

导向矢量和协方差矩阵联合迭代估计的稳健波束形成算法

杨志伟^{*①②} 张攀^① 陈颖^① 许华健^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安电子科技大学信息感知协同创新中心 西安 710071)

摘要: 针对自适应波束形成器在目标导向矢量存在约束偏差时性能急剧下降的问题, 该文提出一种目标导向矢量和干扰噪声协方差矩阵联合迭代估计的稳健波束形成算法。该算法首先采用稀疏重构的方法得到目标导向矢量的初始值, 并通过从采样协方差矩阵中剔除目标信号估计值完成干扰加噪声协方差矩阵的初始化; 然后在建立导向矢量误差优化模型的基础上, 采用凸优化方法对目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵联合迭代求解。最后利用目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵的稳态估计值获得自适应权矢量。仿真结果表明该算法提高了波束形成器在目标导向矢量约束偏差时的输出信干噪比。

关键词: 自适应波束形成; 导向矢量约束偏差; 联合迭代; 凸优化

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-2874-07

DOI: 10.11999/JEIT180225

Steering Vector and Covariance Matrix Joint Iterative Estimations for Robust Beamforming

YANG Zhiwei^{①②} ZHANG Pan^① CHEN Ying^① XU Huajian^①

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Focusing on the problem of adaptive beamformer performance decreasing due to target steering vector constraint errors, an algorithm for robust beamforming with joint iterative estimations of steering vector and covariance matrix is proposed. First, the initial value of target steering vector is obtained by sparse reconstruction, following eliminating the target signal estimation in the sampling covariance matrix, the initialization of the covariance matrix is completed; Then, basing on the steering vector error optimization model, this algorithm adopts the convex optimization to estimate joint-iteratively target steering vector and interference plus noise covariance matrix. Finally, the adaptive weight vector is obtained with the steady estimations of steering vector and covariance matrix. Simulation results show output signal to interference and noise ratio is improved in the situation of target steering vector constraint errors.

Key words: Adaptive beamforming; Steering vector constraint errors; Joint iteration; Convex optimization

1 引言

自适应波束形成技术广泛应用于航空、航天、

雷达和通信系统, 通过在目标方向形成增益、干扰方向形成零陷, 提高输出信干噪比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)^[1]。但是, 实际工作环境中存在阵元位置误差、通道幅度相位误差等, 致使目标导向矢量约束存在偏差^[2, 3]。理论研究表明, 当目标导向矢量存在约束偏差, 在低信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)情况下, 可能出现主瓣偏移等问题, 降低输出SINR; 在高SNR情况下, 若接收数据含有目标信号, 甚至会出现目标“自消”现象, 导致输出SINR急剧恶化。因此, 对自适应波束形成方法进行稳健处理就变得尤为重要。

近年来, 学者们相继提出了多类自适应波束形

收稿日期: 2018-03-09; 改回日期: 2018-07-24; 网络出版: 2018-08-06

*通信作者: 杨志伟 yangzw@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671352), 国家青年科学基金(61501471), 上海航天科技创新基金(SAST2016027, SAST2016033), 教育部“认知无线电与信息处理”重点实验室基金(CRKL160206)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671352), The National Science Foundation for Young Scientists of China (61501471), Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Foundation (SAST2016027, SAST2016033), The Foundation of Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, Ministry of Education (CRKL160206)

成稳健处理方法。主要分为以下几类：加载类算法^[4-7]、导向矢量约束优化类算法^[8-15]和干扰加噪声协方差矩阵重构类算法^[16-23]。文献[4]提出对采样协方差矩阵加载一个固定的对角矩阵，提高波束形成器对快拍数不足的稳健性；但是加载量的选择一直是个问题。文献[5]提出结合广义线性组合(General Linear Combination, GLC)技术，利用采样协方差矩阵和单位阵的线性组合来估计协方差矩阵，避免了加载因子的选择问题，是一种自动对角加载方法。文献[6]提出构造一个可变对角加载矩阵，在低SNR保证加载因子很小，在高SNR保证加载因子变大，相当于人为注入色噪声，减弱了高SNR下的目标“自消”现象；但同时也降低了干扰的抑制能力。文献[8]提出的稳健Capon波束形成算法(Robust Capon Beamforming, RCB)，将导向矢量约束在球形不确定集中，从而确保了导向矢量误差在一定范围内波动时，波束形成器性能良好；但是当导向矢量误差波动范围大，算法的性能会急剧下降。文献[9]提出对导向矢量误差进行正交分解，估计目标的正交补空间来约束导向矢量误差，迭代估计导向矢量；但该方法估计的正交补空间存在误差，导致随着SNR增大性能大幅下降。文献[10]基于不确定集思想，并且利用子空间理论推导出了最优对角加载量的解析表达式；但是该算法对导向矢量约束能力有限，无法获得最优性能。文献[11]在多发多收(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达体制下，在目标方向区间施加幅度响应约束，提高了对导向矢量约束的稳健性。文献[13]提出先在目标大致区间构造一个线性空间，初步估计导向矢量，减小误差，再结合RCB算法二次优化导向矢量，提高了在多种误差下导向矢量的约束能力；但该方法在低SNR由于预估的导向矢量不够准确，性能有所下降。文献[15]提出利用信号子空间与噪声子空间的正交性，优化求解在先验导向矢量不确定集内最接近干扰子空间的导向矢量；但是该算法不能保证估计的目标导向矢量向真实方向靠近。

考虑到目标导向矢量存在误差时，利用含有目标的采样协方差矩阵去计算波束形成器的权矢量是产生目标“自消”现象的根本原因，因此通过估计不含目标的干扰加噪声协方差矩阵来提高波束形成器性能是一个不错的途径。文献[16]提出在非目标角度区域利用Capon功率谱积分估计干扰加噪声协方差矩阵，然后结合约束优化方法估计目标导向矢量，实现了高SNR下的稳健波束形成；但该方法在阵列流形误差下失去干扰抑制能力，性能大幅下降。文献[17]结合文献[16]中的干扰加噪声协方差矩

阵重构算法，然后利用Capon功率谱稀疏重构目标自相关矩阵来估计导向矢量，降低了计算复杂度；但是该方法存在和文献[16]相同的问题。文献[19]提出利用Capon功率谱在非目标角度区域构建环形不确定集，然后积分重构干扰加噪声协方差矩阵，提高了在阵列流形失配下的干扰抑制能力；但是该方法计算冗余度非常高。文献[20]利用RCB算法估计目标导向矢量，然后将目标从采样协方差矩阵中移除，估计干扰加噪声协方差矩阵，改善了RCB算法在高SNR下的性能；但是受限于目标导向矢量存在误差，性能提升有限。文献[22]提出结合文献[16]中目标导向矢量导的估计方法，在干扰的大概区间利用Capon功率谱稀疏重构干扰自相关矩阵估计干扰导向矢量，进而得到干扰加噪声协方差矩阵，该方法同样对阵元位置误差、幅度相位误差和互耦误差等不具有稳健性。

针对上述问题，本文提出目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵联合迭代估计的稳健波束形成算法。首先利用Capon谱稀疏重构目标相关矩阵，初步估计目标导向矢量；再基于最大似然准则，从采样协方差矩阵剔除目标信号完成干扰加噪声协方差矩阵的初始化；然后基于子空间理论，推导出对导向矢量约束误差稳健的凸优化模型，采用联合迭代优化方法估计出目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵。最后使用目标导向矢量和干扰噪声协方差矩阵的最优估计值计算自适应权。

2 信号模型

考虑 M 元理想均匀直线阵，目标从 θ_0 方向入射， J 个干扰分别从方向 $\theta_i, i = 1, 2, \dots, J$ 入射，阵列在 t 时刻接收的数据为

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{i=0}^J \mathbf{a}_i s_i(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中， \mathbf{a}_i 和 $s_i(t), i = 0, 1, \dots, J$ 分别表示第 i 个信源的导向矢量和复包络， $\mathbf{n}(t)$ 为高斯白噪声。

假设目标、干扰和噪声都是独立的，则阵列接收数据的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)\} = \mathbf{R}_S + \mathbf{R}_{JN} \quad (2)$$

$E\{\cdot\}$ 表示计算数学期望， $(\cdot)^H$ 表示计算共轭转置， $\mathbf{R}_S = \sigma_0^2 \mathbf{a}_0 \mathbf{a}_0^H$ 代表目标相关矩阵， σ_0^2 代表目标功率， $\mathbf{R}_{JN} = \sum_{i=1}^J \sigma_i^2 \mathbf{a}_i \mathbf{a}_i^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}$ 代表干扰加噪声协方差矩阵， $\sigma_i^2, i = 1, 2, \dots, J$ 代表第 i 个干扰的功率， σ_n^2 代表噪声功率， \mathbf{I} 代表 M 维单位矩阵。

基于线性约束准则的自适应波束形成器的加权矢量可表示为

$$\mathbf{W} = \alpha \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_0 \quad (3)$$

其中, $\alpha = 1/\mathbf{a}_0^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_0$ 表示归一化因子。实际计算中, \mathbf{R} 一般未知, 常利用采样协方差矩阵^[24]代替, 即:

$$\hat{\mathbf{R}} = (1/K) \sum_{t=1}^K \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t) \quad (4)$$

K 为快拍数。

3 典型稳健波束形成方法

3.1 基于子空间的稳健波束形成算法

文献[10]基于子空间理论, 利用目标真实导向矢量与噪声子空间的正交性, 结合不确定集思想来估计目标导向矢量 \mathbf{a}_0 , 即

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\mathbf{a}_0} \quad \mathbf{a}_0^H \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{a}_0 \\ \text{s.t.} \quad \|\mathbf{a}_0 - \tilde{\mathbf{a}}_0\|_2 \leq \varepsilon \end{array} \right\} \quad (5)$$

\mathbf{U}_N 是采样协方差矩阵的小特征值对应特征向量所张成的噪声子空间, $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 表示先验目标导向矢量, ε 代表不确定集半径, $\|\cdot\|_2$ 表示计算L-2范数。式(5)优化模型在给定的不确定集内通过求解与噪声子空间最正交的空间向量来提高稳健性, 但无法约束导向矢量远离干扰方向, 导致输出SINR有所下降。

3.2 干扰加噪声协方差矩阵和导向矢量估计算法

文献[19]利用稀疏重构方法估计干扰加噪声协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{JN}$ 为

$$\hat{\mathbf{R}}_{JN} = \int_{\theta \in \bar{\Theta}} \frac{\mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} d\theta \quad (6)$$

$\bar{\Theta}$ 为干扰区域。假设目标导向矢量可以表示为 $\mathbf{a}_0 = \tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp$, \mathbf{e}_\perp 表示与 $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 正交的误差分量。则导向矢量的估计值通过式(7)的优化模型求解:

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\mathbf{e}_\perp} \quad (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp) \\ \text{s.t.} \quad (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)^H \hat{\mathbf{R}}_{JN} (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp) \leq \tilde{\mathbf{a}}_0^H \hat{\mathbf{R}}_{JN} \tilde{\mathbf{a}}_0 \\ \tilde{\mathbf{a}}_0^H \mathbf{e}_\perp = 0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

式(7)优化模型利用干扰加噪声协方差矩阵约束目标导向矢量远离干扰方向, 提高了阵列输出性能; 但仅利用重构的干扰加噪声协方差矩阵来约束目标导向矢量存在以下问题:

(1) 不等式约束仅保证 $\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp$ 较 $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 更远离干扰信号, 无法确保 $\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp$ 一定与 $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 平行, 潜在的会降低目标信号的输出能量。

(2) 重构 $\hat{\mathbf{R}}_{JN}$ 的过程中未考虑阵元位置误差、幅度相位误差和互耦误差, 在实际工作环境中存在干扰加噪声协方差矩阵失配。

4 本文算法

考虑到3.1节和3.2节导向矢量优化模型存在的问题, 本文算法通过最大化阵列输出功率, 并约束目标导向矢量同时远离噪声子空间和干扰子空间, 实现目标导向矢量的最优估计。建立优化模型如式(8):

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\mathbf{e}_\perp} \quad (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp) \\ \text{s.t.} \quad \left\{ \begin{array}{l} \|\mathbf{U}_N^H (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)\|_2^2 \leq \|\mathbf{U}_N^H \tilde{\mathbf{a}}_0\|_2^2 \\ \|\mathbf{U}_J^H (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)\|_2^2 \leq \|\mathbf{U}_J^H \tilde{\mathbf{a}}_0\|_2^2 \\ \|\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp\|_2 = \|\tilde{\mathbf{a}}_0\|_2 \\ \tilde{\mathbf{a}}_0^H \mathbf{e}_\perp = 0 \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中, $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 表示先验导向矢量, \mathbf{e}_\perp 是与 $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 正交的误差向量, \mathbf{U}_N 是采样协方差矩阵特征值分解得到的噪声子空间, \mathbf{U}_J 是干扰加噪声协方差矩阵特征值分解得到的干扰子空间。第1项条件约束 $\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp$ 远离噪声子空间; 第2项条件约束 $\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp$ 远离干扰子空间; 第3项条件约束 $\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp$ 与 $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 模长相等; 第4项条件约束 $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 与 \mathbf{e}_\perp 正交, 再以最大化输出功率为目标函数估计误差向量 \mathbf{e}_\perp 。

易知将 $\|\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp\|_2 = \|\tilde{\mathbf{a}}_0\|_2$ 松弛为 $\|\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp\|_2 \leq \|\tilde{\mathbf{a}}_0\|_2$ 不改变优化问题的本质, 同时避免 $\mathbf{e}_\perp = 0$ 成为唯一解, 引入松弛系数 ξ (大于0), ξ 的值不会影响式(8)的最优解, 只影响收敛速度^[9], 式(8)修正为

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\mathbf{e}_\perp} \quad (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp) \\ \text{s.t.} \quad \left\{ \begin{array}{l} \|\mathbf{U}_N^H (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)\|_2^2 \leq \|\mathbf{U}_N^H \tilde{\mathbf{a}}_0\|_2^2 \\ \|\mathbf{U}_J^H (\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp)\|_2^2 \leq \|\mathbf{U}_J^H \tilde{\mathbf{a}}_0\|_2^2 \\ \|\tilde{\mathbf{a}}_0 + \mathbf{e}_\perp\|_2 \leq \|\tilde{\mathbf{a}}_0\|_2 + \xi \\ \tilde{\mathbf{a}}_0^H \mathbf{e}_\perp = 0 \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (9)$$

矩阵 $\hat{\mathbf{R}}^{-1}$, $\mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H$ 和 $\mathbf{U}_J \mathbf{U}_J^H$ 均正定, 式(9)是一个可解的2次约束2次优化问题。

求解优化问题式(9)需要已知 $\tilde{\mathbf{a}}_0$ 和 \mathbf{U}_J , 本文采用交替迭代方式在线估计, 其主要步骤是: 预估目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵; 采用凸优化方法求解目标导向矢量, 然后将目标信号分量从采样协方差矩阵剔除, 估计更精确的干扰加噪声协方差矩阵。上述求解目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵的过程交替迭代进行, 直至得到目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵的稳态估计。

4.1 目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵初估计

假设目标大致角度区间为 Θ , 利用Capon功率谱在该区间积分得到矩阵 \mathbf{Q} :

$$Q = \int_{\Theta} \frac{\mathbf{a}(\theta)\mathbf{a}^H(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{a}(\theta)} d\theta \quad (10)$$

$\mathbf{a}(\theta)$ 为来波方向 θ 对应的阵列流形。对矩阵 Q 进行特征值分解，目标导向矢量初始值选为最大特征值对应的特征向量^[17]：

$$\tilde{\mathbf{a}}_0 = \sqrt{M} \mathbf{P}(Q) / \|\mathbf{P}(Q)\|_2 \quad (11)$$

$\mathbf{P}(\cdot)$ 表示对矩阵做特征值分解得到最大特征值对应的特征向量。进而估计目标自相关矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_S$ 为

$$\tilde{\mathbf{R}}_S = \tilde{\sigma}_S^2 \tilde{\mathbf{a}}_0 \tilde{\mathbf{a}}_0^H \quad (12)$$

其中， $\tilde{\sigma}_S^2 = 1/\tilde{\mathbf{a}}_0^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_0$ 。

干扰加噪声协方差矩阵的初始值为

$$\tilde{\mathbf{R}}_{JN} = \hat{\mathbf{R}} - \tilde{\mathbf{R}}_S + \delta \mathbf{I} \quad (13)$$

其中，加载 $\delta \mathbf{I}$ 防止 $\tilde{\mathbf{R}}_{JN}$ 秩亏。

4.2 联合迭代估计目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵

本文联合迭代估计算法流程图如图1所示。

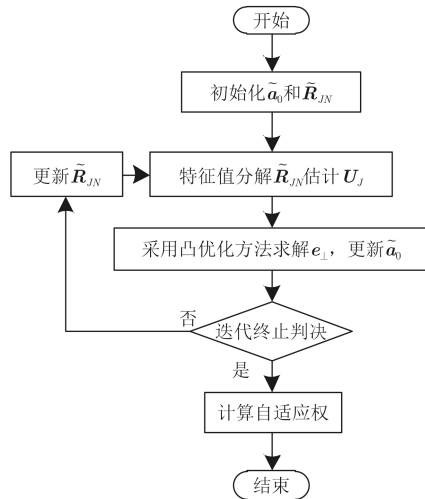


图1 联合迭代估计流程图

假设 k 为当前迭代次数，算法的具体步骤如下：

(1) 利用式(10)和式(11)初始化目标导向矢量 $\tilde{\mathbf{a}}_0(0)$ ，利用式(12)和式(13)初始化干扰加噪声协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{JN}(0)$ ；

(2) 特征分解干扰加噪声协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{JN}(k)$ ，估计干扰子空间 U_J ；

(3) 求解式(9)，估计得到目标导向矢量误差分量 \mathbf{e}_{\perp} ，更新目标导向矢量为 $\tilde{\mathbf{a}}_0(k) = \tilde{\mathbf{a}}_0(k-1) + \mathbf{e}_{\perp}$ ，并将 $\tilde{\mathbf{a}}_0(k)$ 归一化为 $\tilde{\mathbf{a}}_0(k) = \sqrt{M} \tilde{\mathbf{a}}_0(k) / \|\tilde{\mathbf{a}}_0(k)\|_2$ ；

(4) 进行迭代终止判决，若 $\tilde{\mathbf{a}}_0^H(k) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_0(k)$ 大于或等于 $\tilde{\mathbf{a}}_0^H(k-1) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_0(k-1)$ ，终止迭代，目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵的最优估计分别为 $\tilde{\mathbf{a}}_0(k-1)$ 和 $\tilde{\mathbf{R}}_{JN}(k-1)$ ；若 $\tilde{\mathbf{a}}_0^H(k) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_0(k)$ 小于

$\tilde{\mathbf{a}}_0^H(k-1) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_0(k-1)$ ，则利用更新的 $\tilde{\mathbf{a}}_0(k)$ ，结合式(12)和式(13)更新 $\tilde{\mathbf{R}}_{JN}(k)$ ，再重复步骤(2)和步骤(3)，直至终止。

4.3 求解加权向量

假设目标导向矢量的最优估计为 $\tilde{\mathbf{a}}_0$ ，干扰加噪声协方差矩阵的最优估计为 $\tilde{\mathbf{R}}_{JN}$ ，计算权矢量如式(14)：

$$\mathbf{W} = \tilde{\mathbf{R}}_{JN}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_0 / \tilde{\mathbf{a}}_0^H \tilde{\mathbf{R}}_{JN}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}_0 \quad (14)$$

5 仿真实验

仿真参数为：均匀线阵 ($M=8$)，阵元间距为 0.5λ ($\lambda=0.05$ m)，信源数为3，目标真实来波方向为 10° 、先验方向为 $\tilde{\theta}_0$ ，干扰来波方向为 -20° 和 30° ，干噪比均为30 dB，每次实验均进行200次蒙特卡洛仿真。

实验中对角加载(Diagonal Loading, DL)算法加载量为 $10\tilde{\sigma}_n^2$ ；文献[7]可变对角加载(Variable Diagonal Loading, VDL)算法求和区间为 $[\tilde{\theta}_0 - 5^\circ, \tilde{\theta}_0 + 5^\circ]$ ，求和间隔为 0.1° ；RCB算法约束参数为 $0.3M$ ；文献[11]双层估计(Double Estimation, DE)算法求和区间同VDL，特征向量个数为2；文献[19]干扰加噪声协方差矩阵重构(Interference plus Noise Covariance Matrix-Quadratic Constraint Quadratic Problem, IPNM-QCQP)算法求和区间为 $[-90^\circ, \tilde{\theta}_0 - 5^\circ] \cup (\tilde{\theta}_0 + 5^\circ, 90^\circ]$ ，求和间隔为 0.1° ；文献[20]改进的稳健算法(Robust Capon Beamforming-Interference plus Noise Covariance Matrix, RCB-IPNM)约束参数同RCB，加载量为采样协方差特征值分解最小特征值的10倍；本文联合迭代估计算法(Joint Iterative Estimation Algorithm, JIEA)求和区间同VDL，加载量 δ 同DL， ξ 设为0.1。

5.1 目标来波方向误差下算法仿真与分析

图2为目标来波方向误差下性能对比。图2(a)为来波方向误差为 2° (即 $\tilde{\theta}_0 = 8^\circ$) 输出 SINR 随输入 SNR 变化曲线，快拍数为100次；图2(b)为来波方向误差为 2° 输出 SINR 随快拍数变化曲线，输入 SNR 为0 dB。

当目标来波方向误差存在，观察图2(a)发现，本文算法和IPNM-QCQP算法与理想性能(OPT)接近，较其他算法优势明显，但是当输入 SNR 大于35 dB 时，本文算法性能有所下降，可能是因为利用式(13)估计的干扰加噪声协方差矩阵仍然含有目标分量；观察图2(b)发现，本文算法输出 SINR 在快拍数为50次时基本收敛，在小快拍数下也有一定优势。

5.2 目标来波方向误差与阵元位置误差下算法仿真与分析

图3为目标来波方向误差和阵元位置误差(服从 $[-0.05\lambda, 0.05\lambda]$ 均匀分布)下性能对比。图3(a)为来波方向误差为 2° (即 $\tilde{\theta}_0 = 8^\circ$)下输出SINR随输入SNR变化曲线, 快拍数为100次; 图3(b)为来波方向误差为 2° 输出SINR随快拍数变化曲线, 输入SNR为0 dB。

当目标来波方向误差和阵元位置误差同时存在, 观察图3(a)发现, 本文算法整体性能良好, 输入SNR在15~30 dB, 较其他算法优势明显, 当输入SNR大于30 dB, 本文算法性能有所下降, 可能是因为利用式(13)估计的干扰加噪声协方差矩阵仍

含有目标, 导致信号“自消”; 观察图3(b)发现, 本文算法输出SINR在快拍数为50次时基本收敛, 在小快拍数下较其他算法也有一定优势。

5.3 目标来波方向误差与幅度相位误差下算法仿真与分析

图4为目标来波方向误差和幅度相位误差(幅度误差服从 $[-0.5 \text{ dB}, 0.5 \text{ dB}]$ 均匀分布, 相位误差服从 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 均匀分布)下性能对比。图4(a)为来波方向误差为 2° (即 $\tilde{\theta}_0 = 8^\circ$)输出SINR随输入SNR变化曲线, 快拍数固定为100次; 图4(b)为来波方向误差为 2° 输出SINR随快拍数变化曲线, 输入SNR固定为0 dB。

当目标来波方向误差和幅度相位误差同时存

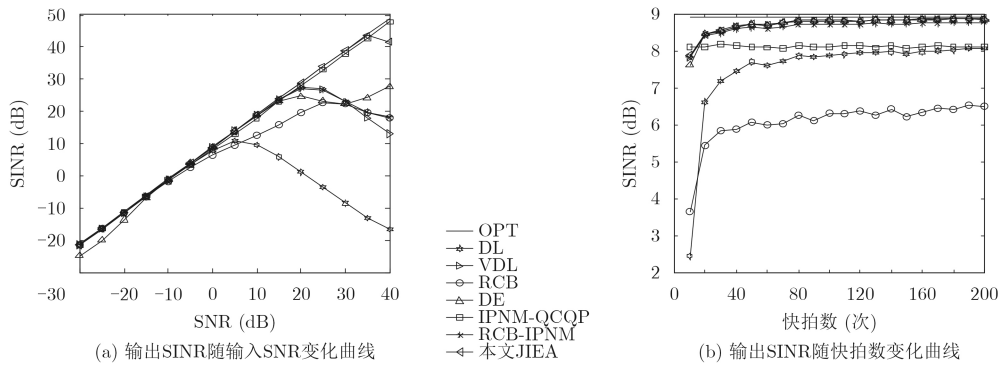


图2 目标来波方向误差下性能对比

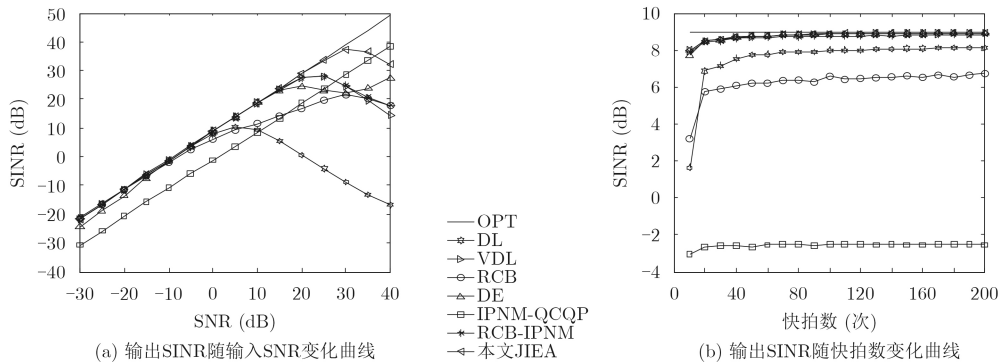


图3 目标来波方向误差和阵元位置误差下性能对比

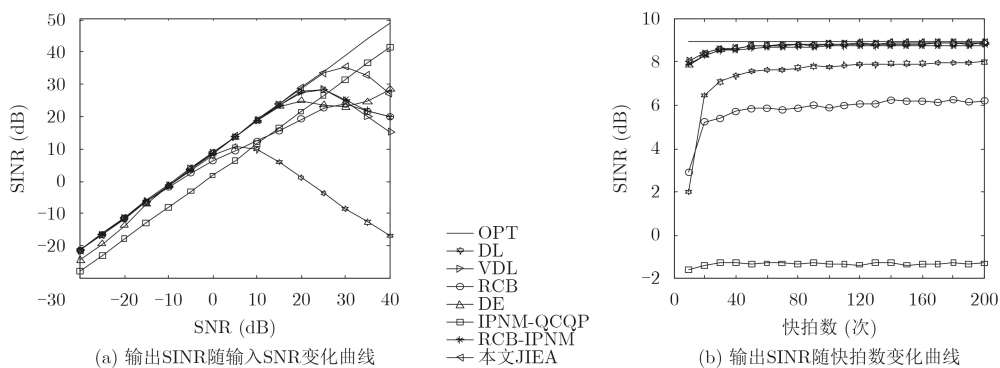


图4 目标来波方向误差和幅度相位误差下输出SINR随输入SNR变化曲线

在, 观察图4(a)发现, 本文算法整体性能良好, 当输入SNR在15~30 dB, 较对比算法优势明显, 当输入SNR大于30 dB, 本文算法性能有所下降, 可能是因为式(13)估计的干扰加噪声协方差矩阵没有完全剔除目标分量, 导致估计的干扰子空间无法准确约束目标导向矢量; 观察图4(b)发现, 本文算法输出SINR在快拍数为50次时基本收敛, 在小快拍数下也有一定优势。

6 结束语

本文针对自适应波束形成器在目标导向矢量存在约束偏差时性能急剧下降的问题, 提出目标导向矢量和干扰噪声协方差矩阵联合迭代估计的稳健波束形成算法, 算法的基本思想是估计出目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵的初值, 然后通过交替迭代的方式得到目标导向矢量和干扰加噪声协方差矩阵的稳态估计值。仿真实验表明该算法在目标来波方向误差、阵元位置误差和幅度相位误差存在时输出SINR提升明显。但是联合迭代过程计算复杂度较高, 如何进一步降低运算复杂度是我们后续需要重点考虑的研究内容。

参 考 文 献

- [1] KHABBAZIBASMENJ A, VOROBYOV S A, and HASSANIEN A. Robust adaptive beamforming based on steering vector estimation with as little as possible prior information[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(6): 2974–2987. doi: [10.1109/TSP.2012.2189389](https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2189389).
- [2] SHAHBAZPANAHI S, GERSHMAN A B, LUO Zhiqian, et al. Robust adaptive beamforming for general-rank signal models[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(9): 2257–2269. doi: [10.1109/TSP.2003.815395](https://doi.org/10.1109/TSP.2003.815395).
- [3] VOROBYOV S A, GERSHMAN A B, and LUO Zhiqian. Robust Adaptive beamforming using worst case performance optimization: A solution to the signal mismatch problem[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(2): 313–323. doi: [10.1109/TSP.2002.806865](https://doi.org/10.1109/TSP.2002.806865).
- [4] CARLSON B D. Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(4): 397–401. doi: [10.1109/7.7181](https://doi.org/10.1109/7.7181).
- [5] STOICA P, LI Jian, ZHU Xumin, et al. On using a prior knowledge in space-time adaptive processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6): 2598–2602. doi: [10.1109/TSP.2007.914347](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.914347).
- [6] ZHUANG Jie. Low-complexity variable loading for robust adaptive beamforming[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(5): 338–340. doi: [10.1049/el.2015.3844](https://doi.org/10.1049/el.2015.3844).
- [7] LI Wenxing, YANG Bin, and ZHAO Yu. Low-complexity non-uniform diagonal loading for robust adaptive beamforming[C]. 2017 International Applied Computational Electromagnetic Society Symposium, Suzhou, China, 2017: 1–2.
- [8] LI Jian, STOICA P, and WANG Zhisong. On robust Capon beamforming and diagonal loading[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(7): 1702–1715. doi: [10.1109/TSP.2003.812831](https://doi.org/10.1109/TSP.2003.812831).
- [9] 邹翔, 张旻, 钟子发. 基于失配误差正交分解的稳健自适应波束形成[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(10): 2320–2323. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00049](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00049).
ZOU Xiang, ZHANG Min, and ZHONG Zifa. Robust adaptive beamforming based on mismatch errors orthogonal decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2320–2323. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00049](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00049).
- [10] 徐定杰, 贺瑞, 沈锋, 等. 一种新的稳健Capon波束形成算法[J]. *宇航学报*, 2012, 33(10): 1492–1497. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.019](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.019).
XU Dingjie, HE Rui, SHEN Feng, et al. A new algorithm for robust Capon beamforming[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(10): 1492–1497. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.019](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.019).
- [11] YU Hongbo, FENG Dazheng, and YAO Xiaokun. Robust adaptive beamforming against large DOA mismatch with linear phase and magnitude constraints for multiple-input-multiple-output radar[J]. *IET Signal Processing*, 2016, 10(9): 1062–1072. doi: [10.1049/ietSpr.2015.0521](https://doi.org/10.1049/ietSpr.2015.0521).
- [12] 解虎, 冯大政, 袁明冬. 一种基于稀疏约束的稳健波束形成算法[J]. *电子学报*, 2016, 44(9): 2276–2281. doi: [10.3969/jssn.0372-2112.2016.09.036](https://doi.org/10.3969/jssn.0372-2112.2016.09.036).
XIE Hu, FENG Dazheng, and YUAN Mingdong. A robust beamforming method based on sparse constraint[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(9): 2276–2281. doi: [10.3969/jssn.0372-2112.2016.09.036](https://doi.org/10.3969/jssn.0372-2112.2016.09.036).
- [13] 李文兴, 毛晓军, 翟助群. 一种导向矢量双层估计的稳健波束形成算法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(3): 594–600. doi: [10.11990/jheu.201610102](https://doi.org/10.11990/jheu.201610102).
LI Wenxing, MAO Xiaojun, and ZHAI Zhuqun. Steering vector double estimation robust adaptive beamforming[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(3): 594–600. doi: [10.11990/jheu.201610102](https://doi.org/10.11990/jheu.201610102).
- [14] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11999/JEIT170236).

- [15] 李立欣, 白童童, 张会生等. 改进的双约束稳健Capon波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(8): 2014–2019. doi: [10.11999/JEIT151213](https://doi.org/10.11999/JEIT151213).
LI Lixin, BAI Tongtong, ZHANG Huisheng, *et al.* Improved double constraint robust Capon beamforming algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(8): 2014–2019. doi: [10.11999/JEIT151213](https://doi.org/10.11999/JEIT151213).
- [16] GU Yujie and LESHEM A. Robust adaptive beamforming based on interference covariance matrix reconstruction and steering vector estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(7): 3881–3885. doi: [10.1109/TSP.2012.2194289](https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2194289).
- [17] LUO Qian, XIE Julan, LI Huiyong, *et al.* Robust adaptive beamforming in the presence of strong desired signal and DOA mismatch[C]. IEEE 4th International Conference on Computation Problem Solving, Jiuzhai Valley, China, 2013: 1–4.
- [18] 范展, 梁国龙, 王逸林. 一种零陷展宽鲁棒自适应波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11): 2764–2770. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00087](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00087).
FAN Zhan, LIANG Guolong, and WANG Yilin. Robust adaptive beamforming with null widening[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2764–2770. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00087](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00087).
- [19] HUANG Lei, ZHANG Jing, XU Xu, *et al.* Robust adaptive beamforming with a novel interference plus noise covariance matrix reconstruction Method[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(7): 1643–1650. doi: [10.1109/TSP.2015.2396002](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2396002).
- [20] HUANG Huiping, LIAO Bin, GUO Chongtao, *et al.* An improved approach to robust Capon beamforming with enhanced performance[C]. 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–5.
- [21] WANG Yasen, BAO Qinglong, and CHEN Zengping. Robust adaptive beamforming using IAA-based interference-plus-noise covariance matrix reconstruction[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(13): 1185–1186. doi: [10.1049/el.2015.4420](https://doi.org/10.1049/el.2015.4420).
- [22] YUAN Xiaolei and Gan Lu. Robust adaptive beamforming via a novel subspace method for interference covariance matrix reconstruction[J]. *Signal Processing*, 2017, 130: 233–242. doi: [10.1016/j.sigpro.2016.07.008](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.07.008).
- [23] LI Hui, ZHAO Yongbo, and CHENG Zengfei, *et al.* Robust adaptive beamforming based on sparse representation technique[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(9): 1417–1424. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0621](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0621).
- [24] WEN Jun, ZHOU Xiang, ZHANG Wei, *et al.* Robust adaptive beamforming against significant angle mismatch[C]. IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 713–716.
- 杨志伟: 男, 1980年生, 副教授, 主要研究方向为阵列信号处理、地面动目标检测、极化处理。
张攀: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为阵列信号处理。
陈颖: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为阵列信号处理。
许华健: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为空时自适应处理、合成孔径雷达动目标检测。