构元半径如表 1 所示,设置平滑操作窗口的半窗长  $R = 2$ 。

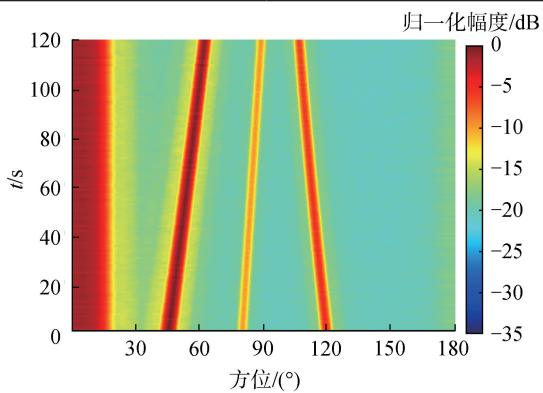
对仿真的阵元域数据直接进行 CBF 处理,得到方位历程图,如图 3(a)所示。在  $0^\circ \sim 20^\circ$  方向为拖

船干扰,目标 1 从  $45^\circ$  运动到  $62^\circ$ ,其强度最高。目标 2 从  $80^\circ$  运动到  $90^\circ$ ,其强度最弱。目标 3 从  $120^\circ$  运动到  $106^\circ$ ,其强度居中。对强噪声干扰抑制后的阵元域数据进行 CBF 处理,得到方位历程图如图 3 (b) 所示。

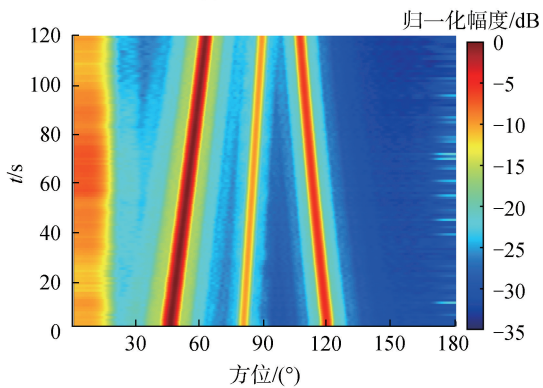
表 1 仿真实验腐蚀操作结构元半径

Table 1 Eroding structure element radius in simulation experiment

| 方位角/ $(^\circ)$ | $r$ /像素点个数 | 方位角/ $(^\circ)$ | $r$ /像素点个数 |
|-----------------|------------|-----------------|------------|
| 0~20            | 20         | 77~91           | 1          |
| 20~42           | 5          | 91~105          | 5          |
| 42~65           | 2          | 105~121         | 2          |
| 65~77           | 5          | 121~180         | 5          |



(a) 噪声抑制前



(b) 噪声抑制后

图 3 仿真数据噪声抑制前后 CBF 方位历程

Fig. 3 Bearing-time recording of CBF before and after noise suppression in simulation data

将处理前后的 CBF 处理结果进行对比可以发现,本文所提方法可以对接收数据中的噪声干扰进行有效抑制。在没有目标的区域,如  $30^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $100^\circ$  和  $130^\circ \sim 180^\circ$  方向,处理后数据的空间谱相对强度有明显降低,表明噪声强度被抑制,而 3 个目标所在的区域能量没有大的损失,因此图像对比度得到提升,有利于目标检测。在  $0^\circ \sim 20^\circ$  方向上存在较强的拖船干扰,经强噪声干扰抑制处理后拖船干扰的相对强度减弱,这表明本文方法对端射方向的拖船干扰有一定抑制作用。但由于端射方向拖船干扰强度较强,能量相对集中,在腐蚀操作中使用当前的结构

元半径未能完全将本舰干扰完全滤除,应当加大该半径的值。

通过图 4 所示的单个时间点 20 s 处归一化空间谱估计结果可知,处理前后  $45^\circ$ 、 $80^\circ$  和  $120^\circ$  方向上的目标强度基本保持一致,而其他方向上噪声干扰被明显抑制。统计方位历程图中各点在处理前后的功率之比,用该值的对数衡量仿真实验数据中的强噪声干扰在处理前后被抑制的程度,在本次仿真实验中强噪声干扰功率平均被抑制 5.09 dB,最大被抑制 15.60 dB。

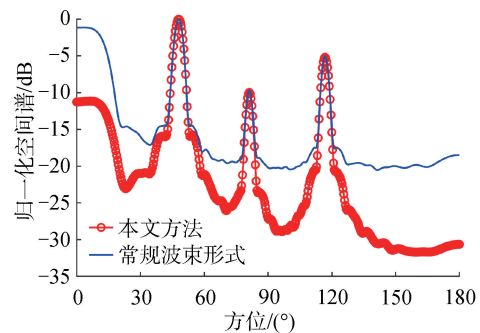


图 4 仿真数据单个时间点 20 s 处归一化空间谱

Fig. 4 Normalized spatial spectrum at single time point of 20 s in simulation data

上述结果表明,本文方法可以有效抑制仿真数据中的强噪声干扰,但噪声干扰的衰减幅度与腐蚀操作的结构元半径有关,该半径需要根据 CBF 的结果人为预判,对算法的效果有直接影响。

### 3 海试数据分析

通过处理海试数据验证本文方法的可行性。使用被动拖线阵对水中目标进行探测,实验地点位于中国大连某港口,实验时间为 2023 年 12 月。拖线阵的阵元个数为 90,相邻阵元间距为 0.75 m,工作深度为水下 15 m,工作频带范围为 500~1 000 Hz,采样频率为 64 kHz。

实验数据时间总长度  $T_{\text{total}} = 300$  s,设每帧数据时间长度  $T_{\text{frame}} = 5$  s,每帧步进时间长度  $T_{\text{step}} = 0.5$  s。求解凸优化问题时,设波束总数  $H = 1\ 801$ , $\hat{\theta}_1 = 0^\circ$ , $\hat{\theta}_H = 180^\circ$ ,相邻方位角间隔  $0.1^\circ$ 。进行腐蚀和平滑处理时,设置各方向上结构元半径如表 2 所示,设置平滑窗口的半窗长  $R = 5$ 。

使用本文方法对海试数据进行处理,对处理前后的数据分别进行 CBF 计算,得到噪声干扰抑制前后的方位历程图如图 5 所示。通过对比噪声抑制前后的 CBF 结果可知,在小于  $20^\circ$  和大于  $160^\circ$  方向上存在较强的拖船干扰,经过噪声抑制处理后,拖船干扰的能量明显减少,其中大于  $160^\circ$  方向的干扰能量被明显压制,在前 170 s 数据中, $0^\circ \sim 20^\circ$  方向上的拖船干扰被明显压制,但 170 s 后  $0^\circ \sim 20^\circ$  方向上的拖

船干扰仍有较多残留,这说明该区域拖船干扰能量更强,未能被完全腐蚀,这与仿真实验中拖船干扰未能被完全抑制的原因相同。在 80°和 140°方向上没有目标,经噪声抑制处理后,两方向的空间谱能量被有效抑制,与有目标的区域对比度更强。在其他存在目标的方向上,经噪声抑制后的目标轨迹更加清晰,有利于对目标进行检测和跟踪。综上所述,本文所提强噪声干扰抑制方法能够有效压制背景噪声,提升信噪比,明显提升方位历程图的对比度,并抑制端射方向的拖船干扰。

表 2 海试数据腐蚀操作结构元半径

Table 2 Eroding structure element radius in sea trial data

| 方位角/(°) | r/像素点个数 | 方位角/(°) | r/像素点个数 |
|---------|---------|---------|---------|
| 0~30    | 30      | 86~133  | 3       |
| 30~65   | 1       | 133~150 | 5       |
| 65~72   | 3       | 150~160 | 2       |
| 72~86   | 10      | 160~180 | 5       |

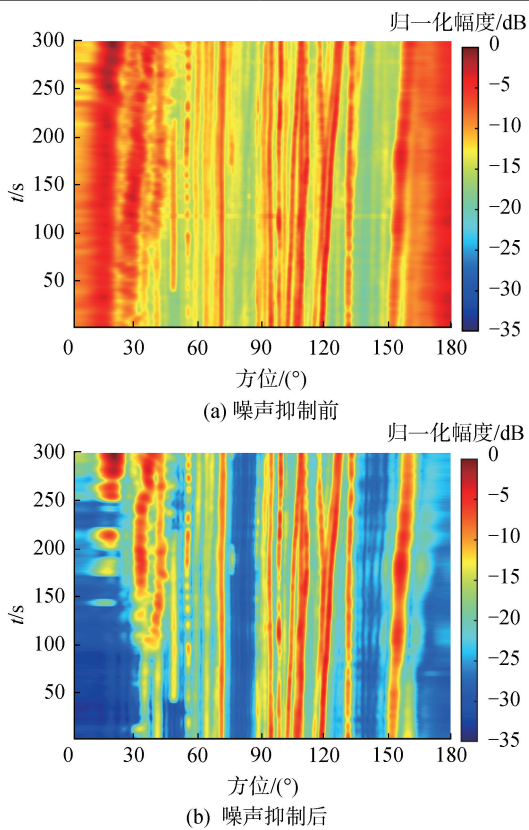


图 5 海试数据噪声抑制前后 CBF 方位历程

Fig. 5 Bearing-time recording of CBF before and after noise suppression in sea trial data

选取时间点 150 s 处的数据,分别绘制处理前后的空间谱进行对比,如图 6 所示。从图 6 中可知,强噪声干扰抑制处理后,在 15°方向的拖船干扰被抑制约 22.3 dB,表明该区域的拖船干扰被明显压制。在 80°和 140°方向上,背景噪声分别被抑制约 12.3 dB 和 6.1 dB。在 115°和 126°方向上的波谷变得更深,而在两方向附近的波峰高度没有降低,表明

本文方法可以在有效压制接收数据中强噪声干扰的同时尽可能保证目标能量不被衰减。在 45°~65°及 95°~100°方向上,空间谱的波谷更深,但是波峰的高度有所降低,这与求解凸优化问题的算法有效性和腐蚀操作结构元的半径有关,若求解凸优化问题的算法产生的数据残差较大或腐蚀操作结构元半径较大,则会对目标的能量产生衰减。统计方位历程图中各点在处理前后的功率之比,用该值的对数衡量海试数据中的强噪声干扰在处理前后被抑制的程度,在本次海试数据中强噪声干扰功率平均被抑制 5.78 dB,最大被抑制 30.67 dB。在海试数据处理过程中端射方向设置的结构元半径较大,因此拖船干扰被抑制的幅度较仿真实验更大。

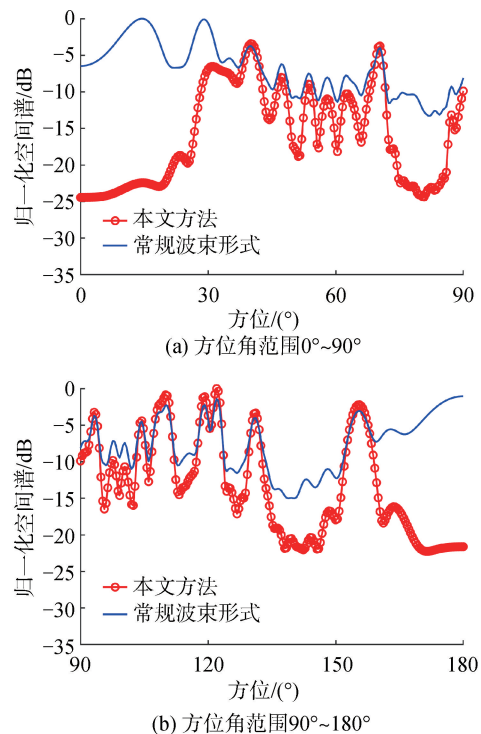


图 6 海试数据单个时间点 150 s 处归一化空间谱

Fig. 6 Normalized spatial spectrum at single time point of 150 s in sea trial data

上述海试数据的处理结果表明,在存在拖船干扰和众多目标的实际场景中,本文所提方法可以有效压制强噪声干扰,但噪声干扰被抑制的幅度与腐蚀操作的结构元半径强相关,需要人为选择合适的参数。

#### 4 结论

1)为抑制被动拖线阵声呐接收数据中的强噪声干扰,本文以频域阵列信号压缩感知理论为基础,利用强噪声干扰和目标信号在空间上的不同稀疏特性,提出了一种稀疏系数腐蚀和平滑后重构的强噪声干扰抑制方法。

2)本文方法在仿真和实际场景中均具有较好的强噪声干扰抑制能力。在本文参数条件下,仿真

数据和海试数据中的强噪声干扰功率在处理前后分别平均被抑制 5.09 dB 和 5.78 dB,达到了抑制强噪声干扰的目的。

3) 由于本文方法需要求解稀疏系数,因此处理效果依赖于求解凸优化问题时所采用方法的有效性。当目标信号能量很低时,其对应的稀疏系数较小,空间稀疏性较强,求解凸优化问题时有较大概率无法解到正确的稀疏系数,可以考虑寻找更好的凸优化问题的求解方法。

4) 腐蚀处理所使用的结构元半径需要根据实际情况人为预先设置,增加了算法使用的复杂度,限制了算法的效果,后续应研究自适应处理的相关算法。

## 参考文献:

- [1] 生雪莉,李德文,曹然,等.子空间判决分析的强干扰抑制[J].声学学报,2023,48(6):1119-1127.  
SHENG Xueli, LI Dewen, CAO Ran, et al. Strong interference suppression for subspace judgment analysis[J]. Acta acustica, 2023, 48(6): 1119-1127.
- [2] 夏麾军.水声阵列信号处理中的噪声消除方法研究[D].西安:西北工业大学,2017:2-9.  
XIA Huijun. Noise reduction method for the underwater array signal processing[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017: 2-9.
- [3] VACCARO R J, HARRISON B F. Optimal matrix-filter design[J]. IEEE transactions on signal processing, 1996, 44(3): 705-709.
- [4] VACCARO R J, CHHETRI A, HARRISON B F. Matrix filter design for passive sonar interference suppression[J]. Acoustical society of America journal, 2004, 115(6): 3010-3020.
- [5] 鄢社锋,侯朝焕,马晓川.矩阵空域预滤波目标方位估计[J].声学学报,2007,32(2):151-157.  
YAN Shefeng, HOU Chaohuan, MA Xiaochuan. Matrix spatial prefiltering approach for direction-of-arrival estimation[J]. Acta acustica, 2007, 32(2): 151-157.
- [6] 韩东,章新华,孙瑜.宽带最优空域矩阵滤波器设计[J].声学学报,2011,36(4):405-411.  
HAN Dong, ZHANG Xinhua, SUN Yu. Design of optimal broad band spatial matrix filter[J]. Acta acustica, 2011, 36(4): 405-411.
- [7] 梁国龙,赵文彬,付进.一种降维空域滤波矩阵的设计方法[J].电子学报,2017,45(2):417-423.  
LIANG Guolong, ZHAO Wenbin, FU Jin. Spatial matrix filter with dimension reduction design[J]. Acta electronica sinica, 2017, 45(2): 417-423.
- [8] 陈敬军,孙纯.一种基于近场传播特性的拖线阵声呐平台噪声抑制方法[J].舰船电子工程,2022,42(10):184-188,212.  
CHEN Jingjun, SUN Chun. A platform noise suppressing method for towed line array sonar based on near-field sound propagation characteristics[J]. Ship electronic engineering, 2022, 42(10): 184-188, 212.
- [9] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 57(8): 1408-1418.
- [10] FROST O L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1972, 60(8): 926-935.
- [11] YAN Shefeng, MA Yuanliang. Robust supergain beamforming for circular array via second-order cone programming[J]. Applied acoustics, 2005, 66(9): 1018-1032.
- [12] MA Y, YANG Y, HE Z, et al. Theoretical and practical solutions for high-order superdirectivity of circular sensor arrays[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2013, 60(1): 203-209.
- [13] 赵安邦,周彬,宋雪晶,等.水声阵列信号处理对角减载技术[J].哈尔滨工程大学学报,2014,35(11):1327-1331.  
ZHAO Anbang, ZHOU Bin, SONG Xuejing, et al. The technique of diagonal reduction processed with underwater acoustic array signal[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(11): 1327-1331.
- [14] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE transactions on information theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [15] CANDES E J, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. IEEE transactions on information theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [16] 康春玉,李文哲,夏志军,等.盲重构频域阵列信号的压缩感知水声目标方位估计[J].声学学报,2019,44(6):951-960.  
KANG Chunyu, LI Wenzhe, XIA Zhijun, et al. Direction of arrival estimation for underwater acoustic target based on compressed sensing after blind reconstruction of array signal in frequency domain[J]. Acta acustica, 2019, 44(6): 951-960.
- [17] DU Zhiyao, HAO Yu, QIU Longhao, et al. Sparsity-based direction-of-arrival estimation in the presence of near-field and far-field interferences for small-scale platform sonar arrays[J]. Journal of the acoustical society of America, 2024, 156(5): 2989-3005.
- [18] GUO Qijia, XIE Kean, YE Weibin, et al. A sparse bayesian learning method for moving target detection and reconstruction[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2025, 74: 1-13.
- [19] 郑恩明,陈新华,周权斌,等.一种复域压缩感知目标方位估计方法[J].电子学报,2021,49(11):2117-2123.  
ZHENG Enming, CHEN Xinhua, ZHOU Quanbin, et al. A target azimuth estimation method based on complex domain compressed sensing[J]. Acta electronica sinica, 2021, 49(11): 2117-2123.
- [20] 康春玉,李前言,章新华,等.频域单快拍压缩感知目标方位估计和信号恢复方法[J].声学学报,2016,41(2):174-180.  
KANG Chunyu, LI Qianyan, ZHANG Xinhua, et al. Direction of arrival estimation and signal recovery based on single snapshot compressed sensing in frequency domain[J]. Acta acustica, 2016, 41(2): 174-180.
- [21] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. Digital Image Processing Using MATLAB, Second Edition[M]. Knoxville: Gatesmark Publishing, 2009:486-500.

## 本文引用格式:

郑义,聂东虎,孙鑫鑫,等.稀疏系数腐蚀平滑后重构的拖线阵强噪声干扰抑制[J].哈尔滨工程大学学报,2025,46(8):1618-1624.  
ZHENG Yi, NIE Donghu, SUN Zongxin, et al. Strong noise interference suppression of a passive towed linear array based on sparse coefficient reconstruction after eroding and smoothing[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1618-1624.