

一种利用少快拍数据的宽带干扰鲁棒性抑制算法

王昊^{*①} 徐晓男^② 马启明^②

^①(杭州应用声学研究所 杭州 310023)

^②(杭州应用声学研究所声呐技术重点实验室 杭州 310023)

摘要: 针对被动声呐对宽带干扰抑制的应用需求, 该文提出一种利用少快拍数据的宽带干扰鲁棒性抑制算法。算法基于宽带干扰的预估方位, 得到带宽内多频点叠加的导向互谱密度矩阵, 以此估计出信号子空间, 并采用投影法对单位向量修正, 再逆转换得到干扰导向向量估计。对所有待抑制的干扰重复上述步骤, 得到干扰导向向量集, 进而构造抑制矩阵。对阵元域数据处理得到剔除掉干扰成分的阵元数据, 再进行空间处理即可得到最终的空间谱。理论分析及仿真、海试数据处理表明, 算法可采用少快拍, 甚至单快拍的频域数据进行处理。在目标运动、环境状态快速变化等不适宜时间积分的环境下依然具有良好性能, 同时对空间处理面临的各类失配具有鲁棒性。

关键词: 声呐; 宽带干扰; 鲁棒性抑制; 导向互谱密度矩阵; 信号子空间投影法

中图分类号: U666.73; TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)04-0851-07

DOI: 10.11999/JEIT180505

A Robust Broadband Interference Suppression Algorithm Based on Few Snapshots

WANG Hao^① XU Xiaonan^② MA Qiming^②

^①(Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Hangzhou 310023, China)

^②(Science and Technology on Sonar Laboratory, Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Hangzhou 310023, China)

Abstract: For the requirement of broadband interference suppression for passive sonar, a robust broadband interference suppression algorithm using few snapshots is proposed. Based on the estimated bearing of the broadband interference, the algorithm obtains the steered cross-spectral density matrix through multi-frequency data in the bandwidth and estimates the signal subspace, then uses the projection approach to correct the unit vector, and estimates the steering vector of interference through inversely transforming. Repeating above steps can obtain the interference steering vector set, thereby constructing the suppression matrix. The interference component of array data is eliminated by suppression matrix processing, and the final spatial spectrum can be obtained after spatial processing. The theoretical analysis, simulation and processing of sea trial data show that the proposed algorithm uses few, even single frequency domain snapshots processing, and still has good performance in environments where target motion, conditions rapid change and other conditions that time integration is unsuitable, at the same time, algorithm is robust for mismatches faced by space processing.

Key words: Sonar; Broadband interference; Robust interference suppression; Steered cross-spectral density matrix; Signal subspace projection approach

1 引言

在被动声呐的实际使用中, 宽带干扰多而强, 其旁瓣泄露严重影响着波束形成器的探测性能, 极大地制约了系统对环境中的弱目标的检测及分辨。同时, 宽带检测空间谱谱峰林立, 方位历程纵横交错, 这就使得对关注目标的稳定跟踪极为困难, 严

重影响着被动声呐的实用效能。

针对上述问题, 目前的干扰抑制算法大体分为两类, 一类是基于协方差矩阵特征值及特征向量的特性^[1-3]将其中的干扰成份剔除, 削弱干扰对弱目标的影响, 再使用波束形成器^[4,5]或者高分辨算法^[6,7]得到去除了强干扰谱峰的空间谱。此类算法需要利用阵元域协方差矩阵来估计强干扰成分, 由此需要时间积分, 而在实际环境中, 受目标运动、噪声不平稳等一系列因素的影响, 不可能有足够快拍以获

收稿日期: 2018-05-23; 改回日期: 2018-12-18; 网络出版: 2018-12-24

*通信作者: 王昊 wanghao_1964@sina.com

得低条件数、良置的协方差矩阵估计。

另一类方法是对阵元域数据进行空域滤波处理,即先对强干扰的方位进行预估,再对阵元数据进行预滤波,得到剔除掉强干扰成分的阵元数据。文献[8]通过求解2阶锥规划问题,得到空域滤波矩阵,只允许弱目标区域的信号通过,而抑制掉干扰与噪声。文献[9]提出的干扰阻塞算法,利用强干扰入射方向的先验知识构造阻塞矩阵,对阵列流形矩阵进行降秩处理,以抵消强干扰的作用。文献[10]基于压缩感知算法,利用单快拍数据进行干扰入射角估计,再进行干扰抑制,在干扰状态迅速变化的条件下,实现了干扰抑制。此类方法均是经由理想导向向量模型推导而得,实际中被动声呐受海流、目标运动、阵元幅相误差、波阵面模型失配等因素的影响,估计导向向量往往与真值存在误差,此时传统的干扰抑制算法性能将急剧下降,研究对干扰导向向量误差鲁棒的抑制方法是此类算法的关键。

通过上述分析可知,如何利用尽量少的快拍,同时达到强干扰鲁棒性抑制的目的是被动声呐宽带干扰抑制的关键。下面基于强干扰的预估方向提出一种鲁棒性干扰抑制算法,算法提出利用干扰的宽带特性,对导向互谱密度矩阵划分信号子空间,再利用投影法修正各个频点的导向向量,以此避免了导向向量误差引起的抑制性能下降,由于导向互谱密度矩阵采用了处理频带内多频点信息,故而可以利用少量甚至单个频域快拍数据进行处理。对所有待抑制的干扰重复上述操作,得到所有干扰的导向向量集,以此构造抑制矩阵对阵元域数据处理,得到剔除掉干扰成分的阵元数据,再进行空间处理得到最终的空间能量谱。全文在理论分析之后,对算法进行了仿真及海试数据验证。

2 导向互谱密度矩阵

假设空间中 J 个互不相关的宽带信号入射到阵元数为 M 的基阵,对第 k 段阵元域时域数据傅里叶变换,以将其在频域划分为若干满足窄带假设的窄子带,如此阵元频域数据在频点 f 的第 k 个频域快拍可表示为

$$\mathbf{x}(f, k) = \sum_{j=1}^J \mathbf{a}(f, \theta_j) s_j(f, k) + \mathbf{n}(f, k) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{a}(f, \theta_j)$ 和 $s_j(f, k)$ 分别表示第 j 个信号的在频点 f 的导向向量及信号成分, $\mathbf{n}(f, k)$ 表示阵列接收数据的频域噪声。

假设 $s_1(f, k)$ 为期望检测的弱目标, 由于干扰的输入信噪比往往较高, 可采用常规频域波束形成对少快拍数据进行处理得到空间谱, 再对干扰跟

踪, 得到其方位、输出信噪比估计, 对待抑制的干扰方位依输出信噪比由强到弱排序, 预估得到导向向量集 $\hat{\mathbf{a}}(f, \theta_j), j = 2, 3, \dots, J$, 那么对于导向 $\hat{\mathbf{a}}(f, \theta_j)$ 的矩阵为

$$\mathbf{T}(f, \theta_j) = \text{diag} \{ \hat{\mathbf{a}}(f, \theta_j) \} \quad (2)$$

其中, $\text{diag} \{ \cdot \}$ 表示构造对角方阵。

为实现方便, 令 $\mathbf{x}_{\text{tp}}(f, k) = \mathbf{x}(f, k)$, 利用导向矩阵对单个频域快拍的阵元数据进行转换, 得到

$$\hat{\mathbf{R}}(f, \theta_j, k) = \mathbf{T}^H(f, \theta_j) \mathbf{x}_{\text{tp}}(f, k) \mathbf{x}_{\text{tp}}^H(f, k) \cdot \mathbf{T}(f, \theta_j) \quad (3)$$

由于导向矩阵对各阵元间的相位差已进行了补偿, 故各个频点的互谱密度矩阵可叠加得到导向互谱密度矩阵^[11]

$$\hat{\mathbf{R}}(\theta_j, k) = \sum_{f=f_1}^{f_h} \mathbf{T}^H(f, \theta_j) \mathbf{x}_{\text{tp}}(f, k) \mathbf{x}_{\text{tp}}^H(f, k) \cdot \mathbf{T}(f, \theta_j) \quad (4)$$

其中, f_1, f_h 分别表示处理频带的上、下频点。经过上述处理导向互谱密度矩阵的导向向量变为单位向量 $\hat{\mathbf{b}} = [1; 1; \dots; 1]$ 。

对于入射信号静止、环境状态较为平稳的情况, 可以采用多次频域快拍求和的结果

$$\hat{\mathbf{R}}(\theta_j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{\mathbf{R}}(\theta_j, k) \quad (5)$$

其中, K 表示快拍数。

3 基于导向互谱密度矩阵的宽带干扰鲁棒性抑制算法

3.1 强干扰导向向量估计

当存在波束指向偏差、目标运动、阵元幅相响应误差等各类失配时, 直接利用估计导向向量进行强干扰抑制会导致算法性能下降, 由此考虑对其进行修正。根据子空间知识, 信号子空间与导向向量张成的空间等价, 即真实导向向量应完全属于信号子空间。特征空间投影法^[12]将估计导向向量向信号子空间投影, 可以去除与信号子空间正交的误差成分影响, 因而提高了波束形成器的鲁棒性, 由于其对各类失配均表现出了较好的性能, 故此下面采用投影法对估计导向向量进行修正。

实际中, 由于被动声呐处理频带内的频点数 f_n 总是远大于入射信号个数 J , 导向互谱密度矩阵由于采用了处理频带内多频点信息, 故而可以在少量甚至单个频域快拍条件下得到良好的特征值和特征向量估计, 这就使所提算法在时刻变化的实际环境中具有了性能优势。如此利用其特征向量划分信号

子空间,再采用投影法对估计导向向量 $\hat{\mathbf{b}} = [1; 1; \dots; 1]$ 进行修正得到

$$\tilde{\mathbf{b}}(\theta_j, k) = \mathbf{U}_s(\theta_j, k) \mathbf{U}_s^H(\theta_j, k) \hat{\mathbf{b}} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{U}_s(\theta_j, k)$ 表示信号子空间。

对于信噪比较低的情况, 会存在子空间混叠, 为了准确划分信号子空间, 文献[13]提出利用降序排列特征值对应的特征向量向估计导向向量投影来划分子空间, 在各类信噪比水平下取得了较好效果。基于此, 这里利用 $\hat{\mathbf{R}}(\theta_j, k)$ 的特征向量向 $\hat{\mathbf{b}}$ 投影以划分子空间。

对 $\hat{\mathbf{R}}(\theta_j, k)$ 特征分解得到

$$\hat{\mathbf{R}}(\theta_j, k) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \quad (7)$$

其中, λ_i 为矩阵按大小降序排列的特征值, $\mathbf{e}_i$ 为对应的特征向量, 为方便表示, 此处及后式略去特征值及特征向量后的 (θ_j, k) 符号。

将第 i 个特征向量向 $\hat{\mathbf{b}}$ 投影, 由于结果为复数, 故采用其平方

$$p(i) = \left| \mathbf{e}_i^H \hat{\mathbf{b}} \right|^2, i = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

由特征向量单位正交的性质可知, 式(8)满足 $\sum_{i=1}^M p(i) = M$, 投影平方的大小反映了两向量间相关性的。

定义子空间划分阈值参数 $0 < \rho < 1$, 利用 $p(i)$ 的占比估计子空间维数 s , 估计过程为

```
p_temp = 0;
for i = 1 : M
    p_temp = p_temp + p(i);
    if (p_temp/M > ρ) break; end
end
s = i.
```

得到信号子空间维数之后, 便可得到信号子空间的估计

$$\mathbf{U}_s(\theta_j, k) = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_s] \quad (9)$$

将估计得到的信号子空间代入式(6)即可得到修正后的导向向量 $\tilde{\mathbf{b}}(\theta_j, k)$ 。

3.2 鲁棒性强干扰抑制

对 $\tilde{\mathbf{b}}(\theta_j, k)$ 逆转换得到各个频点的干扰导向向量估计

$$\tilde{\mathbf{a}}(f, \theta_j, k) = \mathbf{T}(f, \theta_j) \tilde{\mathbf{b}}(\theta_j, k) \quad (10)$$

构造与干扰子空间正交的抑制矩阵^[14,15]

$$\mathbf{P}^\perp(f, \theta_j, k) = \mathbf{I} - \tilde{\mathbf{a}}(f, \theta_j, k) [\tilde{\mathbf{a}}^H(f, \theta_j, k) \cdot \tilde{\mathbf{a}}(f, \theta_j, k)]^{-1} \tilde{\mathbf{a}}^H(f, \theta_j, k) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为单位对角矩阵。

使用 $\mathbf{P}^\perp(f, \theta_j, k)$ 对阵元域数据进行处理

$$\mathbf{x}'_{\text{tp}}(f, k) = \mathbf{P}^\perp(f, \theta_j, k) \mathbf{x}_{\text{tp}}(f, k) \quad (12)$$

以处理后的阵元域数据更新原数据

$$\mathbf{x}_{\text{tp}}(f, k) = \mathbf{x}'_{\text{tp}}(f, k) \quad (13)$$

对所有待抑制干扰方向 θ_j , 继续重复式(2)至式(13)操作, 直至得到所有需要抑制的干扰导向向量集

$$\tilde{\mathbf{A}}(f, \Theta, k) = [\tilde{\mathbf{a}}(f, \theta_2, k), \tilde{\mathbf{a}}(f, \theta_3, k), \dots, \tilde{\mathbf{a}}(f, \theta_J, k)] \quad (14)$$

其中, $[\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_J] \in \Theta$ 为待抑制的干扰抑制角集合。

最后利用估计得到的干扰导向向量集构造抑制矩阵

$$\mathbf{P}^\perp(f, \Theta, k) = \mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}(f, \Theta, k) [\tilde{\mathbf{A}}^H(f, \Theta, k) \cdot \tilde{\mathbf{A}}(f, \Theta, k)]^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^H(f, \Theta, k) \quad (15)$$

对阵元域原始数据处理得到干扰抑制后的阵元域数据

$$\mathbf{y}(f, k) = \mathbf{P}^\perp(f, \Theta, k) \mathbf{x}(f, k) \quad (16)$$

再对干扰抑制后的阵元域数据进行频域空间处理即可得到最后的空间谱

$$P(\theta) = \frac{1}{K} \sum_{f=f_l}^{f_h} \sum_{k=1}^K \mathbf{w}^H(f, \theta) \cdot \mathbf{y}(f, k) \mathbf{y}^H(f, k) \mathbf{w}(f, \theta) \quad (17)$$

其中, $\mathbf{w}(f, \theta)$ 为加权向量。

3.3 算法流程

对少量甚至单个频域快拍数据采用低复杂度方法如常规频域波束形成处理, 得到空间能量谱, 再对需要抑制的强干扰跟踪, 将估计方位依照由空间谱估计的输出信噪比大小, 由强到弱降序排列, 将结果送予本文方法模块, 以此作为引导对强干扰进行抑制, 得到剔除掉强干扰成分的阵元域数据之后再进一步空间处理, 即可得到干扰净化后的空间谱。持续上述操作, 对常规空间处理的结果保持跟踪并反馈予本文方法模块, 以此持续得到干扰抑制的结果。

4 实验结果

4.1 仿真实验

仿真 1 仿真分析导向向量失配时算法的性能: 空间中有一个期望检测的弱目标, 入射方向为 110° , 信噪比为 -10 dB, 同时还有两个强干扰, 入射方向分别为 $[30^\circ, 110^\circ]$, 干噪比分别为 $[20, 10]$ dB,

目标与干扰的频带均为 $[50 \sim 150]$ Hz, 频率分辨率为0.977, 阵元数为48, 阵元间距5 m, 全空域以 1° 的扫描间隔均匀搜索, 声速 $c = 1500$ m/s, 对于本文方法的子空间划分参数 $\rho = 0.7$ 。考虑强干扰预估角 $\hat{\theta}$ 与真实方向均存在 0.3° 的误差, 常规波束形成、采用理想导引向量直接抑制法以及本文方法的单快拍空间谱如图1(a), 为方便对比, 同时给出不存在角度误差时几种方法的空间谱如图1(b)。

可以看出, 在干扰导引向量波束指向失配与波束宽度相当的条件下, 采用预估干扰角度直接进行抑制, 虽然在干扰方向形成了零陷, 但是在零陷附近出现了伪峰。本文方法鲁棒地在强干扰方向形成了零陷, 同时正确地检测到了弱目标, 相较不存在误差的情况, 本文方法的空间谱差异不大。由此可

知, 算法对强干扰入射方向预估角度具有鲁棒性, 实际中可以对单快拍空间谱实时跟踪以缓解波束指向失配。

仿真2 分析基阵阵元位置误差条件下的算法性能: 设阵元坐标误差相互独立, 服从均值为0, 标准差为 0.1×5 m的高斯分布, 则标准差与处理频率波长之比介于 $\left[\frac{0.05}{3}, 0.05\right]$ 之间, 同时, 强干扰

预估角 $\hat{\theta}$ 存在 0.1° 的误差, 其他条件同仿真1, 采用单个频域快拍数据进行处理, 依次得到50批数据的处理结果如图2(a)–图2(d)。

由常规波束形成的方位历程图2(a)可知, 目标淹没在强干扰的旁瓣泄露当中, 无法正确检测。采用理论导引向量抑制法的方位历程如图2(b), 虽然

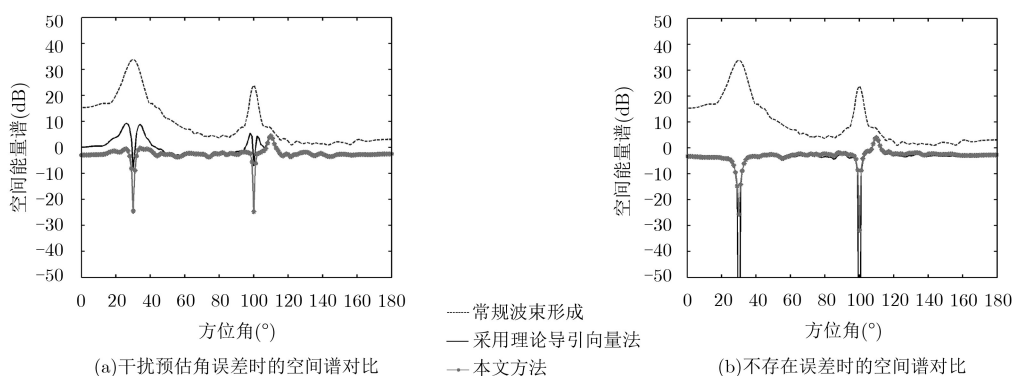


图1 干扰预估角失配条件下的处理结果

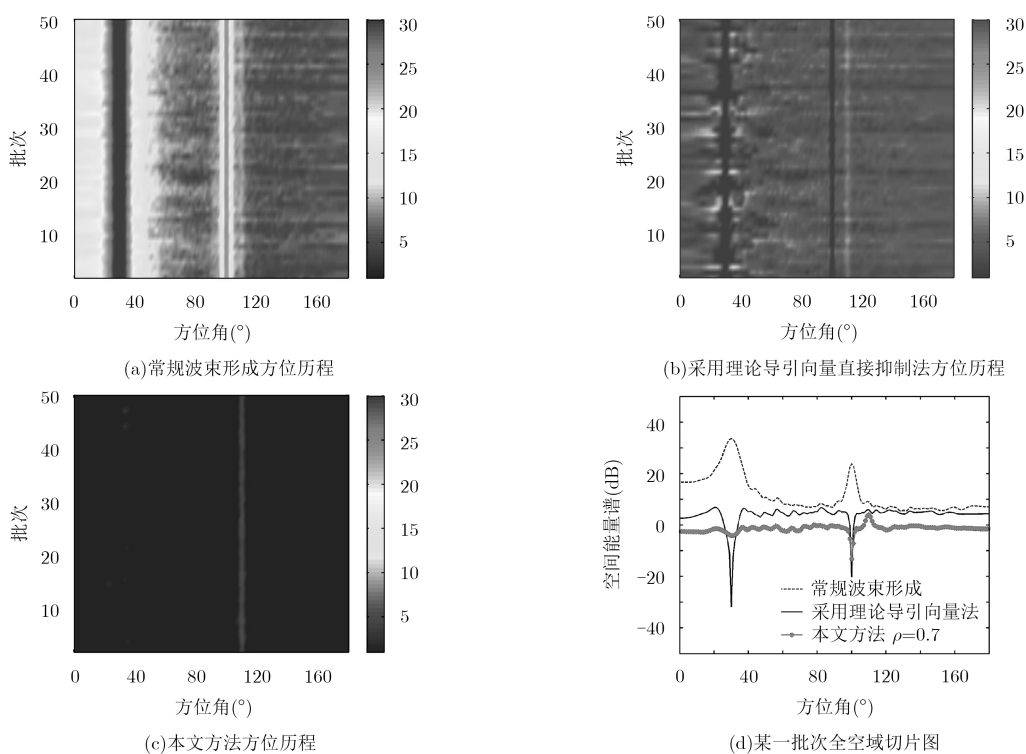


图2 阵元坐标误差及干扰预估角失配条件下的处理结果

在强干扰方向形成了较深的零陷，但是其附近出现了谱峰甚至高于目标的伪峰，同时目标的输出信噪比起伏、不稳定，这是由于阵元位置随机误差引起的，如此会严重影响目标的正确检测。本文方法的方位历程如图2(c)，对干扰形成了零陷，同时目标方位历程清晰稳定。几种方法在某时刻的空域切片如图2(d)，另外，实验验证了不同 ρ 下本文方法的处理结果， $\rho = 0.5$ 及 $\rho = 0.9$ 时的空间谱(为显示清晰，未在图中画出)基本与图中 $\rho = 0.7$ 的本文方法重合，如此可知，在此种仿真条件下，本文方法对阈值系数 ρ 不敏感，在不同阈值参数下均取得了良好的效果。

仿真 3 接下来观察目标运动情况下的算法性能：空间中有4个强干扰，入射方向分别为 $[30^\circ, 80^\circ, 100^\circ, 150^\circ]$ ，干噪比分别为 $[20, 10, 5, 5]$ dB，观察50个快拍的数据，在此时段内，强干扰的角度变化为 $[3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, -12^\circ]$ ，其余参数同仿真1，弱目标入射方向与信噪比保持不变，对单次快拍常规波束形成的空间谱跟踪，估计强干扰方位，以此作为输入进行干扰抑制，处理结果如图3(a)–图3(c)。

从常规波束形成的方位历程图3(a)可以看出，目标/干扰繁杂，弱目标的方位历程淹没在干扰之中。由于仿真中波束扫描间隔为 1° ，而干扰运动每个快拍的角度变化小于 1° ，故此存在波束指向误

差，采用理论导引向量直接干扰抑制的方法如图3(b)，同样出现了上述仿真存在的问题，在干扰零陷附近出现了伪峰，其峰值高度甚至大于弱目标的谱峰。对比本文方法的方位历程图3(c)，可以看出，算法有效抑制了强干扰，对运动干扰具有鲁棒性，画面中弱目标的历程干净清晰，如此改善了被动声呐在干扰丛生环境中对弱目标的检测。

仿真 4 最后验证算法对干扰频谱泄露的抑制效果：弱目标入射方向 110° ，信噪比 -10 dB，频带 $[50 \sim 150]$ Hz，另含有两根线谱，频率为74.22 Hz和94.73 Hz，同时还有一个强干扰，入射方向 80° ，干噪比20 dB，频带与弱目标相同，另含有两根线谱，频率为61.52 Hz和106.45 Hz，阵元坐标误差同仿真2，强干扰预估角误差 0.5° ，在计算导向互谱密度矩阵时，进行时间积分处理，频域快拍数为8。几种方法的空间谱及波束指向弱目标方向的单波束功率谱如图4(a)和图4(b)。

观察空间谱，相较常规波束形成及采用理论导引向量直接抑制法的处理的结果，本文方法更好地抑制了强干扰，同时正确地检测出了弱目标。观察单波束功率谱，其它两种处理均出现了强干扰线谱泄露的问题，本文方法有效抑制了强干扰的线谱泄露，正确地检测到了弱目标在74.22 Hz和94.73 Hz处的两条线谱，这将有助于强干扰影响下的弱目标

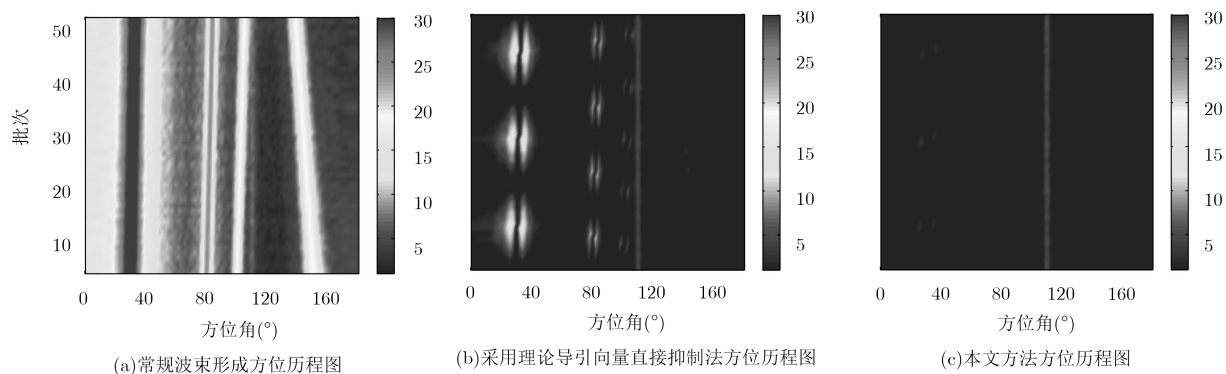


图3 目标运动条件下的处理结果

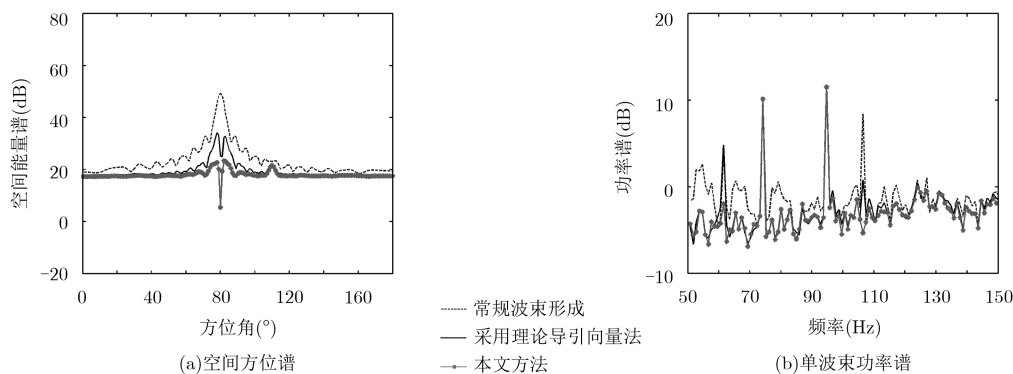


图4 空间谱及单波束功率谱对比图

特征提取,为后续的目标识别等模块提供准确的数据支持。

4.2 海试分析

利用某次海试的拖线阵数据验证算法的可行性。采用单个频域快拍的数据进行处理,得到宽带常规波束形成量化后的方位历程如图5(a),对空间

谱持续跟踪提取出干扰的方位历程如图5(b)。采用本文方法进行干扰抑制,其中,拖船噪声由于能量较强且分散在多个波束当中,故对其峰值及其近旁的多个方位进行抑制,得到剔除干扰成分的阵元域数据后,再进行常规波束形成处理得到方位历程如图5(c)。

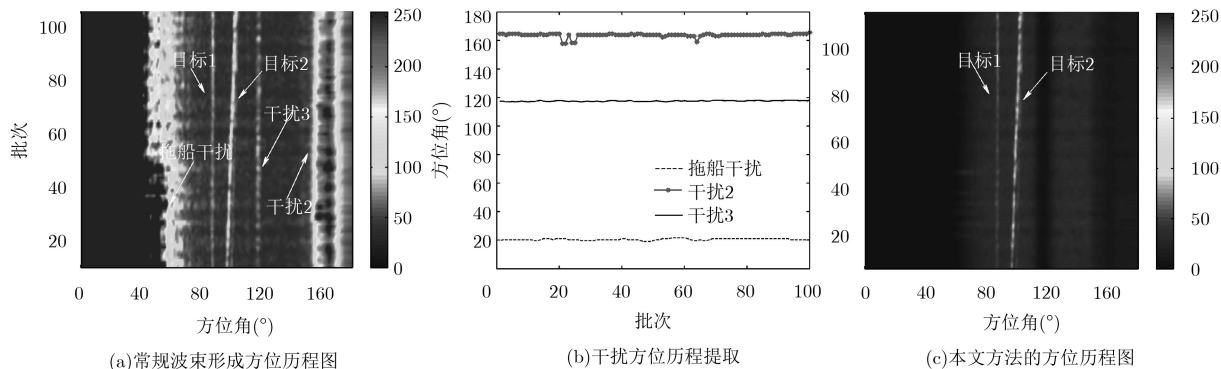


图5 鲁棒性干扰抑制的被动探测结果

对比图5(a)和图5(c)可以看出,拖船干扰、干扰2和干扰3被很好地抑制,表现为方位历程图上谱峰被剔除,目标1和目标2的方位历程较为明显地表现出来,如此更加有利于对目标的持续检测与稳定跟踪。

5 结论

针对被动声呐受宽带干扰影响,对弱目标的检测、跟踪性能下降,使用效能降低的问题,本文提出一种利用少快拍频域数据的宽带干扰鲁棒性抑制算法。算法具有两方面的优点:(1)采用多频点叠加的导向互谱密度矩阵进行子空间估计,在目标运动、环境状态快速变化的环境下具有良好性能。(2)采用投影法对导向向量进行修正,对各类失配引起的导向向量误差具有鲁棒性。仿真试验及海试数据处理表明,本文算法在目标运动及各类失配条件下均具有良好性能,为被动声呐的弱目标检测、特征提取以及全空域的画面净化,提供了有力支撑。

参考文献

- [1] HARRISON B. The eigenvector association method for adaptive interference suppression[J]. *Journal of the Acoustical Society of American*, 2004, 115(5): 2122–2128. doi: 10.1121/1.1699395.
- [2] REN Suiling, GE Fengxiang, and GUO Xin. Eigenanalysis-based adaptive interference suppression and its application in acoustic source range estimation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(4): 903–916. doi: 10.1109/JOE.2014.2359378.
- [3] WANG Quandong and REN Suiling. Robust generalized

sidelobe canceller with an eigenanalysis-based blocking matrix[C]. *International Conference on Electrical Engineering and Automation Control*, Nanjing, China, 2017: 410–415. doi: 10.12783/dtetr/iceac2017/10761.

- [4] 郭鑫, 葛凤翔, 任岁玲, 等. 一种最差情况下性能最优化的特征分析自适应波束形成方法[J]. *声学学报*, 2015, 40(2): 187–197. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2015.02.010.
- GUO Xin, GE Fengxiang, REN Suiling, *et al.* Eigenanalysis-based adaptive beamforming using worst-case performance optimization[J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(2): 187–197. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2015.02.010.
- [5] XIAO Fei, SONG Mingyu, GUO Xin, *et al.* Robust weak signal detection and bearing estimation[C]. *Oceans 2015*, Washington, D.C., USA, 2016: 1–5. doi: 10.23919/OCEANS.2015.7401990.
- [6] 柴立功, 罗景青. 一种强干扰条件下微弱信号DOA估计的新方法[J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(10): 1517–1520.
- CHAI Ligong and LUO Jingqing. A novel algorithm for weak signals DOA estimation under intensive interferences[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(10): 1517–1520.
- [7] 宫健, 楼顺天, 张伟涛. 一种强干扰条件下阵列天线波达方向估计方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(1): 168–172. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2018.01.030.
- GONG Jian, LOU Shuntian, and ZHANG Weitao. Method of array antenna DOA under strong interference presence[J]. *Journal of Xidian University*, 2018, 45(1): 168–172. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2018.01.030.
- [8] 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. doi: 10.3969/j.issn.0372-

- 2112.2017.02.021.
- LIANG Guolong, ZHAO Wenbin, and FU Jin. Spatial matrix filter with dimension reduction design[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(2): 417–423. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.021](#).
- [9] 陈辉, 苏海军. 强干扰/信号背景下的DOA估计新方法[J]. *电子学报*, 2006, 34(3): 530–534. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2006.03.033](#).
- CHEN Hui and SU Haijun. A new approach to estimate DOA in presence of strong jamming/signal suppression[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(3): 530–534. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2006.03.033](#).
- [10] 王文益, 杜清荣, 吴仁彪, 等. 一种利用少快拍数据的卫星导航高动态干扰抑制算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(10): 2445–2449. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01719](#).
- WANG Wenyi, DU Qingrong, WU Renbiao, *et al.* High dynamic interference suppression based on few snapshots for satellite navigation system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2445–2449. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01719](#).
- [11] KROLIK J and SWINGLER D. Multiple broad-band source location using steered covariance matrices[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, 37(10): 1481–1494. doi: [10.1109/29.35386](#).
- [12] FELDMAN D D and GRIFFITHS L J. A projection approach for robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(4): 867–876. doi: [10.1109/78.285650](#).
- [13] 王昊, 马启明. 修正主模抑制稳健自适应波束形成算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(11): 2620–2626. doi: [10.11999/JEIT170236](#).
- WANG Hao and MA Qiming. Modified dominant mode rejection robust adaptive beamforming algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(11): 2620–2626. doi: [10.11999/JEIT170236](#).
- [14] ELLINGSON S W and CAZEMIER W. Efficient multibeam synthesis with interference nulling for large arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(3): 503–511. doi: [10.1109/TAP.2003.809840](#).
- [15] WANG Yasen, BAO Qinglong, and CHEN Zengping. Robust mainlobe interference suppression for coherent interference environment[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016(1): 135–141. doi: [10.1186/s13634-016-0434-z](#).
- 王 昊: 男, 1989年生, 工程师, 研究方向为阵列信号处理.
- 徐晓男: 男, 1981年生, 高级工程师, 研究方向为阵列信号处理、水声信号处理.
- 马启明: 男, 1978年生, 研究员, 研究方向为阵列信号处理、水声信号处理.