

基于双不确定集约束的稳健宽带波束形成算法

陈明建, 罗景青

(合肥电子工程学院, 安徽合肥 230037)

摘要: 针对传统不确定集约束稳健波束形成算法(S-WCRB)的性能依赖于模约束参数的问题,提出了双不确定集约束的稳健宽带波束形成(D-WCRB)算法.该算法将期望信号导向矢量约束于两个不同参数的球形不确定集中,解决模约束参数选择不当引起 SINR 性能下降的问题,推导了 D-WCRB 算法与 S-WCRB 算法获得不同 SINR 的必要条件,并讨论了 D-WCRB 算法中约束参数的选择问题.最后给出的数值仿真结果验证了该算法的有效性.

关键词: 稳健波束形成; 宽带; 导向矢量; 双不确定集约束

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)03-0587-05

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.025

Robust Broadband Beamforming Algorithm Under the Double Uncertainty Set Constraints

CHEN Ming-jian, LUO Jing-qing

(Electronic Engineering Institute of Hefei, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract: Since the robust beamformer based on a single uncertainty set constraints was susceptible to the norm constraint parameter, a novel robust broadband beamforming algorithm based on the double uncertainty set constraints was proposed. In the case that the practical steering vector is constrained to two spherical uncertainty sets with different model parameter, the proposed method effectively overcomes the SINR degradation problem of the robust beamformer based on a single uncertainty set constraints. Moreover, a necessary condition under which the D-WCRB algorithm achieves different SINR performance from the S-WCRB algorithm was derived. The choices of constraint parameter were also discussed. Finally, simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: robust beamforming; broadband; steering vector; double uncertainty set constraint

1 引言

在理想情况下,自适应波束形成具有良好的性能,但若信号导向矢量存在误差,算法性能会急剧下降.为了克服导向矢量误差对波束性能的影响,对角加载是最常用的方法,但是如何选择对角加载因子仍是一个公开的难题^[1].近年来基于导向矢量不确定集约束的稳健算法相继提出^[2,3].Yu等人提出了基于子空间投影法,在无任何先验知识情况下,能获得良好的稳健性能^[4].刘聪峰等人提出了一种改进的不确定集约束稳健波束形成算法^[5],该类算法仅适合于较大信干比情况,在强干扰条件下,算法性能将下降.Nai等人提出迭代稳健Capon波束形成算法^[6],该算法通过迭代求解最优权矢量,提高了阵列输出 SINR 性能.

上述文献主要是针对窄带情况,对于宽带情况,El-Keyi等人提出基于最坏情况性能最优的宽带稳健算法^[7],算法模型可转化为凸二阶锥规划问题求解权向量^[8].Zhao Yong等人提出了基于空间响应偏差约束的宽带稳健算法^[9],该算法在改善宽带波束的频率不变特性的同时,提高了阵列输出 SINR 性能.上述讨论算法性能依赖于导向矢量误差的先验知识,然而,在实际应用中导向矢量误差的大小并非精确已知,这将在一定程度上影响算法性能.

针对以上分析的问题,本文研究双不确定集约束的稳健宽带自适应波束形成问题,解决传统不确定集约束稳健算法性能对模约束参数的依赖,并讨论双不确定集约束参数选取问题,分析了算法的性能.最后通过仿真实验,验证了算法的有效性.

2 单不确定集约束稳健算法的局限性

假设期望信号导向矢量误差为 $\mathbf{e} = \mathbf{a}_0 - \bar{\mathbf{a}}_0$, $\mathbf{a}_0, \bar{\mathbf{a}}_0$ 分别为真实导向矢量和假定的导向矢量, 误差 \mathbf{e} 满足 $\|\mathbf{e}\| \leq \varepsilon_1$, 实际期望信号导向矢量属于如下球形不确定集合

$$\mathcal{B}_1 \triangleq \{\mathbf{a}_0 \mid \|\mathbf{a}_0 - \bar{\mathbf{a}}_0\| \leq \varepsilon_1\} \quad (1)$$

其中 ε_1 为不确定集约束参数. 最坏情况性能优化的稳健算法可描述为如下约束优化问题

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \quad \text{s.t.} \quad |\mathbf{w}^H \mathbf{a}_0| \geq 1, \forall \mathbf{a}_0 \in \mathcal{B}_1 \quad (2)$$

球形不确定集约束稳健算法的性能取决于模约束参数 ε_1 的正确选择, ε_1 选择过大或过小, 都将引起阵列输出的 SINR 性能下降.

3 双不确定集约束的宽带 WCRB 算法

3.1 多个不确定集的稳健算法模型

为了解决上述的问题, 考虑多个不确定集约束解决传统稳健算法的模约束参数难以选择的问题. 这里以双不确定集为例来分析该算法的有效性.

若期望信号实际方向向量约束于如下双不确定集中, 即满足

$$\begin{cases} |\mathbf{w}^H \mathbf{a}_0| \geq c_0, \forall \mathbf{a}_0 \in \mathcal{B}_0 \\ |\mathbf{w}^H \mathbf{a}_0| \geq c_1, \forall \mathbf{a}_0 \in \mathcal{B}_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\mathcal{B}_0 \triangleq \{\mathbf{a}_0 \mid \|\mathbf{a}_0 - \bar{\mathbf{a}}_0\| \leq \varepsilon_0\}$, $0 < c_1 < c_0$, $0 < \varepsilon_0 < \varepsilon_1$, $\mathcal{B}_0 \subset \mathcal{B}_1$. 因此, 一方面, 若实际期望信号导向矢量属于 $\forall \mathbf{a}_0 \in \Delta \mathcal{B} \triangleq \{\mathbf{a}_0 \mid \mathbf{a}_0 \in \mathcal{B}_1, \mathbf{a}_0 \notin \mathcal{B}_0\}$, 相比单个不确定集 \mathcal{B}_0 约束, 此时期望信号将不会被当成干扰信号加以抑制; 另一方面, 若干扰信号的导向矢量落入集合 $\Delta \mathcal{B}$, 同时期望信号的实际导向矢量落入集合 \mathcal{B}_0 中, 相比单个 \mathcal{B}_1 约束, 此时期望信号获得的增益将大于干扰信号的获得增益, 阵列输出信干比 SIR 将增大.

综上所述, 双不确定集约束提高阵列输出的 SINR 性能, 能有效解决由于模约束参数选择不当导致阵列输出 SINR 性能下降的问题.

考虑一般情况, N 个球形不确定集约束问题, 即期望信号导向矢量同时满足 N 个不确定集约束

$$|\mathbf{w}^H \mathbf{a}_0| \geq c_n \quad \forall \mathbf{a}_0 \in \mathcal{B}_n, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中, $\mathcal{B}_n \triangleq \{\mathbf{a}_0 \mid \|\mathbf{a}_0 - \bar{\mathbf{a}}_0\| \leq \varepsilon_n\}$, $0 < c_{N-1} < \dots < c_0$, $0 \leq \varepsilon_1 < \dots < \varepsilon_{N-1} < \|\bar{\mathbf{a}}_0\|$, $\mathcal{B}_n \subset \mathcal{B}_{n+1}$, 则 N 个不同球形不确定集稳健算法可描述为如下约束优化问题

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \quad \text{s.t.} \quad |\mathbf{w}^H \mathbf{a}_0| \geq c_n, \forall \mathbf{a}_0 \in \mathcal{B}_n \quad (5)$$

命题 1 若权向量 $\mathbf{w}_{N-1}(\varepsilon_0, \dots, \varepsilon_{N-1}; c_0, \dots, c_{N-1})$ 是式(5)的解, 则权向量 $\tilde{\mathbf{w}}_{N-1}(\varepsilon_0, \dots, \varepsilon_{N-1}; \gamma c_0, \dots, \gamma c_{N-1})$ 与 \mathbf{w}_{N-1} 关系满足如下等式, 其中 $\gamma > 0$

$$\tilde{\mathbf{w}}_{N-1} = \gamma \mathbf{w}_{N-1} \quad (6)$$

证明略.

由命题 1 可知, 权向量 $\tilde{\mathbf{w}}_{N-1}$ 和 \mathbf{w}_{N-1} 对应的波束形成器具有相同的阵列输出 SINR.

命题 2 若权向量 $\tilde{\mathbf{w}}_{N-1}$ 是式(5)的解, 则式(5)的不等式约束可以等价转化为

$$\mathbf{w}_{N-1}^H \bar{\mathbf{a}}_0 - \varepsilon_n \|\mathbf{w}_{N-1}\| = c_n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

证明: 假定 $\mathbf{w}_{N-1}^H \bar{\mathbf{a}}_0 - \varepsilon_n \|\mathbf{w}_{N-1}\| = \alpha_n$, $\forall \alpha_n > 0$, 且 $\alpha_n \neq c_n$. 不失一般性, 假定 $\alpha_n > c_n$. 定义 $\gamma = \max_n \{c_n / \alpha_n\} < 1$, $\bar{\mathbf{w}}_{N-1} = \gamma \mathbf{w}_{N-1}$, 则

$$\tilde{\mathbf{w}}_{N-1}^H \bar{\mathbf{a}}_0 - \varepsilon_n \|\tilde{\mathbf{w}}_{N-1}\| = \gamma \alpha_n \geq c_n \quad (8)$$

因此 $\tilde{\mathbf{w}}_{N-1}$ 也是式(5)的解, 则

$$\tilde{\mathbf{w}}_{N-1}^H \mathbf{R}_x \tilde{\mathbf{w}}_{N-1} = \gamma^2 \mathbf{w}_{N-1}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w}_{N-1} < \mathbf{w}_{N-1}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w}_{N-1} \quad (9)$$

可知, 式(9)与式(5)的解 \mathbf{w}_{N-1} 相矛盾.

当 $\alpha_n < c_n$ 时, 同理可得该结论, 因此可知, 命题 2 得证.

由命题 2 可知, 式(5)可等价转化为

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \quad \text{s.t.} \quad |\mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}_0 - c_n|^2 = \varepsilon_n^2 \mathbf{w}^H \mathbf{w} \quad (10)$$

该优化问题可以利用 Lagrange 乘子法求解, 并运用矩阵求逆引理公式, 可得最优权向量的表达式为

$$\mathbf{w} = \mu \left(\mathbf{R}_x \sum_{n=0}^{N-1} \lambda_n \varepsilon_n^2 \mathbf{I} \right)^{-1} \bar{\mathbf{a}}_0 \quad (11)$$

式中 $\lambda_n > 0$ 为 Lagrange 乘子, μ 为归一化因子,

从式(11)可知, 基于 N 个球形不确定集约束的稳健波束形成方法仍然可以归结为对角加载方法, 加载量与 Lagrange 乘子 λ_n 、约束参数 ε_n 有关.

3.2 不确定集约束参数选择

为简化分析, 这里以双不确定集约束稳健波束形成算法为例, 分析其性能以及与传统不确定集约束稳健算法的关系.

命题 3 假定传统单不确定集约束的 WCRB 算法的权向量为 $\mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1)$, 双不确定集约束的 WCRB 算法的权向量为 $\mathbf{w}_2(\varepsilon_0, \varepsilon_1; c_0, c_1)$. 若 \mathbf{w}_1 满足如下不等式

$$\|\mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1)\| \geq \frac{c_0 - c_1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)} \quad (12)$$

则 $\text{SINR}(\mathbf{w}_1) = \text{SINR}(\mathbf{w}_2)$.

证明: 若 \mathbf{w}_1 为单不确定集 WCRB 算法的解

$$\mathbf{w}_1^H \bar{\mathbf{a}}_0 - \varepsilon_1 \|\mathbf{w}_1\| = c_1 \quad (13)$$

将式(13)代入到不等式(12)可得

$$\mathbf{w}_1^H \bar{\mathbf{a}}_0 - \varepsilon_0 \|\mathbf{w}_1\| \geq c_0 \quad (14)$$

联立式(13)、(14)可得

$$\begin{cases} \mathbf{w}_1^H \bar{\mathbf{a}}_0 - \varepsilon_1 \|\mathbf{w}_1\| = c_1 \\ \mathbf{w}_1^H \bar{\mathbf{a}}_0 - \varepsilon_0 \|\mathbf{w}_1\| \geq c_0 \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知, 此时, $\mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1)$ 也是双不确定集约束 WCRB 优化问题的解, 因此两者具有相同的阵列输出 SINR, 命题得证.

式(12)给出了传统单不确定集约束的 WCRB 算法和双不确定集约束 WCRB 算法的阵列输出相同 SINR 的充分条件;反之,两类波束形成器阵列输出不同 SINR 的必要条件为

$$\| \mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1) \| < \frac{c_0 - c_1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)} \quad (16)$$

命题 4 若 c_1 充分小,则 $\| \mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1) \| < \frac{c_0 - c_1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}$

恒成立。

证明:假定 $c_1' = \beta c_1$ ($\beta > 0$),由命题 1 可得

$$\| \mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1') \| = \beta \| \mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1) \| \quad (17)$$

则可得

$$\begin{cases} \lim_{\beta \rightarrow 0} \| \mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1') \| = \lim_{\beta \rightarrow 0} \beta \| \mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1) \| \\ \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{c_0 - c_1'}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)} = \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{c_0 - \beta c_1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)} = \frac{c_0}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)} > 0 \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可知,当 c_1 充分小时,式(16)的不等式关系恒成立。

虽然命题 4 给出了传统 WCRB 算法和双不确定集约束是 WCRB 算法具有不同 SINR 性能的必要条件,但无法定量给出参数的范围.下面分析约束参数 c_1 的具体取值范围。

考虑到 $\mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1)$ 是权向量解,因此 $\mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1)$ 一定落入所有可行解的范数下确界中,即可以通过如下优化问题求解权向量的下确界

$$\min_{\mathbf{w}} \| \mathbf{w} \| \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}_0 - \varepsilon_1 \| \mathbf{w} \| = c_1 \quad (19)$$

假定期望信号导向矢量 $\bar{\mathbf{a}}_0$ 存在 Householder 变换矩阵 $\mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0}$,使得 $\mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0} \bar{\mathbf{a}}_0 = \| \bar{\mathbf{a}}_0 \| \mathbf{e}_1$,其中 $\mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0}^H \mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0} = \mathbf{I}$, $\mathbf{e}_1 = [1, 0, \dots, 0]^T$.

考虑到 $\mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0}$ 具有酉不变特性,则 $\mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}_0 = \mathbf{w}^H \mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0}^H \mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0} \bar{\mathbf{a}}_0 = \| \bar{\mathbf{a}}_0 \| \mathbf{e}_1^H \mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0} \mathbf{w} = \| \bar{\mathbf{a}}_0 \| \hat{w}_1$,其中 \hat{w}_1 是向量 $\hat{\mathbf{w}}_1 = \mathbf{H}_{\bar{\mathbf{a}}_0} \mathbf{w}$ 的第一个数值,则式(19)可转化为

$$\min_{\mathbf{w}} \| \mathbf{w}_1 \| \quad \text{s.t.} \quad \varepsilon_1 \| \mathbf{w} \| = \| \bar{\mathbf{a}}_0 \| \hat{w}_1 - c_1 \quad (20)$$

由于 $\| \hat{\mathbf{w}}_1 \| \geq \hat{w}_1$, $\varepsilon_1 \| \mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1) \| \leq \| \mathbf{w}_1^H(\varepsilon_1; c_1) \bar{\mathbf{a}}_0 \|$,因此可得

$$\| \mathbf{w}_1^H(\varepsilon_1; c_1) \bar{\mathbf{a}}_0 \| \geq \frac{\varepsilon_1 c_1}{\| \bar{\mathbf{a}}_0 \| - \varepsilon_1} \quad (21)$$

联立式(16)、(21)可知,若 c_1 满足如下关系

$$0 < c_1 < \frac{\| \bar{\mathbf{a}}_0 \| - \varepsilon_1}{\| \bar{\mathbf{a}}_0 \| - \varepsilon_0} c_0 \quad (22)$$

则传统的 WCRB 的权向量 $\mathbf{w}_1(\varepsilon_1; c_1)$ 与双不确定集约束 WCRB 的权向量 $\mathbf{w}_2(\varepsilon_0, \varepsilon_1; c_0, c_1)$ 对应不同阵列输出 SINR。

上述讨论的是窄带双不确定集约束 WCRB 稳健算

法,对于宽带信号,可以借鉴空间响应偏差约束思想^[9],将宽频段内不确定集约束问题简化为某个参考频率的不确定集约束问题。

因此基于空间响应偏差约束的双不确定集约束宽带稳健波束形成算法可描述为

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}} \{ \mathbf{w}^H (\mathbf{R}_x + \beta \mathbf{Q}) \mathbf{w} \} \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}_r \geq \varepsilon_1 \| \mathbf{w} \| + c_1 \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}_r \geq \varepsilon_0 \| \mathbf{w}_1 \| + c_0 \end{cases} \quad (23)$$

式中 β 为平衡参数、 $\bar{\mathbf{a}}_r = \bar{\mathbf{a}}(f_r, \theta)$ 。

$\mathbf{Q} = \iint_{\Omega} \{ [\mathbf{a}(f, \theta) - \mathbf{a}(f_r, \theta)] [\mathbf{a}(f, \theta) - \mathbf{a}(f_r, \theta)]^H \} df d\theta$

式(23)约束优化问题可转化为 SOCP 问题,利用 SeDuMi 或 CVX 工具箱可以高效求解权向量^[10]。

4 仿真结果

实验 1 窄带情况算法性能

假设 10 元均匀线阵,阵元间距为半波长,空间存在 1 个目标信号和 2 个不相关的干扰信号,目标信号的方位角为 3° ,假定期望方向为 0° ,即存在 3° 的指向误差,干扰信号的方位角为 -30° 和 50° ,干扰信号功率均为 30dB.通道噪声为不相关高斯白噪声.所有实验结果均有 100 次 Monte-Carlo 实验平均得到。

为方便起见,记传统的单不确定集约束 WCRB 为 S-WCRB,而双不确定集约束 WCRB 为 D-WCRB,其中 S-WCRB 和 D-WCRB 的参数分别设置为 $c = 1, c_0 = 1, a_0 = 1, c_1 = 0.01, a_1 = 3$ 。

图 1 给出了 $\text{SNR} = 10\text{dB}$ 时, S-WCRB 输出 SINR 随约束参数 ε 的变化曲线.图 2 为不同约束参数时算法 SINR 随输入 SNR 的变化曲线。

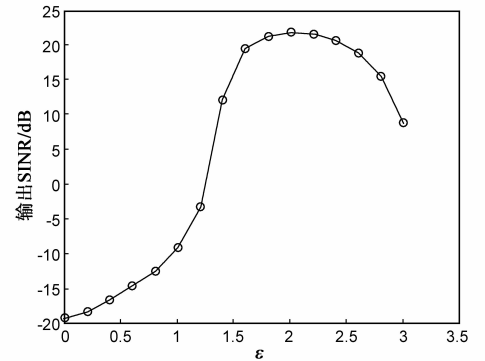


图1 S-WCRB输出SINR与 ε 的关系

由图 1 可知,当 $1.6 \leq \varepsilon \leq 2.6$ 时, S-WCRB 的输出 SINR 性能相对较好,其中 $\varepsilon = 0$ 时,性能最优;当 ε 取值较小或者较大时,则 S-WCRB 的 SINR 性能急剧下降,尤其是在 ε 取值较小时, SINR 下降幅度更明显。

由图 2 可知,当 $\varepsilon = 2$ 时 S-WCRB 与 D-WCRB 的 SINR 性能曲线几乎重合;当 $\varepsilon = 3$ 时, S-WCRB 只有在

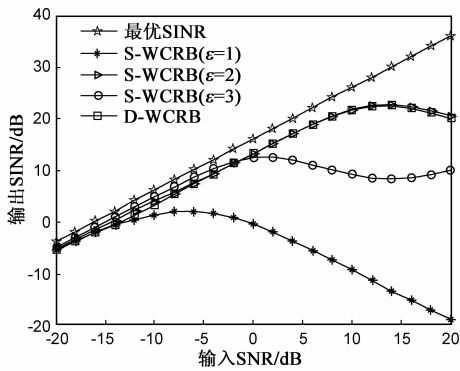


图2 输出SINR与输入SNR的关系

SNR ≤ 0 dB 时,其 SINR 性能略优于 D-WCRB,但当 SNR > 0 dB, D-WCRB 的 SINR 性能要明显优于 S-WCRB;当 $\epsilon = 1$ 时 S-WCRB 只有在 SNR ≤ -10 dB 时 SINR 性能较好,在高 SNR 时, S-WCRB 的 SINR 性能急剧恶化。

实验 2 宽带情况算法性能

仿真参数设置如下:空间存在 1 个宽带目标信号和 2 个宽带干扰信号,具有相同的带宽与中心频率,归一化工作频段 $\Omega = [0.8\pi, \pi]$, FIR 滤波器阶数 $J = 20$,阵元间距为信号最高频率对应的半波长,频率不变方位约束区域为 $\Theta = [-10^\circ, 10^\circ]$, $\beta = 10$. S-WCRB 的参数设置为 $c = 1$, D-WCRB 的参数设置为 $c_0 = 1$, $a_0 = 2$, $c_1 = 0.01$, $a_1 = 6$,其它仿真参数与实验 1 相同。

图 3 给出了 SNR = 10 dB 时, S-WCRB 输出 SINR 随约束参数 ϵ 的变化曲线. 图 4 为不同约束参数时 S-WCRB 和 D-WCRB 随输入 SNR 的变化曲线。

由图 3 可知,与窄带 S-WCRB 的 SINR 性能相类似,当 $3 \leq \epsilon \leq 5$ 时,宽带 S-WCRB 的输出 SINR 相对较好,其中 $\epsilon = 4$ 时 SINR 性能最优;当 ϵ 取值较小或者较大时,则宽带 S-WCRB 的 SINR 性能急剧下降,尤其在 ϵ 较小时,其 SINR 下降幅度较大。

由图 4 可知,当 $\epsilon = 4$,低 SNR 时 S-WCRB 的 SINR 性能略优于 D-WCRB,但在高 SNR 时 D-WCRB 的 SINR 性能更优;当 $\epsilon = 2$ 或 $\epsilon = 6$ 时, D-WCRB 的 SINR 性能要优于 S-WCRB,其中 $\epsilon = 2$ 时 S-WCRB 的 SINR 性能随着 SNR 的增加急剧下降,当 $\epsilon = 6$ 时,只有在 SNR ≤ -10 dB, S-WCRB 的 SINR 才接近 D-WCRB 的 SINR 性能。

综上所述,可得如下结论:

(1) 导向矢量误差的模约束参数 ϵ 决定着波束形成器稳健性的优劣,当 ϵ 选择不当将导致算法 SINR 性能的下降。

(2) D-WCRB 算法在一定程度上解决了模约束参数选择不当导致 SINR 性能下降的问题,其中窄带 D-WCRB 与最优约束参数时 S-WCRB 的 SINR 性能相当,而宽带 D-WCRB 算法,在高 SNR 时其 SINR 性能略优于

最优约束参数时宽带 S-WCRB。

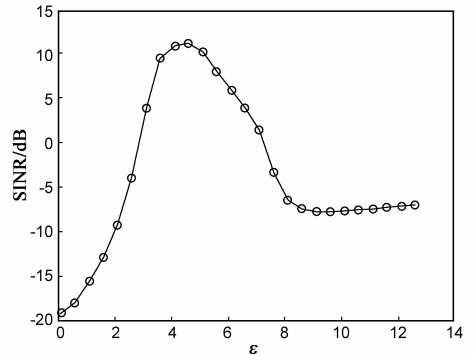


图3 S-WCRB输出SINR与ε的关系

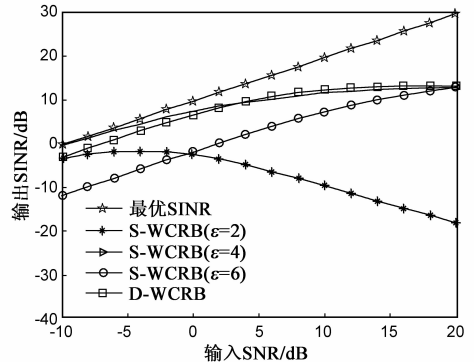


图4 输出SINR与输入SNR的关系

5 结束语

本文提出了双不确定集约束稳健宽带波束形成算法,推导了双不确定集约束 D-WCRB 算法与传统单不确定集约束 S-WCRB 算法两者获得不同 SINR 的必要条件,并详细讨论了 D-WCRB 算法的参数选择问题.最后利用 SOCP 对双不确定集约束 D-WCRB 算法的优化问题进行求解.仿真实验结果表明: D-WCRB 算法解决了 S-WCRB 算法中模约束参数选择不当引起 SINR 性能下降的问题,不仅简化模约束参数的选择,还提高了 SINR 性能。

参考文献

- [1] Elnashar A. Further study on robust adaptive beamforming with optimum diagonal loading[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(12): 3647 - 3658.
- [2] Beck A, Eldar Y C. Doubly constrained robust Capon beamformer with ellipsoidal uncertainty sets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(2): 753 - 758.
- [3] Vorobyov S A, Gershman A B, Luo Zhi-quan. 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] Yu Z L, Er M H. A robust minimum variance beamformer with

new constraint on uncertainty of steering vector [J]. Signal Processing, 2006, 86(9): 2243 – 2254.

[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] Nai S, Ser W, Yu Z L, et al. Iterative robust minimum variance beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011 (99): 1601 – 1611.

[7] El-Keyi A, Kirubarajan T, Gershman A B. Adaptive wideband beamforming with robustness against presteering errors[A]. The

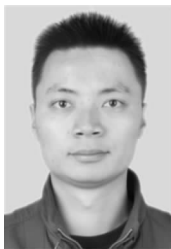
4th IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing[C]. Waltham, MA: IEEE Press, 2006. 11 – 15.

[8] Liao B, Tsui K M, Chan S C. Robust beamforming with magnitude response constraints using iterative second-order cone programming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(9): 3477 – 3482.

[9] Zhao Y, Liu W, Langley R J. Adaptive wideband beamforming with frequency invariance constraints [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(4): 1175 – 1184.

[10] Tsui K M, Chan S C. Pattern synthesis of narrowband conformal arrays using iterative second-order cone programming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58 (6): 1959 – 1970.

作者简介



陈明建 男, 1983 年生于湖南常德, 博士, 讲师, 研究方向为阵列信号处理.

E-mail: cdcmj@126.com



罗景青 男, 1957 年生于四川南溪, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理、阵列信号处理.

E-mail: luojingqing001@163.com