

宽带子阵域特征空间稳健对角减载波束形成

王 昊, 马启明

(杭州应用声学研究所声纳技术重点实验室, 浙江杭州 310012)

摘 要: 针对宽带子阵域自适应波束形成器在实际使用中稳健性下降、对弱信号的检测能力受信噪比限制的问题, 提出了一种宽带子阵域特征空间稳健对角减载自适应波束形成方法. 首先提出利用子阵域特征空间投影法修正导向向量并得到球形不确定集的估计, 再利用 RCB(Robust Capon Beamformer) 算法得到约束条件下的最优权值. 另一方面, 利用子阵域互谱密度矩阵的最小特征值作为子阵域非相关噪声功率的估计并进行对角减载, 以最优权值对减载矩阵波束形成得到子带波束输出, 对每个窄子带重复上述处理, 再将结果非相干叠加即可得到本文方法的最终结果. 理论及实验分析表明方法能提高自适应波束形成器的稳健性及输出信噪比.

关键词: 信号与信息处理; 宽带稳健自适应波束形成; 子阵域特征空间; 对角减载

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)03-0584-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.03.010

Broadband Robust Diagonal Reducing Adaptive Beamforming Based on Subarray Subspace

WANG Hao, MA Qi-ming

(Science and Technology on Sonar Laboratory Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract: The robustness of broadband adaptive beamformer decreases in practice and the detection ability of weak signal is limited by signal noise ratio (SNR). To solve those problems, a broadband robust diagonal reducing adaptive beamforming based on subarray subspace is proposed. Firstly, the subarray subspace projection method is used to correct signal steering vector, and a spherical uncertainty set is designed to get subarray robust capon beamformer (RCB) weight vector. On the other hand, the least eigenvalue of subarray cross spectral density matrix is proposed as the estimation of non-correlated noise power, and the main diagonal of subarray cross spectral density matrix is subtracted from the noise power and processed by the proposed beamformer. The above process is repeated for each sub-band and all outputs are incoherently summed to obtain the final result of the proposed method. Theoretical and experimental analysis shows that the proposed algorithm can improve the robustness and the output SNR of the adaptive beamformer.

Key words: signal and information processing; broadband robust adaptive beamforming; subarray subspace; diagonal reducing

1 引言

自适应波束形成器具有相较常规波束形成器更好的强干扰抑制能力以及多目标分辨能力, 由此具有广泛的应用空间. 目前针对大孔径基阵的自适应波束形成技术, 常采用降维处理, 即将全阵协方差矩阵转换到一个低维矩阵, 以此降低算法的运算量、提高稳健性及加快收敛速度, 其中较为成熟且广泛使用的是子阵域自适应处理技术^[1], 它可以在不损失基阵孔径的情况下改善波束形成器性能, 但是每个子阵处理均采用了常规波束形成, 由此降低了干扰抑制能力, 同时由于各

子阵间隔大于信号半波长, 会出现栅瓣的问题. 对于被动无源探测, 常采用宽带信号以获得增益, 提高弱信号检测能力, 其做法通常是在频域划分出若干满足窄带假设的子带, 再对各个窄子带相干^[2]或非相干^[3]处理得到宽带空间谱. 其中宽带相干处理需要构造聚焦矩阵, 而聚焦矩阵的构造大多需要先验信息, 同时聚焦处理, 损失了信号的频谱特征, 无法为后续处理模块提供支持, 故此, 实际中多采用非相干处理. 由于各频点旁瓣位置不同, 同时, 对于大孔径基阵的应用环境, 输入信噪比往往较低, 强干扰的栅零点效应较弱, 多频点积分之后就不会出现窄带子阵域处理存在的伪峰问题, 故此

本文讨论不涉及最优子阵的划分,均采用均匀不重叠的划分方式.

实际环境中存在导引向量失配和协方差矩阵误差等一系列影响自适应波束形成器性能的因素. 现有的稳健自适应方法多是从对角加载^[4]出发,通过增加白噪声约束以增加波束形成器的稳健性. 文献[5]提出了一种不需要任何先验参数,自动获取最优对角量的算法,在小快拍及少阵元条件下具有稳健性,但是算法未对导引向量修正,随着快拍数及阵元数增加,各类失配引起的导引向量误差使算法性能严重下降. 文献[6]针对前述问题改进了算法,利用维纳滤波器进行噪声抵消,同时对导引向量估计,提升了此类算法的性能. 但是,算法需要求解最优化的专门工具,这就极大的制约了其实用性. RCB^[7]是目前应用较为广泛的稳健自适应方法,它具有清晰的理论框架,但是合适大小的不确定集选取又是一个新的问题^[8]. 特征空间法^[9,10]是一类区别于对角加载法的稳健自适应方法,它利用信号子空间与导引向量的投影修正误差,但是在快拍数不足及信噪比较低的情况下性能急剧恶化,同时信号子空间的准确划分又是比较困难的问题^[11].

针对前述问题,这里基于子阵域自适应波束形成器算法,利用子阵特征向量与导引向量相关性的差异及球形不确定集约束法,提出一种子阵域特征空间稳健自适应波束形成方法. 另一方面,现有的自适应波束形成器的研究,多是针对如何提高稳健性,降低空间处理增益损失,少有关于降低背景噪声级的研究,而信号的输入信噪比是影响目标检测的重要因素. 现有的对角减载自适应技术^[12],都是利用对角减载的协方差矩阵构造波束形成器,这样会降低其稳健性,故需要极大的快拍数以保证稳健性,因而对大孔径基阵不具有

$$\mathbf{T}_b(f, \theta) = \frac{1}{N_{\text{sub}}} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{[1:N_{\text{sub}}]}(f, \theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{a}_{[N_{\text{sub}}+1:2 \times N_{\text{sub}}]}(f, \theta) & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{a}_{[(M_{\text{sub}}-1) \times N_{\text{sub}}+1:M]}(f, \theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{a}_{[1:N_{\text{sub}}]}(f, \theta)$ 表示 $\mathbf{a}(f, \theta)$ 的 $[1:N_{\text{sub}}]$ 元素,其余符号意义类似. 即可得到子阵域互谱密度矩阵

$$\mathbf{R}_b(f, \theta) = \mathbf{T}_b^H(f, \theta) \mathbf{R}(f) \mathbf{T}_b(f, \theta) \quad (4)$$

可以看出转换矩阵具有如下属性

$$\mathbf{T}_b^H(f, \theta) \mathbf{T}_b(f, \theta) = \frac{1}{N_{\text{sub}}} \mathbf{I}_b \quad (5)$$

其中, \mathbf{I}_b 为 $M_{\text{sub}} \times M_{\text{sub}}$ 维的单位阵,由此可知转换矩阵不改变背景噪声特性.

在子阵域转换过程中,已经进行了一次常规波束形成,再基于 Capon 波束形成器的最优化准则^[13],可以得到子阵域自适应波束形成器的最优权重

实用性. 这里提出一种对角减载方法,利用子阵域互谱密度矩阵的最小特征值作为子阵域非相关噪声功率的估计,对角减载得到背景噪声级更小的新矩阵,再利用上文提出的波束形成器加权求和得到子带波束输出. 对每个子带进行相同处理,再将各子带非相干叠加即可得到本文方法的最终结果. 在算法描述之后,利用仿真实验及海试数据验证了算法的性能.

2 子阵域自适应波束形成

假设空间中 J 个相互独立的信号分别从 θ_j 方向入射到阵元数为 M 的阵列,阵列接收信号的第 k 个频域快拍模型可以表示为

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

其中, $\mathbf{a}(f, \theta_j)$ 和 $s_j(f, k)$ 分别表示第 j 个信号在频点 f 的导引向量及信号, $\mathbf{n}(f, k)$ 表示阵列噪声.

若各个阵元接收信号之间相互独立,噪声为相互独立的空时高斯白噪声,则理论阵元域互谱密度矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(f) &= \mathbf{E}[\mathbf{x}(f, k) \mathbf{x}(f, k)^H] \\ &= \sum_{j=1}^J \sigma_j^2(f) \mathbf{a}(f, \theta_j) \mathbf{a}(f, \theta_j)^H + \sigma_n^2(f) \mathbf{I} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,符号 $[\]^H$ 和 $\mathbf{E}[\]$ 分别表示共轭转置及期望, $\sigma_j^2(f)$ 以及 $\sigma_n^2(f)$ 分别表示第 j 个信号功率、噪声功率, \mathbf{I} 为 $M \times M$ 维的单位矩阵.

构造一个降维矩阵,将全阵分为 M_{sub} 个互不重叠的子阵,每个子阵含有 $N_{\text{sub}} = M/M_{\text{sub}}$ 个阵元. 当扫描波束指向 θ 时,相应的扫描向量为 $\mathbf{a}(f, \theta) = [e^{-j2\pi f \tau_m(\theta)}, e^{-j2\pi f \tau_{m+1}(\theta)}, \dots, e^{-j2\pi f \tau_{m+M}(\theta)}]^T$, 其中 f 为子带频率, $\tau_m(\theta)$ 为第 m 个阵元的时延差, $[\]^T$ 表示转置,由此可以构造此方向的子阵域转换矩阵

$$\mathbf{w}_b(f, \theta) = \frac{\mathbf{R}_b^{-1}(f, \theta) \mathbf{b}}{\mathbf{b}^H \mathbf{R}_b^{-1}(f, \theta) \mathbf{b}} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{b} = [1; 1; \dots; 1]$ 表示 $M_{\text{sub}} \times 1$ 维的理想子阵导引向量,则子阵域自适应波束形成器的输出为

$$P(f, \theta) = \mathbf{w}_b^H(f, \theta) \mathbf{R}_b(f, \theta) \mathbf{w}_b(f, \theta) = \frac{1}{\mathbf{b}^H \mathbf{R}_b^{-1}(f, \theta) \mathbf{b}} \quad (7)$$

实际中难以得到理论互谱密度矩阵,以有限快拍对其进行估计, K 个频域快拍估计得到的阵元域互谱密度矩阵可表示为

$$\hat{\mathbf{R}}(f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}(f, k) \mathbf{x}^H(f, k) \quad (8)$$

故有限快拍下子阵域互谱密度矩阵的估计为 $\hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta) = \mathbf{T}_b^H(f, \theta) \hat{\mathbf{R}}(f) \mathbf{T}_b(f, \theta)$, 在快拍数趋于无穷的情况下, 前式趋近于式(4).

3 本文方法

3.1 子阵域特征空间方法

实际中受基阵幅相响应失配、基阵阵元位置失配、波束指向失配、波阵面模型失配(近场远场)等影响, 扫描向量 $\mathbf{a}(f, \theta)$ 存在失配问题, 此时, 子阵导向向量 \mathbf{b} 将偏离理论值, 不再是单位向量 $\hat{\mathbf{b}} = [1; 1; \dots; 1]$, 为提高子阵域自适应波束形成器的稳健性, 降低空间处理增益损失, 需要对 $\hat{\mathbf{b}}$ 进行修正.

对经过一级常规相移求和处理的子阵域互谱密度矩阵特征分解

$$\hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta) = \sum_{i=1}^{M_{\text{sub}}} \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \quad (9)$$

式中, λ_i 为按大小升序排列的特征值, \mathbf{e}_i 为对应的特征向量. 为表示方便, 此处及后式略去特征值、特征向量及子阵导向向量后的 (f, θ) 符号.

子阵域算法由于经过了第一级常规波束形成的处理, 非波束指向方向上的信号被抑制, 故此单纯利用 $\hat{\mathbf{R}}_b$ 特征值的数值大小来划分信号子空间已不适用, 文献[11]利用特征向量与估计导向向量的相关性大小来划分信号子空间, 随入射信号的信噪比大小自适应的调整子空间的维数, 由此可在不同信噪比水平下对信号子空间取得较好的估计, 下面将其引入到子阵域处理当中. 经过第一级常规波束形成处理, \mathbf{b} 与 $\hat{\mathbf{b}}$ 的偏差不会过大, 可利用第 i 个特征向量 \mathbf{e}_i 与 $\hat{\mathbf{b}}$ 相关系数的大小划分子空间, 由于相关系数为复数, 故采用其平方^[14]

$$\text{cor}_i = \left| \frac{\mathbf{e}_i^H \hat{\mathbf{b}}}{\|\mathbf{e}_i\| \|\hat{\mathbf{b}}\|} \right|^2, \quad i = 1, \dots, M_{\text{sub}} \quad (10)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示向量的范数, 对 cor_i 由大到小排序, 得到新序列 cor'_i , 对应的特征向量序号为 num_i , 其中, $\text{cor}'_{M_{\text{sub}}} \leq \dots \leq \text{cor}'_2 \leq \text{cor}'_1$. 相关系数平方的大小反映了两向量间相关性的大小, 故采用 cor'_i 的占比大小来划分信号子空间. 定义子空间划分阈值参数 $0 < \rho < 1$, 计算

$$C_{M_{\text{sub}}} = \sum_{i=1}^{M_{\text{sub}}} \text{cor}'_i, \quad \text{定义不等式} \quad (\text{cor}'_1 + \text{cor}'_2 + \dots + \text{cor}'_s) / C_{M_{\text{sub}}} > \rho \quad (11)$$

其中, s 为上式首次成立时的值, 即为信号子空间维数.

如此便可得到信号子空间的估计

$$\hat{\mathbf{E}}_s = [\mathbf{e}_{\text{num}_1}, \mathbf{e}_{\text{num}_2}, \dots, \mathbf{e}_{\text{num}_s}] \quad (12)$$

再将理想子阵导向向量向信号子空间投影, 得到修正的子阵导向向量

$$\bar{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{E}}_s \hat{\mathbf{E}}_s^H \hat{\mathbf{b}} \quad (13)$$

上式修正了导向向量, 得到了更加准确的估计, 同时,

这种投影相当于对互谱密度矩阵进行了降秩处理, 部分缓解了快拍数不足时, 小特征值及特征向量对自适应波束形成器性能的影响.

3.2 子阵域特征空间稳健自适应波束形成

受快拍数不足等条件的影响, 信号子空间存在估计误差, 投影得到的 $\bar{\mathbf{b}}$ 可能不在真实信号子空间之内, 故下面划定球形不确定集, 通过求解最优化问题得到最终的导引向量估计.

对 $\bar{\mathbf{b}}$ 的范数调整, 可以对 \mathbf{b} 进行估计

$$\mathbf{b} \approx \frac{\sqrt{M_{\text{sub}}} \bar{\mathbf{b}}}{\|\bar{\mathbf{b}}\|} \quad (14)$$

由此可以得到 $\bar{\mathbf{b}}$ 与 \mathbf{b} 的误差

$$\tilde{\varepsilon} \approx \left\| \frac{\sqrt{M_{\text{sub}}} \bar{\mathbf{b}}}{\|\bar{\mathbf{b}}\|} - \bar{\mathbf{b}} \right\| \quad (15)$$

以上式作为子阵域导向向量球形不确定集参数的估计. 不失一般性的情况下, 以三维空间为例, 示意各向量间的关系如图1.

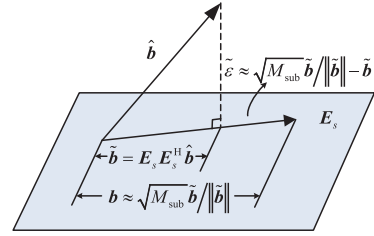


图1 三维子阵域导向向量空间示意图

将投影之后的子阵域导向向量以及估计的不确定集参数代入RCB的约束条件^[7]可得

$$\min_{\mathbf{b}} [\mathbf{b}^H \hat{\mathbf{R}}_b^{-1}(f, \theta) \mathbf{b}] \quad \text{subject to } \|\mathbf{b} - \bar{\mathbf{b}}\|^2 \leq \tilde{\varepsilon}^2 \quad (16)$$

利用拉格朗日算子法求解上述最优化问题, 可得子阵域导向向量的估计

$$\bar{\mathbf{b}} = \bar{\mathbf{b}} - [\mathbf{I}_b + \mu \hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta)]^{-1} \bar{\mathbf{b}} \quad (17)$$

式中 μ 为拉格朗日乘子, 将上式代回约束条件可得

$$g(\mu) = \left\| [\mathbf{I}_b + \mu \hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta)]^{-1} \bar{\mathbf{b}} \right\| = \tilde{\varepsilon} \quad (18)$$

由上节得到的特征值与特征向量, 再用牛顿二分法即可得到 μ 的数值解. 代入式(17)得到 $\bar{\mathbf{b}}$ 的解, 再代入子阵域最优权值式(6)即可得出本方法的最优权值表达式

$$\hat{\mathbf{w}}(f, \theta) = \frac{\hat{\mathbf{R}}_b^{-1}(f, \theta) \bar{\mathbf{b}}}{\bar{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{R}}_b^{-1}(f, \theta) \bar{\mathbf{b}}} \quad (19)$$

将上式与式(17)联立可得其对角加载形式的表达

$$\hat{\mathbf{w}}(f, \theta) = \frac{[\hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta) + \frac{1}{\mu} \mathbf{I}_b]^{-1} \bar{\mathbf{b}}}{\bar{\mathbf{b}}^H [\hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta) + \frac{1}{\mu} \mathbf{I}_b]^{-1} \hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta) [\hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta) + \frac{1}{\mu} \mathbf{I}_b]^{-1} \bar{\mathbf{b}}} \quad (20)$$

3.3 对角减载

由阵列信号处理的理论可知,互谱密度矩阵的对角线包含有阵元不相关噪声,由此我们想到对子阵域互谱密度矩阵的主对角线进行减载以缓解不相关噪声对信号检测的影响.以 $\hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta)$ 的最小特征值 $\lambda_1(f, \theta)$ 作为噪声功率的估计,可得对角减载后的新矩阵

$$\hat{\mathbf{R}}_{b\text{-diag}}(f, \theta) = \hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta) - \lambda_1(f, \theta) \mathbf{I}_b \quad (21)$$

在理想情况下,即入射信号个数小于子阵元数、采样快拍数趋于正无穷且不存在导引向量误差, $\hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta)$ 的最小特征值 $\lambda_1(f, \theta)$ 等于不相关噪声功率,可以将不相关噪声全部剔除掉,实际中受快拍数有限及导引向量误差的影响, $\hat{\mathbf{R}}_b(f, \theta)$ 的小特征值存在抖动, $\lambda_1(f, \theta)$ 将小于真实的噪声功率, $\hat{\mathbf{R}}_{b\text{-diag}}(f, \theta)$ 的对角线元素总满足大于零的条件.

对角减载后的稳健自适应波束形成器输出为

$$P(f, \theta) = \tilde{\mathbf{w}}^H(f, \theta) \hat{\mathbf{R}}_{b\text{-diag}}(f, \theta) \tilde{\mathbf{w}}(f, \theta) \quad (22)$$

3.4 宽带非相干处理

将宽带信号划分成若干窄子带,对每个窄子带进行相同处理,再把各个频点的结果非相干叠加即得到本文方法的宽带空间谱

$$P(\theta) = \frac{1}{N_f} \sum_{f=f_l}^{f_h} P(f, \theta) \quad (23)$$

其中, N_f 表示频点个数, f_l 和 f_h 分别表示处理频段频率范围.

由上述分析可知本文方法只有一个预先设置的参数即第 3.1 节的阈值系数 ρ .

4 实验结果

4.1 仿真实验

仿真采用 80 元均匀线列阵,阵元间距 0.5 m,声速 $c = 1500 \text{ m/s}$,空间中 5 个相互独立的远场信号入射到基阵,方位分别为 $[10^\circ, 40^\circ, 100^\circ, 103^\circ, 140^\circ]$,对应的信噪比分别为 $[5, -20, -5, -20, 0] \text{ dB}$,信噪比定义为频带内能量,处理频段为 $[1200 \sim 1500] \text{ Hz}$,频率分辨率为 2.44 Hz,噪声为各个阵元相互独立的高斯白噪声,将全阵分成 8 个互不重叠的子阵,频域快拍为 20,全空域以等余弦的方式扫描,波束数为 2 倍阵元数,下文分别以 MVDR-SUB、RCB-SUB、ES-RCB、ES-RCB-RE 表示子阵域 MVDR,子阵域 RCB、不进行对角减载的本文方法以及本文方法,对于 RCB-SUB,球形不确定集参数 $\varepsilon^2 = 0.3 \times \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}$,对于 ES-RCB 及 ES-RCB-RE,阈值参数 $\rho = 0.8$,不同算法的空间谱如图 2 所示,空间谱为 100 次独立重复试验平均的结果.图中 MVDR-SUB 受波束指向误差的影响,输出信噪比远小于理论值,RCB-SUB 一定程度缓解了由于波束指向误差导致的输出信噪比损失,提高了波束形成

器的稳健性,ES-RCB 优于 RCB-SUB,ES-RCB-RE 在保有 ES-RCB 算法稳健特性的同时,降低了背景噪声级,相较 ES-RCB 提升了所有目标的输出信噪比,性能优于前述几种方法.

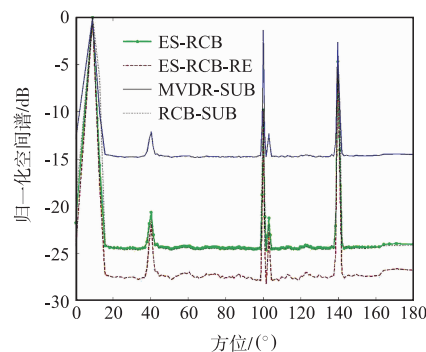


图2 存在波束指向误差时不同算法的空间谱

下面验证所提算法对期望信号的检测概率.空间中存在两信号,干扰入射方向为 80° ,输入干噪比 -10 dB ,保持不变,期望信号入射方向为 120° ,输入信噪比从 -50 dB 以 1 dB 为步长变化到 -20 dB ,频域快拍为 80 个,阈值参数 $\rho = 0.7$,其余参数同仿真一,每种信噪比水平下进行 200 次独立重复试验,依据上述几种算法的空间能量谱,统计期望信号正确检测的概率如图 3.

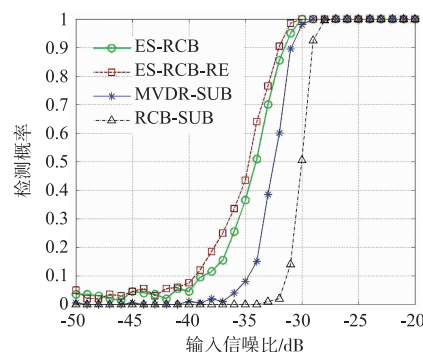


图3 检测概率随输入信噪比变化曲线

在低信噪比条件下,波束形成器稳健性足够,此时对其干扰抑制能力的需求大于稳健性的需求,RCB-SUB 由于过大的不确定集范围,损失了干扰抑制能力,导致其对期望信号的检测概率最低,甚至低于 MVDR-SUB,ES-SUB 由于能够随输入信噪比水平动态调整不确定集范围,平衡了自适应波束形成器的干扰抑制能力与稳健性,获得了优于前述方法的性能,ES-SUB-RE 在保有 ES-SUB 优势的同时,对角减载了非相关噪声,降低了背景噪声的影响,故此具有最优的检测性能.

这里再考察所提算法的多目标分辨能力.空间中存在两个期望信号,入射方向分别为 $[118^\circ, 120^\circ]$,输

入信噪比相等,从 -40dB 以 1dB 为步长变化到 -26dB ,干扰及其它仿真条件同前述仿真. 定义不等式 $|\hat{\theta}_1 - \theta_1| + |\hat{\theta}_2 - \theta_2| < |\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2|$, 其中, $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \theta_1, \theta_2$ 分别表示两期望信号估计方位及真实方位, 上式成立则认为此时两目标正确分辨^[12], 每种信噪比水平下进行 200 次独立重复试验, 统计分辨概率如图 4.

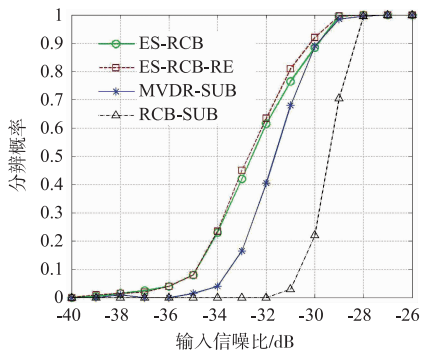


图4 两目标分辨概率随输入信噪比变化曲线

可以看出,RCB-SUB 在提高波束形成器稳健性时,损失了部分多目标分辨能力,其两目标分辨概率最低,ES-SUB 在保有稳健性的同时,没有降低波束形成的多目标分辨能力,分辨概率高于 MVDR-SUB,ES-SUB-RE 由于进一步进行了对角减载,缓解了背景噪声的影响,故而具有最优的多目标分辨能力.

接下来考察阈值参数 ρ 对本文方法检测性能的影响. 改变阈值参数,其它仿真条件同仿真一,分别得到 ρ 为 0.5、0.7、0.9 时本文方法的空间谱如图 5 所示,空间谱为 100 次独立重复试验平均的结果. 在上述条件下, $\rho = 0.9$ 时, $\theta = 40^\circ$ 和 $\theta = 103^\circ$ 的两个弱目标的输出信噪比相较于其他两种阈值系数最小,可知此时不利于低信噪比目标的检测,由上文分析可知,当 $\rho = 1$ 时,子空间维数等于子阵数,此时 $\bar{\varepsilon} = 0$,本文方法蜕化为常规自适应波束形成器,故阈值系数不宜过大, $\rho = 0.5$ 时, $\theta = 10^\circ$ 、 $\theta = 100^\circ$ 和 $\theta = 140^\circ$ 的三个强目标的谱峰均偏离至相邻波束,存在测向误差,由理论可知此时估计的信号子空间维数偏小,导致投影法修正的子阵导向向量误差偏大,故阈值系数亦不宜偏小,为在性能之间折中,选取 $\rho = 0.7$.

下面考察目标运动时算法性能. 设空间中存在一强一弱两个相互独立的信号,信噪比分别为 $[0, -15]\text{dB}$,在观察时刻内,目标一由 100° 运动到 112° ,而目标二由 110° 运动到 102° ,其余条件同仿真一. 几种算法某一时刻的全空域切片及此时某一频点、波束子阵域互谱密度矩阵的全部特征值如图 6(a)、(b). 由于目标运动,互谱密度矩阵中的特征值呈现出分散的特点,此时很难再利用特征值的特性对信号子空间准确划分,而 ES-RCB 及 ES-RCB-RE 利用特征向量与导向向量的相

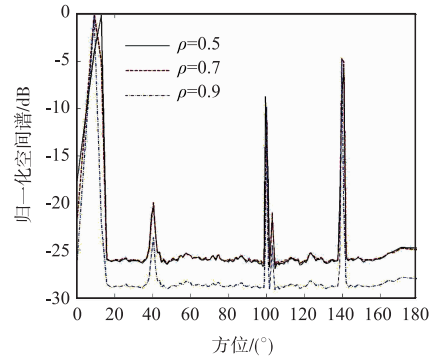


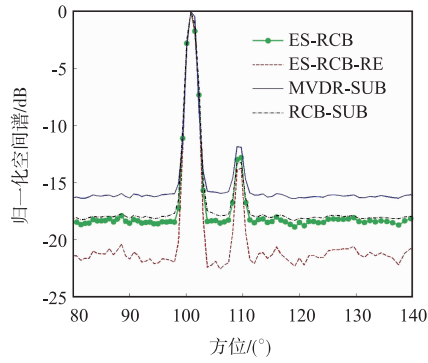
图5 不同阈值系数下本文算法的归一化空间谱

关性以得到信号子空间,在目标运动的情况下保持了自适应波束形成器的稳健性,输出信噪比高于 MVDR-SUB 及 RCB-SUB,ES-RCB-RE 在拥有 ES-RCB 稳健性优点的同时采用了对角减载,相较于其他几种算法两目标的输出信噪比最高,更有利于对目标的检测,以全局最大进行归一化,其方位历程图如图 6(c) 所示,可以看出两目标在一定时刻出现了交汇,之后运动又各自分开,在此种条件下,ES-RCB-RE 依然有效的检测出了两个目标.

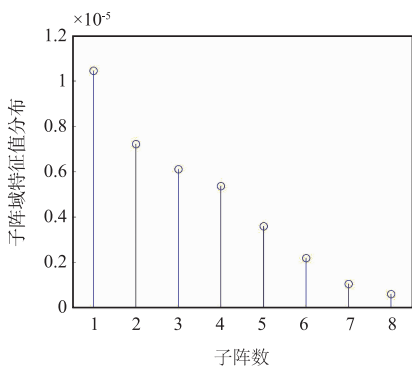
以弱信号峰值作为输出信号加噪声功率的估计,对全空域输出排序,选取最小的 10 个波束输出平均作为背景噪声级估计,依据空间谱计算不同算法检测弱目标的输出信噪比汇总如图 6(d),图中几种算法在 35 批至 70 批之间输出信噪比的抬高是由于目标运动,此时段弱目标与强目标混叠在同一波束中所致,可以看出本文方法在目标运动的过程中,相较 MVDR-SUB 及 RCB-SUB 始终具有更高的输出信噪比.

4.2 海试结果

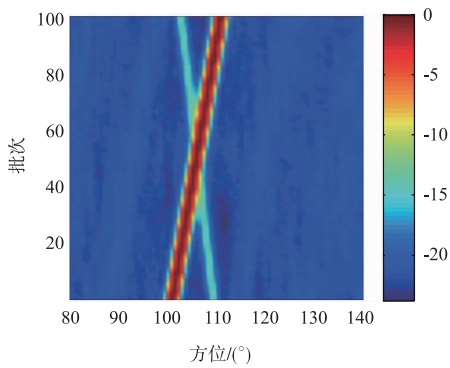
利用某次海试的拖线阵数据对本文方法进行验证,将全阵划分成 16 个互不重叠的子阵,每段时域数据采用 50% 重叠,频域快拍为 40 个,全空域以等余弦的方式扫描,波束数为 2 倍阵元数,阵元数与频点数均大于 100,具体的阵元数以及处理频率为本单位专有. MVDR-SUB 和 ES-RCB-RE 的方位历程如图 7(a)、(b),为方便对比,空间范围选取 $[60^\circ \sim 140^\circ]$. 可以看出在具有复杂多变干扰的环境中,ES-RCB-RE 能够提高系统的检测能力,相较 MVDR-SUB,对弱目标以及强目标的输出信噪比均有一定程度的提升. 几种算法在某一时刻的全空域切片及其局部放大图如图 8(a)、(b). 可以看出 RCB-SUB 提高了自适应波束形成器的稳健性,相较 MVDR-SUB 性能有所提升,ES-RCB 优于 RCB-SUB,无论是对强目标还是对弱目标,输出信噪比均高于前述方法,ES-RCB-RE 由于采用了稳健自适应波束形成器,同时对角减载了非相关噪声,性能最优.



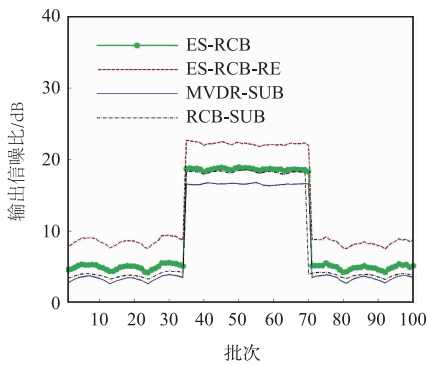
(a) 目标运动时某一时刻不同算法的空间谱



(b) 对应时刻子阵域互谱密度矩阵的全部特征值

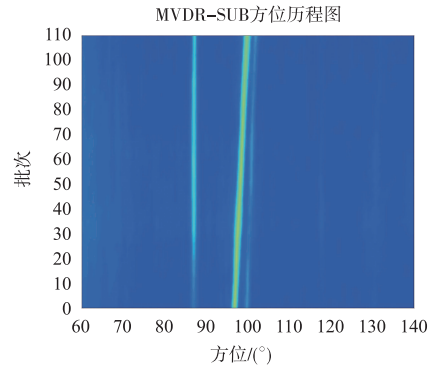


(c) 目标运动时ES-RCB-RE的方位历程图

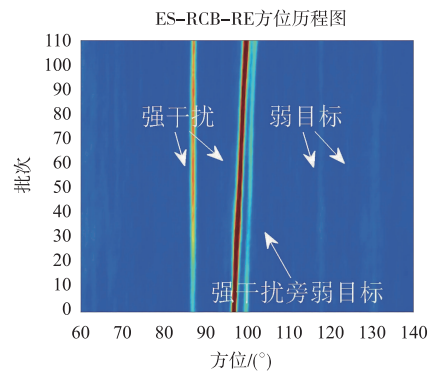


(d) 不同算法对弱目标的输出信噪比汇总图

图6 目标运动情况下算法的性能分析

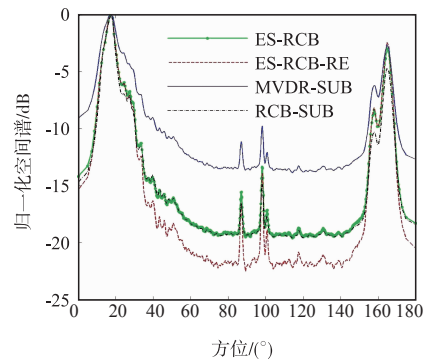


(a) MVDR-SUB的方位历程

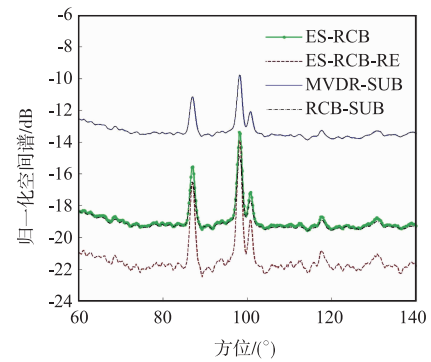


(b) ES-RCB-RE的方位历程

图7 不同算法的方位历程图



(a) 不同算法在某一时刻的全空域切片



(b) 对应图 8(a) 的局部放大图

图8 某一时刻的归一化空间谱

5 结论

针对大孔径基阵宽带信号检测的问题,提出了宽带子阵域特征空间稳健对角减载自适应波束形成方法.算法利用子阵域互谱密度矩阵各特征向量与理想子阵导向向量的相关性大小划分出信号子空间,再用投影法及球形不确定集法得到约束条件下最优的导向向量估计.另一方面,利用子阵域互谱密度矩阵的最小特征值对角减载.最后,利用子阵最优权向量加权求和减载后的矩阵得到子带波束输出,再将各子带处理结果非相干叠加即得到最终结果.仿真实验及海试数据处理表明,本文方法可以有效克服导向向量失配、快拍数不足等原因导致的自适应波束形成器性能下降的问题,同时对角减载,降低了噪声级,两者相结合改善了实际使用中大孔径基阵对目标的检测能力.

参考文献

- [1] Abraham D, Owsley N. Preprocessing for high resolution beamforming [A]. Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C]. Asilomar USA; IEEE, 1989. 797 - 801.
- [2] Wang H, Kaveh M. Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wide-band sources [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1985, 33 (4): 823 - 831.
- [3] Kim B C, Lu I T. High resolution broadband beamforming based on the MVDR method [A]. Oceans 2000 MTS/IEEE Conference [C]. Providence, RI, USA; IEEE, 2000. 1673 - 1676.
- [4] Cox H, Zeskind R M, Owen M M. Robust adaptive beamforming [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1987, 35 (10): 1365 - 1376.
- [5] Du L, Li J, Stoica P. Fully automatic computation of diagonal loading levels for robust adaptive beamforming [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46 (1): 449 - 458.
- [6] Ke Y, Zheng C, Peng R, et al. Robust adaptive beamforming using noise reduction preprocessing-based fully automatic diagonal loading and steering vector estimation [J]. IEEE Access, 2017, 5 (99): 12974 - 12987.
- [7] Li J, Stoica P, Wang Z. On robust Capon beamforming and diagonal loading [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 51 (7): 1702 - 1715.
- [8] Somasundaram S D, Parsons N H. Evaluation of robust capon beamforming for passive sonar [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36 (4): 686 - 695.
- [9] Feldman DD, Griffiths L J. A projection approach for robust adaptive beamforming [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 42 (4): 867 - 876.
- [10] 赵永仓, 刘茂金, 张守宏. 一种改进的特征空间自适应波束形成算法 [J]. 电子学报, 2000, 28 (6): 313 - 316.
- [11] Zhao Y C, Liu M J, Zhang S H. A modified eigenspace-based algorithm for adaptive beamforming [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28 (6): 313 - 316. (in Chinese)
- [12] Huang F, Sheng W, Ma X. Modified projection approach for robust adaptive array beamforming [J]. Signal Processing, 2012, 92 (7): 1758 - 1763.
- [13] 夏麾军, 马远良, 汪勇, 等. 高增益对角减载波束形成方法研究 [J]. 声学学报, 2016, 41 (4): 449 - 455.
- [14] Xia H J, Ma Y L, Wang Y, et al. Study of high-gain beamforming using diagonal reducing [J]. Acta Acustica, 2016, 41 (4): 449 - 455. (in Chinese)
- [15] J Capon. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis [J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57 (8): 1408 - 1418.
- [16] Shen F, Chen F, Song J. Robust adaptive beamforming based on steering vector estimation and covariance matrix reconstruction [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19 (9): 1636 - 1639.

作者简介



王昊 男, 1989 年 7 月出生, 陕西西安人. 2011 年、2014 年在西北工业大学分别获学士、硕士学位. 现为杭州应用声学研究所工程师, 研究方向为阵列信号处理.
E-mail: wanghao_1964@sina.com



马启明 男, 1978 年 11 月出生, 山东枣庄人, 2001 年、2004 年在大连理工大学分别获学士、硕士学位, 2008 年在浙江大学获博士学位. 现为杭州应用声学研究所研究员, 研究方向为阵列信号处理、水声信号处理.