

一种改进的迭代型鲁棒波束形成算法

金 伟¹, 赵建勋², 张峰干², 贾维敏¹, 姚敏立²

(1. 火箭军工程大学初级指挥学院, 陕西西安 710025; 2. 火箭军工程大学信息工程系, 陕西西安 710025)

摘 要: 为有效克服模型失配误差对自适应波束形成器的影响, 该文提出了一种改进的迭代型鲁棒波束形成算法. 该算法以导向矢量在期望信号来波方向区间宽度内、外的积分关系式构造新的终止条件, 克服了迭代对角加载算法对终止条件参数鲁棒性不强的问题, 从而进一步提高了波束形成器的输出信干噪比. 仿真实验表明, 提出的算法可以有效克服不同类型的模型失配误差带来的影响, 能够处理较大范围的方向失配误差, 且对算法中的来波方向区间宽度这一关键参数设置具有较强的鲁棒性.

关键词: 波束形成; 鲁棒; 对角加载; 迭代

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)12-2842-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.12.003

Modified Iterative Robust Beamforming Algorithm

JIN Wei¹, ZHAO Jian-xun², ZHANG Feng-gan², JIA Wei-min¹, YAO Min-li²

(1. Elementary Command College, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

2. Department of Information Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract: To effectively overcome the influence of model mismatch on the performance of adaptive beamformer, a modified iterative robust adaptive beamformer is proposed. Based on the integration of steering vector within or without the angular sector of desired signal's direction of arrival (DOA), a new stopping criterion is constructed in the proposed algorithm. Using the new stopping criterion, the weak robustness against stopping criterion parameter in iterative diagonally loaded sample matrix inverse (ILSMI) robust adaptive beamformer is strengthened, and the output signal-to-interference-and-noise ratio (SINR) is improved obviously. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively improve the robustness of beamformer against different types of model mismatch. Moreover, the proposed algorithm can deal with DOA mismatch in large region, and the robustness against the angular sector of DOA is quite strong.

Key words: beamforming; robust; diagonal loading; iterative

1 引言

自适应波束形成在雷达、声纳、射电天文、地震学、通信和医疗成像等领域得到了广泛应用. 然而, 传统的自适应波束形成器建立在模型参数精确已知的基础上, 当现实中由于 DOA 估计误差、阵列校正误差等导致导向矢量假定值与真实值存在失配时, 其性能将严重下降^[1].

为解决以 Capon 波束形成器为代表的自适应波束形成器的鲁棒性问题, 学者们提出了多种算法. 早期的

方法主要有线性约束方法、对角加载方法、特征子空间方法等^[1,2], 其中线性约束方法仅对方向失配有效, 对角加载方法的加载因子难以选择, 而特征子空间方法只在较高信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 时有效. 在 2003 年前后, 以最差性能最优法 (Worst-Case, WC)^[3], 鲁棒 Capon 波束法 (Robust Capon Beamformer, RCB)^[4] 为代表的集方法揭开了鲁棒波束形成算法新的篇章, 它们具有明确的理论背景, 通过对导向矢量的失配误差进行球体或椭球体约束, 从而将算法转化为一个便于求解的约束优化问题, 这类方法得到了持续

研究^[5,6].

Nai 在她的研究中发现,当失配误差比较大时,基于不确定集的鲁棒波束形成器需要采用大的不确定集,会减弱干扰抑制能力,从而导致性能下降,由此提出了采用小不确定集的迭代鲁棒最小方差法(Iterative Robust Minimum Variance Beamforming, IRMVB)^[7],把问题转化为对 RCB 算法的迭代运算,取得了较好效果. Lie 在此基础上,提出了不确定集大小可调的迭代算法,加快了收敛速度^[8], Li 在最近提出了一种类似于 IRMVB 的迭代算法^[9]. 然而,这些算法都是基于不确定集理论进行的. 文献[10,11]考虑了幅度响应约束的鲁棒方法,也可以解决大 DOA 失配,但是其问题求解仍需涉及凸优化算法. 文献[12,13]分别提出了协方差矩阵重构的方法,在大的失配误差下能取得较好效果,但是仅对方向失配有效,之后文献[14]提出了新的重构方法,可以对任意类型失配有效,但是算法转化为了较为复杂的二次约束二次规划问题,文献[15]从稀疏化的角度进行处理,但其期望导向矢量的求解同样受制于天线阵列模型的准确性. 在对角加载算法深入研究的基础上,文献[16]提出了一种迭代对角加载鲁棒自适应波束形成算法(ILSMI),避开了不确定集约束,在大失配误差下取得了较好的效果.

近期的研究发现,文献[16]提出的 ISLMI 算法采用了与 IRMVB 基本相同的终止条件,即利用与期望信号 DOA 区间边界对应导向矢量的夹角大小来约束估计出的导向矢量. 这种约束对边界参数的要求很高,一旦边界参数设计不当,其性能会下降. 为此,该文对 ISLMI 算法进行了改进,以导向矢量在期望信号 DOA 区间宽度内、外的积分关系式构造新的终止条件,从而进一步提高了算法的性能.

2 问题描述

一个 M 阵元线性阵列接收数据矢量 $\mathbf{x}(k)$ 可表示为如下 $M \times 1$ 维矢量

$$\mathbf{x}(k) = s(k)\mathbf{a}_0 + \mathbf{i}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

其中, $s(k)$ 为期望信号波形, \mathbf{a}_0 为期望信号对应的导向矢量, $\mathbf{i}(k)$, $\mathbf{n}(k)$ 分别为期望信号、干扰信号和高斯白噪声分量. 波束形成问题是给阵列寻找一个加权矢量 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$ ($(\cdot)^T$ 表示转置), 以达到某种准则下的最优.

基于均方误差最小这一最优准则的经典 Capon 波束形成器可表示为

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{i+n} \mathbf{w} \quad \text{s. t.} \quad \mathbf{w}^H \mathbf{a}_0 = 1 \quad (2)$$

式中 $(\cdot)^H$ 表示共轭转置. 由于在实际中, 干扰加噪声协方差矩阵 \mathbf{R}_{i+n} 难以得到, 一般都用阵列输出的采样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 代替, 即

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{x}(k) \mathbf{x}^H(k) \quad (3)$$

式中 k 为采样时刻, N 为所采用的快拍数.

采用式(3)代替 \mathbf{R}_{i+n} 的 Capon 波束形成算法又称为采样矩阵求逆算法(Sample Matrix Inverse, SMI). 在 SMI 算法中, 准确的期望信号导向矢量 \mathbf{a}_0 在实际中通常不能精确获得, 一般以假设值 $\bar{\mathbf{a}}_0$ 代替, 与真实值 \mathbf{a}_0 之间往往有一定的失配误差, 有可能造成波束形成器在真实的信号方向形成零陷, 当期望信号信噪比越大时, 这种零陷越深, 致使波束形成器性能大大降低. 为提高波束形成器对失配误差的鲁棒性, 学者们提出了一系列算法, 对角加载算法(Loaded SMI, LSMI)^[2] 是一种常用的鲁棒波束形成算法, 其基本思想就是在 SMI 算法的基础上为信号协方差矩阵上引入一个对角矩阵, 即将 $\hat{\mathbf{R}}$ 更换为 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{di}} = \hat{\mathbf{R}} + \lambda \mathbf{I}$. 关于对角加载算法的研究一直在持续, 比如最近的文献[17]提出一种低复杂度的可变加载方法, 但是其实验结果显示, 当失配误差增大时, 算法性能依然下降.

文献[16]针对 LSMI 算法本身, 提出了一种迭代对角加载鲁棒自适应波束形成算法 ILSMI, 提高了算法对导向矢量大失配误差的鲁棒性, 其基本思路是利用 LSMI 和 Capon 波束形成器最优权矢量的关系建立关系式

$$\mathbf{w}_{\text{OLSMI}} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{\text{di}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}_0}{\bar{\mathbf{a}}_0^H \hat{\mathbf{R}}_{\text{di}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}_0} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0}{\hat{\mathbf{a}}_0^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0} \quad (4)$$

通过对 $\hat{\mathbf{a}}_0$ 去比例因子后再进行范数归一化的方法进行求解, 即:

$$\hat{\mathbf{a}}_0 = \hat{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{R}}_{\text{di}}^{-1} \bar{\mathbf{a}}_0 \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{a}}'_0 = \sqrt{M} \frac{\hat{\mathbf{a}}_0}{\|\hat{\mathbf{a}}_0\|} \quad (6)$$

ILSMI 算法对估计过程进行迭代运算, 并采用与文献[7]中 IRMVB 算法相类似的终止条件. 第一个条件如式(7)所示, 只需要对前后两次迭代得到的导向矢量之间的差值进行约束. 第二个终止条件与文献[7]相同, 如式(8)所示, 假定期望信号 DOA 处于 $[\bar{\theta}_0 - \Delta\theta, \bar{\theta}_0 + \Delta\theta]$ ($\Delta\theta \leq \text{Bw}$) (Bw 为波束主瓣宽度) 区域内, 采用与区域边界导向矢量的夹角约束以避免迭代算法收敛至干扰对应的导向矢量.

$$\|\hat{\mathbf{a}}_0^{(i)} - \hat{\mathbf{a}}_0^{(i-1)}\| < \delta \quad (7)$$

$$\frac{|\mathbf{a}_0^{(i)H} \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\mathbf{a}_0^{(i)}\| \|\bar{\mathbf{a}}_0\|} \geq \min \left\{ \frac{|\mathbf{a}_1^H \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\mathbf{a}_1\| \|\bar{\mathbf{a}}_0\|}, \frac{|\mathbf{a}_2^H \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\mathbf{a}_2\| \|\bar{\mathbf{a}}_0\|} \right\} \\ = \min \{ |\cos(\widehat{\mathbf{a}}_1, \bar{\mathbf{a}}_0)|, |\cos(\widehat{\mathbf{a}}_2, \bar{\mathbf{a}}_0)| \} \quad (8)$$

其中 δ 为一约束参数, \mathbf{a}_1 和 \mathbf{a}_2 分别为 $\bar{\theta}_0 - \Delta\theta$ 和 $\bar{\theta}_0 + \Delta\theta$ 对应的导向矢量, $\cos(\widehat{\cdot}, \cdot)$ 表示两矢量夹角的余弦运算. 当迭代算法满足这两个终止条件中的任意一个时, 算法中止.

3 改进的迭代对角加载鲁棒自适应波束形成算法

3.1 终止条件设计

在后续研究中发现, ILSMI 算法和 IRMVB 算法采用的终止条件中含有参数 $\Delta\theta$, 这一参数对算法性能的影响很大, 也即该终止条件参数鲁棒性不强. 当 $\Delta\theta$ 与 DOA 误差相差比较大时, 比如真实的 DOA 误差较小, 而 $\Delta\theta$ 设置得较大时, 这一算法的性能会下降(在后续实验 3 将会清晰展现这一现象). 为解决此问题, 受文献[18]启发, 可以把式(8)的终止条件进行重新设计.

假定期望信号来波方向为 θ_0 , P 个干扰信号的来波方向分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$, 则由 $\mathbf{a}(\theta_0), \mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)$ 可以张成信号子空间. 同时, 对接收数据协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行特征分解, 大特征值对应的特征向量可以张成信号子空间, 小特征值对应的特征向量可以张成噪声子空间. 信号子空间中的矢量与噪声子空间中的矢量构成正交关系. 在空间谱估计理论中, 基于子空间的算法大多都是基于信号子空间、噪声子空间之间的正交性来进行的, 由于估计出的谱只是反映了正交程度, 而不是真正的空间功率谱, 因此通常称作“伪谱”估计.

空间谱估计的这一理论可以用来帮助我们建立新的终止条件约束准则, 其实对信号子空间进一步划分, 可由 $\mathbf{a}(\theta_0)$ 张成一维期望信号子空间, 而 $\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)$ 可以张成 P 维干扰信号子空间. 期望信号的来波方向 θ_0 往往难以准确获得, 如果采用假定值 $\bar{\theta}_0$ 来进行波束形成, 会造成“信号自相消”现象, 从而导致阵列输出信噪比下降. 假设期望信号的来波方向区间为 Θ , 其宽度为 W , 剩下的方向区间为 $\bar{\Theta}$, 可以构造下列积分关系式

$$\bar{\mathbf{C}} = \int_{\bar{\Theta}} \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) d\theta \quad (9)$$

$$\mathbf{C} = \int_{\Theta} \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) d\theta \quad (10)$$

式(10)中的 \mathbf{C} 是由包含期望信号方向区间的导向矢量积分得到的, 式(9)中的 $\bar{\mathbf{C}}$ 是由不包含期望信号方向区间的导向矢量积分得到的. 从子空间的角度考虑, \mathbf{C} 中绝大部分分量是由期望信号构成的, 期望信号的一维子空间可以看成是由 \mathbf{C} 中大特征对应的特征矢量的线性组合构成的, 而 $\bar{\mathbf{C}}$ 中绝大部分分量是由干扰信号子空间构成的, 其 P 维子空间可以看成是 $\bar{\mathbf{C}}$ 中大特征对应的特征矢量的线性组合构成的. 如果将导向矢量 $\mathbf{a}(\theta)$ 与 $\mathbf{C}, \bar{\mathbf{C}}$ 分别构建二次关系式 $\mathbf{a}^H(\theta) \bar{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta)$ 和 $\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$, 当 θ 位于设定的期望信号来波方向区间 Θ 内时, $\mathbf{a}^H(\theta) \bar{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta)$ 较小, $\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$ 较大, 反之, 当 θ 位于不包含期望信号来波方向的区间 $\bar{\Theta}$ 内时, $\mathbf{a}^H(\theta) \bar{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta)$ 较大, $\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$ 较小. 原因在于, 当 θ 位于 Θ 内时, $\mathbf{a}(\theta)$ 与张成期望信号子空间的基底 $\mathbf{a}(\theta_0)$

比较接近, 而与张成干扰信号子空间的基底 $\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)$ 相对较远; 反过来, 当 θ 位于 $\bar{\Theta}$ 内时, $\mathbf{a}(\theta)$ 与张成期望信号子空间的基底 $\mathbf{a}(\theta_0)$ 相对较远, 而与张成干扰信号子空间的基底 $\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)$ 比较接近. 为清晰展示这种变化, 图 1 给出了不同角度 θ 下的 $\mathbf{a}^H(\theta) \bar{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta)$ 和 $\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$ 值, 其中两条竖实线给出了期望信号来波方向区间 Θ 的左右边界, 而竖虚线代表的是假设来波方向 $\bar{\theta}_0$.

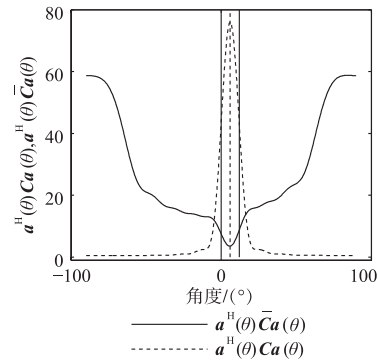


图1 不同角度下的 $\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$ 和 $\mathbf{a}^H(\theta) \bar{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta)$ 值

从图 1 中可以看出, $\mathbf{a}^H(\theta) \bar{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta)$ 和 $\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$ 值随角度 θ 的变化关系与上面的理论分析是一致的, 当 θ 接近期望信号来波方向 $\bar{\theta}_0$ 时, 这两个值分别达到最小和最大值. 于是, 新的终止条件可以设计为式(11)或式(12).

$$\mathbf{a}^H(\theta) \bar{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta) \geq d_1 \quad (11)$$

$$\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta) \leq d_2 \quad (12)$$

其中 $d_1 = \max_{\theta \in \bar{\Theta}} \mathbf{a}^H(\theta) \bar{\mathbf{C}} \mathbf{a}(\theta)$, $d_2 = \min_{\theta \in \Theta} \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{C} \mathbf{a}(\theta)$. 采用式(11)或式(12)这一新的终止条件能够克服 ILSMI 算法和 IRMVB 算法中终止条件参数鲁棒性不强的问题, 原因在于新的终止条件可以看成某种程度上的子空间投影问题, 而 ILSMI 算法和 IRMVB 算法的终止条件只是利用了两个导向矢量的夹角大小.

3.2 算法流程

用 i 代表算法迭代步数, 可将提出的算法流程总结如下:

步骤 1 初始化: $i=0$ 时, $\hat{\mathbf{a}}_0^i = \bar{\mathbf{a}}_0$;

步骤 2 当 $i \geq 1$ 时, 用式(5)、(6)对导向矢量进行迭代估计, 注意在迭代的过程中用 $\hat{\mathbf{a}}_0^{i-1}$ 替换 $\bar{\mathbf{a}}_0$;

步骤 3 对式(13)或式(14)的终止条件进行判断, 如满足任一条件, 迭代终止, 转到步骤 4 计算权矢量, 否则转到步骤 2 继续进行迭代运算;

$$\|\hat{\mathbf{a}}_0^i - \hat{\mathbf{a}}_0^{i-1}\| < \delta, \hat{\mathbf{a}}_0^{iH}(\theta) \hat{\mathbf{C}} \hat{\mathbf{a}}_0^i(\theta) \geq d_1 \quad (13)$$

$$\|\hat{\mathbf{a}}_0^i - \hat{\mathbf{a}}_0^{i-1}\| < \delta, \hat{\mathbf{a}}_0^{iH}(\theta) \hat{\mathbf{C}} \hat{\mathbf{a}}_0^i(\theta) \leq d_2 \quad (14)$$

步骤 4 估计的期望信号导向矢量 $\hat{\mathbf{a}}_0^i$ 收敛, 用其

计算出算法最优权值 $\mathbf{w} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0^i}{\hat{\mathbf{a}}_0^{iH} \hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0^i}$.

4 实验仿真及结果分析

在实验中,选择 LSMI、RCB、IRMVB、ILSMI 算法与提出的算法进行比较.为保证比较的公平客观,实验条件与文献[7]中 IRMVB 和文献[16]中 ILSMI 算法保持一致.

假设阵列为间隔半波长的全向均匀线阵,阵元个数为 10. 加载的噪声为零均值、单位方差的空间高斯白噪声. 期望信号真实方向为 6° (实验 3、实验 4 除外),其假定方向为 0° ,两个干扰信号功率均为 30dB,入射方向为 20° 和 30° ,各信号之间相互独立. 对 IRMVB 和 ILSMI 算法,期望信号的假定来波方向位于区间 $[-7^\circ, +7^\circ]$ 之内,即 $\Delta\theta = 7^\circ$. RCB 的不确定集参数取为该仿真条件下的最优值 $\varepsilon_1 = 8.5$,ILSMI、IRMVB 和本文算法中的终止条件参数 δ 均取为 $\delta = 10^{-7}$,IRMVB 算法的不确定集大小取为 0.01,LSMI、ILSMI 和本文算法的对角加载因子均为 $\lambda = 10\sigma_n^2$. 本文算法的区间宽度设置为 $W = 20^\circ$ (实验 4 除外). 实验快拍数取为 100 (实验 2 除外),各实验条件下独立的蒙特卡罗实验次数均为 100 次.

实验 1 不同输入 SNR 下的输出 SINR 比较

考察几种算法的输出 SINR 随输入 SNR 变化的关系,结果如图 2 所示. 为检验算法对非 DOA 类型失配的鲁棒性,该实验在 DOA 失配的基础上,增加了阵元位置误差和导向矢量随机误差. 阵元相对位置随机误差服从高斯分布,均值为 0,方差为 0.1. 这里的阵元位置误差随独立实验变化,但在每次独立实验中,保持一恒定值,不随每次快拍变化. 期望信号和干扰信号对应的导向矢量都存在随机失配误差,该失配误差矢量为一个均值为 0,方差为 0.5 的复高斯随机矢量,它只随各独立实验变化,在每次实验中,不随各个快拍数据变化.

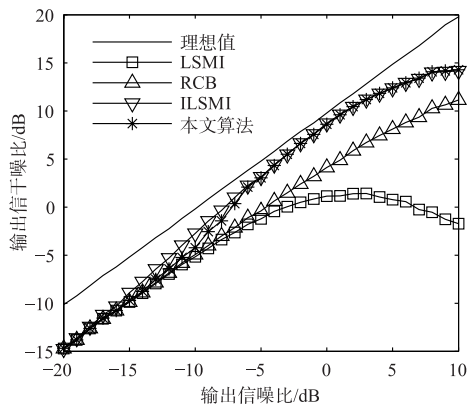


图2 SINR与SNR关系

从图 2 中可以看出,对大的导向矢量失配误差而言,LSMI 算法鲁棒性有限,RCB 算法虽具有一定的鲁棒性,但是明显劣于 ILSMI 和本文算法. 从图中还可以看出,本文提出的算法与 ILSMI 在此种条件下性能相当,原因在于 ILSMI 算法在此种条件下的来波区间宽度设

置非常接近期望信号 DOA 偏差,所以能获得较好的输出 SINR. 另外,图中结果还表明,几种算法不仅对 DOA 偏差具备鲁棒性,还均对阵元位置误差和随机导向矢量误差具备一定的鲁棒性.

实验 2 不同快拍数下的输出 SINR 比较

取 $\text{SNR} = 10\text{dB}$,其它实验条件与实验 1 保持一致,考察几种算法的输出 SINR 随快拍数变化的关系,结果如图 3 所示.

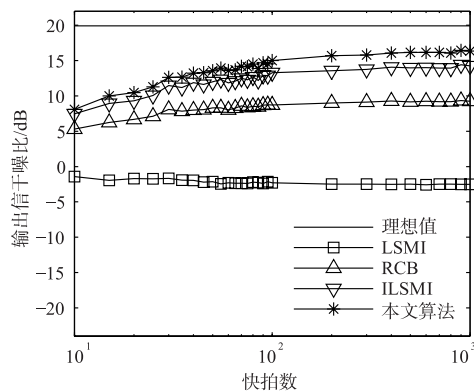


图3 SINR与快拍数关系

从图 3 可以看出,随着快拍数的增加,几种算法的输出 SINR 渐趋恒定,其中 LSMI 算法的输出 SINR 随快拍数增加基本没什么变化,RCB 和 ILSMI 算法的效果较好,但仍然明显低于本文提出的算法.

实验 3 不同指向误差下的输出 SINR 比较

取 $\text{SNR} = 10\text{dB}$,考察指向偏差发生变化时本文算法与另外两种迭代型算法 (IRMVB 和 ILSMI) 的输出 SINR,结果如图 4 所示;同时为展示大 DOA 失配误差下,不确定集参数设置对 RCB 算法的影响,观察比较本文算法与 RCB 算法 (采用不同不确定集) 的输出 SINR,结果如图 5 所示.

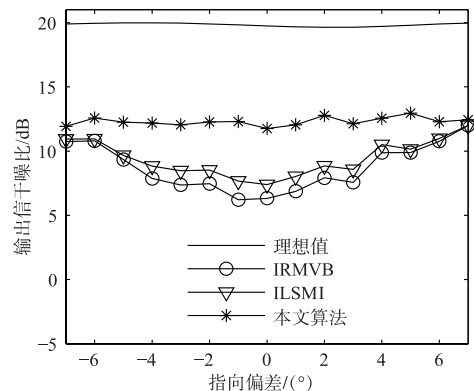


图4 SINR与指向误差关系 (与迭代型算法比较)

从图 4 可以看出,对于 IRMVB 和 ILSMI 算法,当 DOA 偏差较大,即比较接近于来波方向区间 $[-7^\circ, +7^\circ]$ 的边界时,其输出 SINR 较高,但是当 DOA 偏差较小

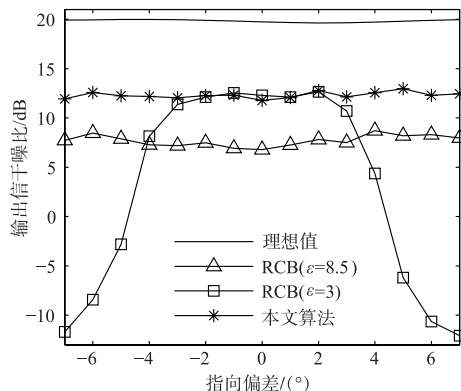


图5 SINR与指向误差关系(与RCB算法比较)

时,其输出 SINR 明显下降,而且 ILSMI 的结果优于 IRMV. 当 DOA 偏差发生变化时,本文提出的算法总体保持了一个恒定的较高输出 SINR,关键在于其终止条件中是对整个期望信号来波方向区间进行了考虑.

从图 5 可以明显看出,如果 RCB 算法取小的不确定集参数($\varepsilon = 3$),当 DOA 指向偏差较小时,RCB 算法能获得较好的输出 SINR,但是当 DOA 指向偏差增大时,这个不确定集已经不能有效地对真实期望导向矢量进行约束,因此其输出 SINR 下降得很快. 如果 RCB 算法取大的不确定集参数($\varepsilon = 8.5$),当指向偏差变化时,RCB 算法保持了一个相对恒定的输出 SINR,当 DOA 指向偏差较大时,该不确定集确实能对真实期望导向矢量进行约束,它的输出 SINR 不至于陡降,但是由于大的不确定集削弱了对干扰的抑制能力,它的输出 SINR 要比本文提出的迭代型算法小. 此外,从图中还可以看出,当 DOA 偏差较小时,采用大不确定集的 RCB 虽然也具备一定的干扰抑制能力,但是这种干扰抑制的能力已被大不确定集削弱了,因此导致此时 RCB 算法($\varepsilon = 8.5$)的性能明显低于小不确定集参数($\varepsilon = 3$)的结果.

实验 4 不同期望信号 DOA 区间宽度下的输出 SINR 比较

取 SNR = 10dB,考查本文算法中 DOA 区间宽度 W 的设置对输出 SINR 的影响,为增加对比性,考虑了几种不同 DOA 偏差 $\delta\theta$ 时的情况,其结果如图 6 所示.

从图 6 可以看出,当 DOA 区间宽度 $W \leq 2\delta\theta$ 时,输出 SINR 较小,这是因为给定的 DOA 区间宽度没有将真实的期望信号方向包含在内,终止条件的设计在此种情况下无效,而一旦 $W \geq 2\delta\theta$,输出 SINR 将迅速达到较高的值,而且基本不随 W 值的变化而变化,即对 W 值的变化具备很强的鲁棒性. 这种特性为本文算法选择 DOA 区间宽度 W 提供了很大的便利,只需要满足 $W \geq 2\delta\theta$,就可以任意地进行选取,但是同时当然需要注意不能选择得过宽,否则将会把干扰方向也包括进来,届时

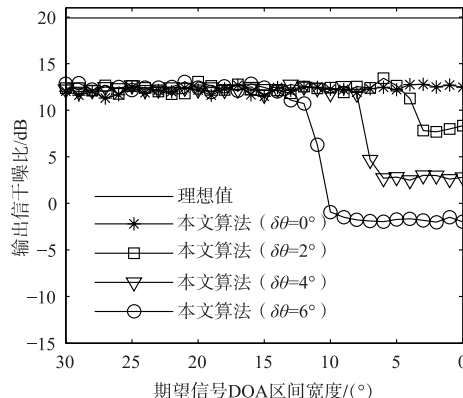


图6 SINR与期望信号DOA区间宽度关系

本文算法将会失去效果.

以上几个实验充分表明,本文提出的算法表现出了良好的性能,可以有效处理大 DOA 失配误差,也可以处理小 DOA 失配误差,并且算法对其关键参数 DOA 区间参数 W 设置具有很强的鲁棒性.

值得说明的是,在算法流程步骤 3 中,可以选择式 (13),也可以选择式(14)的终止条件,我们在实验中给出的结果均是基于式(13)终止条件进行的,而基于式(14)也可以得到基本相同的实验结果.

5 结论

为有效克服 ILSMI 算法终止条件参数鲁棒性不强的问题,该文提出了一种改进型鲁棒波束形成算法. 该算法对终止条件进行了重新考虑,以导向矢量在期望信号来波方向区间宽度内、外的积分关系式对终止条件进行了新的构造. 算法能够有效提高终止条件参数的鲁棒性,并对不同类型模型失配及大、小方向失配误差均具备较好的鲁棒性. 事实上,该文算法中新的终止条件也可用于 IRMV 这一迭代类算法,同样可以解决它的终止条件参数鲁棒性不强的问题,限于篇幅,不再赘述.

参考文献

- [1] Li J, Stoica P. Robust Adaptive Beamforming [M]. New Jersey, USA, Wiley, 200. 49 - 60.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Li J, Stoica P, Wang Z S. On robust Capon beamforming and diagonal loading [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51 (7): 1702 - 1715.

- [5] 刘聪锋,廖桂生. 最差性能最优通用信号模型稳健波束形成算法[J]. 电子学报,2010,38(6):1249-1255.
Liu Cong feng, Liao Gui sheng. Robust beamforming algorithm for general signal models using worst-case performance optimization [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38 (6):1249-1255. (in Chinese)
- [6] 陈明建,罗景青. 基于双不确定集约束的稳健宽带波束形成算法[J]. 电子学报,2014,42(3):587-591.
Chen Ming jian, Luo Jing qing. Robust broadband beamforming algorithm under the double uncertainty set constraints[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42 (3): 587-591. (in Chinese)
- [7] Nai S E, Ser W, Yu Z L, et al. Iterative robust minimum variance beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4):1601-1611.
- [8] Lie J P, Ser W, See C M S. Adaptive uncertainty based iterative robust Capon beamformer using steering vector mismatch estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(9):4483-4488.
- [9] Li Y, Ma H, Yu D, et al. Iterative robust Capon beamforming[J]. Signal Processing, 2016, 118(1):211-220.
- [10] Yu Z L, Ser W, Er M H, et al. Robust adaptive beamformers based on worst-case optimization and constraints on magnitude response[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(7):2615-2628.
- [11] 虞泓波,冯大政,解虎. 相位响应固定幅度响应约束的稳健波束形成方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7):1688-1694.
Yu Hong-bo, Feng Da-zheng, Xie Hu. Robust beamforming with phase response fixed and magnitude response constraint[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(7):1688-1694. (in Chinese)
- [12] Gu Y J, 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.
- [13] Zhang Z Y, Liu W, Leng W, et al. Interference-plus-noise covariance matrix reconstruction via spatial power spectrum sampling for robust adaptive beamforming[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(1):121-125.
- [14] Huang L, Zhang J, Xu X, 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.
- [15] 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.
Xie Hu, Feng Da zheng, Yuan Ming dong. A robust beamforming method based on sparse constraint [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(9):2276-2281. (in Chinese)
- [16] 金伟,贾维敏,姚敏立. 迭代对角加载采样矩阵求逆鲁棒自适应波束形成[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5):1120-1125.
Jin Wei, Jia Wei-min, Yao Min-li. Iterative diagonally loaded sample matrix inverse robust adaptive beamforming [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(5):1120-1125. (in Chinese)
- [17] Zhuang J, Ye Q, Tan Q S, et al. Low-complexity variable loading for robust adaptive beamforming [J]. Electronics Letters, 2016, 52(5):338-340.
- [18] Khabbazibasmenj A, Vorobyov S A, 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.

作者简介



金 伟 男,1984年4月生,湖北襄阳人,火箭军工程大学初级指挥学院讲师,研究方向为阵列信号处理,雷达信号处理.
E-mail:jinweimail@126.com



赵建勋 男,1981年2月生,河北辛集人,火箭军工程大学信息工程系博士研究生,研究方向为阵列信号处理.



张峰千 男,1985年7月生,河南宜阳人,火箭军工程大学信息工程系讲师,研究方向为宽带移动卫星通信,阵列信号处理.



贾维敏 女,1971年2月生,河北故城人,火箭军工程大学初级指挥学院教授,博士生导师,研究方向为宽带移动卫星通信,阵列信号处理.

姚敏立 男,1966年10月生,山西长治人,火箭军工程大学信息工程系教授,博士生导师,研究方向为宽带移动卫星通信,阵列信号处理.