

引用格式:周淑华,谭志浩,金伟,等. MIMO 雷达迭代鲁棒 Capon 波束形成算法[J]. 电光与控制,2019,26(3):24-29. ZHOU S H, TAN Z H, JIN W, et al. Iterative robust Capon beamforming algorithm for MIMO radar[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3):24-29.

## MIMO 雷达迭代鲁棒 Capon 波束形成算法

周淑华<sup>1</sup>, 谭志浩<sup>1</sup>, 金伟<sup>2</sup>, 贾维敏<sup>2</sup>

(1. 火箭军士官学校, 山东 青州 262500; 2. 火箭军工程大学, 西安 710025)

**摘要:** 针对现有的 MIMO 雷达波束形成算法在联合导向矢量失配较大时, 输出信噪比性能严重下降的问题, 提出了一种用于 MIMO 雷达的迭代鲁棒 Capon 波束形成算法。首先, 结合 MIMO 雷达收发两端的结构特点, 对失配误差模型进行了理论分析, 从而指出大不确定集算法的局限性。然后提出利用小不确定集可以解决误差失配较大的情形, 依据迭代思想对导向矢量期望值估计进行求解, 由满足的迭代条件确保联合导向矢量更准确。仿真结果表明, 该算法对联合导向矢量失配误差具有鲁棒性, 输出信噪比性能最优。

**关键词:** MIMO 雷达; 自适应波束形成; RCB 算法; 迭代

中图分类号: TN958 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.006

## Iterative Robust Capon Beamforming Algorithm for MIMO Radar

ZHOU Shu-hua<sup>1</sup>, TAN Zhi-hao<sup>1</sup>, JIN Wei<sup>2</sup>, JIA Wei-min<sup>2</sup>

(1. The PLA Rocket Force Academy, Qingzhou 262500, China; 2. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The output SINR of the existing MIMO radar beamforming algorithms may decrease greatly due to the large mismatch of the joint steering vector. To solve this problem, an algorithm using iterative robust Capon beamforming for MIMO radar is proposed. Considering the transceiver array structure of MIMO radar, the mismatch error model is analyzed in theory at first. Based on this, we point out the limitations of the big-uncertainty-set algorithm. Then, an algorithm using small uncertainty sets to constraint large mismatch is proposed. The proposed algorithm iterates over the estimated joint steering vector until meeting the designed termination conditions. Compared with the previous algorithms, the proposed method can acquire a more accurate estimation of the joint steering vector. Simulation experiments show that the proposed algorithm presents outstanding performance in improving the output SINR and has strong robustness in the case of large mismatch.

**Key words:** MIMO radar; adaptive beamforming; Robust Capon Beamforming (RCB) algorithm; iteration

### 0 引言

多输入多输出(MIMO)雷达<sup>[1-6]</sup>可以有效应对现代战争面临的四大威胁, 即电子干扰、隐身目标、低空穿透和反辐射导弹, 因此, 自 2003 年国际雷达会议被提出以来, 已迅速成为现代雷达系统的研究热点之一。波束形成算法的研究是 MIMO 雷达系统的重要内容之一。

目前, 自适应波束形成算法一般可分为 4 类: 对角加载类算法、特征空间类算法、协方差重构类算法和不确定集类算法<sup>[4]</sup>。其中, 不确定集类算法<sup>[7-8]</sup>对目标导向矢量失配误差进行建模, 选用高维不确定球集来代替原来的单点约束, 对任何不匹配错误都具有良好的鲁棒性。为了获得更精确的面向目标的向量, 已经提出了大量改进的不确定类算法<sup>[9-11]</sup>。文献[12-13]提出使用较小的不确定性集来约束误差, 并迭代地更新假定的导向矢量以获得更准确的导向矢量。根据 MIMO 雷达收发器的结构特点, 文献[3, 14]基于双重迭代思想, 通过交织解获得更准确的发送和接收导向向量, 从而使获得的联合导向矢量更加准确。

收稿日期: 2018-03-09

修回日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(61179004)

作者简介: 周淑华(1980—), 男, 河南驻马店人, 硕士, 讲师, 研究方向为 MIMO 雷达鲁棒自适应波束形成算法。

本文结合集中式和分布式 MIMO 雷达的结构特点,对失配误差模型进行分析,并且针对联合导向矢量失配误差较大的情形,基于 RCB 算法,提出了一种基于 MIMO 雷达的迭代鲁棒 Capon 波束形成算法,确保了联合导向矢量具有更高的精度,对 MIMO 雷达系统的性能进行了改善。

## 1 基本模型

假设 MIMO 雷达系统阵列模型是均匀线性阵列,其阵列间隔为半波长,发射阵列的数量  $M_t$ ,接收阵列的数量  $M_r$ 。由于研究对象是远场目标,因此目标信号的波角和到达角分别为  $\theta_t$  和  $\theta_r$ 。那么,发射导向矢量和接收导向矢量可分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{a}_t(\theta_t) = (1 & e^{j\pi \sin \theta_t} & \cdots & e^{j\pi(M-1)\sin \theta_t})^T \\ \mathbf{a}_r(\theta_r) = (1 & e^{j\pi \sin \theta_r} & \cdots & e^{j\pi(N-1)\sin \theta_r})^T \end{cases} \quad (1)$$

传统 MIMO 雷达的发射元件对应于  $M$  个发射的正交波形,假定空间中存在  $L$  个目标,则接收信号为

$$\mathbf{x}(t, \tau) = \sum_{l=1}^L \sqrt{\frac{E}{M}} \alpha_l(\tau) \mathbf{a}_t^T(\theta_{t,l}) \mathbf{f}(t) \mathbf{a}_r(\theta_{r,l}) + \mathbf{z}(t, \tau) \quad (2)$$

式中:  $\alpha_l(\tau)$  为散射系数;  $\theta_{t,l}$  和  $\theta_{r,l}$  分别为第  $l$  个信号的波离角和波达角;  $\mathbf{f}(t) = (\phi_1(t) \cdots \phi_{M_t}(t))^T$  为发射波形集,  $(\cdot)^T$  表示矩阵转置;  $\mathbf{z}(t, \tau)$  为复高斯白噪声成分。如果接收信号被矢量化,则可获得  $M_t M_r \times 1$  信号矢量。

$$\mathbf{y}_{\text{MIMO}}(\tau) = \sum_{l=1}^L \sqrt{\frac{E}{M}} \alpha_l(\tau) \mathbf{a}_t(\theta_{t,l}) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_{r,l}) + \tilde{\mathbf{z}}(\tau) = \sum_{l=1}^L \sqrt{\frac{E}{M}} \alpha_l(\tau) \mathbf{c}(\theta_{l,l}) + \tilde{\mathbf{z}}(\tau) \quad (3)$$

式中,在表示 Kronecker 乘积  $\otimes$  的情况下,为了匹配表示联合导向矢量  $\mathbf{a}(\theta_l) = \mathbf{a}_t(\theta_{t,l}) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_{r,l})$  的滤波后的噪声部分  $\tilde{\mathbf{z}}(\tau)$ , 所获得的理想协方差矩阵可以表示为

$$\mathbf{R}_{\text{MIMO}} = E \{ \mathbf{y}_{\text{MIMO}}(\tau) \mathbf{y}_{\text{MIMO}}^H(\tau) \} \quad (4)$$

式中:  $(\cdot)^H$  为矩阵共轭转置。理想的协方差矩阵通常难以获得,因此常用的采样协方差矩阵用于估计,即

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{MIMO}} = \frac{1}{Q} \sum_{\tau=1}^Q \mathbf{y}_{\text{MIMO}}(\tau) \mathbf{y}_{\text{MIMO}}^H(\tau) \quad (5)$$

实际上,由于存在各种误差因素,如阵元的幅度和相位误差、阵元的位置误差以及目标角的估计误差,联合导向矢量假设值与实际值之间通常存在一定的不匹配<sup>[4]</sup>。假定  $\mathbf{e}_t$  和  $\mathbf{e}_r$  分别表示发射和接收导向矢量的失配量,则联合导向矢量失配量可表示为

$$\mathbf{e} = \mathbf{a}_t \otimes \mathbf{e}_r + \mathbf{e}_t \otimes \mathbf{a}_r + \mathbf{e}_t \otimes \mathbf{e}_r \quad (6)$$

## 2 MIMO-IRCB 算法

### 2.1 失配误差分析

首先对 RCB 算法目标函数进行重述,即

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{a}} \quad & \mathbf{a}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a} \\ \text{s. t.} \quad & \|\mathbf{a} - \bar{\mathbf{a}}\| \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\hat{\mathbf{R}}$  表示采样协方差矩阵。不难发现,RCB 算法直接使用联合导向矢量最优估计值作为优化目标,然后利用权重向量与导向矢量之间的对应关系最终得到最优权重向量。但是仔细观察约束条件可知,其联合导向矢量的估计值是以初始的假定值作为中心进行估计的,因此 RCB 算法的最优解是以估值较为准确和不确定集选取较为合适为基础的。对于大规模 MIMO 雷达而言,其失配误差往往较大,RCB 算法性能会严重下降。

准确有效的失配误差模型是算法鲁棒性的关键。为提升算法性能,首先对失配误差模型进行分析。式(6)是从宏观角度分析导向矢量的未对准误差,而文献[11]则提出各类误差对于联合导向矢量各元素的影响都可以看成由幅度和相位两部分构成,并以方向角估计误差为例,给出了失配误差的经验收敛值,即

$$\varepsilon^2 \approx 2M_t M_r - 2\kappa^0 + 4\kappa^1 - 6\kappa^2 \quad (8)$$

式中:  $\kappa = e^{-j\pi \sin \theta}$ ,  $\theta$  为目标方向。

根据式(6)和式(8)不难发现,大不确定集类算法选取的参数必须是适当的<sup>[4]</sup>。因此,使用小的不确定集约束大的失配误差成为一种有效的手段。

### 2.2 MIMO-IRCB 算法

前文指出了基于大不确定集的 RCB 算法的局限性,并提出了一种基于小不确定集的方法来约束大的不匹配误差。本节提出的 MIMO-IRCB 算法,基于迭代思想对初始联合导向矢量假定值进行不断更新,来实现上述目的。

与 RCB 算法不同,本文选择的联合导向矢量估计并不总是用初始假设值估计,而是通过迭代不断更新。从目标函数的角度来看,所提算法的迭代更新是一个校正过程。正是由于  $\bar{\mathbf{a}}$  的初始值固定,制约了不确定集大小的选取,通过不断迭代时更新估计值,可以使  $\bar{\mathbf{a}}$  不再固定。从多维维度,联合导向矢量假定值,即不确定约束集的中心,通过迭代不断逼近实际值,以使最终估计更准确。基于迭代思想的另一个优势,就是可以选用小不确定集来约束大失配误差,这是因为联合导向矢量假定值可以在角度维上不断平移、逼近。正是约束条件中约束集中心的不断更新,选取的不确定集半径与原来的大不确定集半径相比,它可以选择更小,有效地避免了选择大不确定性集半径的困境。

### 2.3 迭代终止条件

选用小不确定集进行更新迭代,在设计迭代终止条件时需要注意两方面问题:1) 终止条件要使终止值能够收敛到真实值附近,而不能收敛到其他区域,使得

真实目标被当作干扰而被抑制,从而造成性能损失;  
2) 终止条件的选取要与目标函数相考量,不能用无效参数作为终止参数,尽可能选取与目标函数直接相关的参数。

文献[13]提出了一种采用控制误差失配范围的思路,基于此,本文提出了 MIMO 雷达系统的迭代终止条件表达形式,即

$$\begin{cases} |\hat{\lambda}_i - \hat{\lambda}_{i-1}| < \delta \\ \frac{|\hat{\mathbf{a}}_i^H \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\hat{\mathbf{a}}_i\| \cdot \|\bar{\mathbf{a}}_0\|} \leq \min \left( \frac{|\hat{\mathbf{a}}_{\text{under}}^H \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\hat{\mathbf{a}}_{\text{under}}\| \cdot \|\bar{\mathbf{a}}_0\|}, \frac{|\hat{\mathbf{a}}_{\text{above}}^H \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\hat{\mathbf{a}}_{\text{above}}\| \cdot \|\bar{\mathbf{a}}_0\|} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\delta$ 表示设定常数;导向矢量 $\hat{\mathbf{a}}_{\text{above}}$ 和 $\hat{\mathbf{a}}_{\text{under}}$ 分别表示相应约束角域的上限和下限。约束角域的上下限可以根据 MIMO 雷达系统的分辨率获得,即以假定方向角为中心的目标可能角域范围 $\Theta$ 。第一终止条件是根据目标函数设计的参数终止条件;第二条件是确保联合导向矢量估计可以收敛到实际目标信号的相应区域的联合导向矢量,从而将其收敛范围进行了约束。

不难发现,第一个判别终止条件可以很好地保证联合导向矢量的估计值和真实值之间的偏差很小,该条件是以 RCB 算法中的对角加载参数为考量的。实际上,上述条件也可以选用联合导向矢量直接作为迭代终止依据,即

$$|\hat{\mathbf{a}}_i - \hat{\mathbf{a}}_{i-1}| < \delta. \quad (10)$$

实际上,选用式(10)与选用式(9)第一个终止条件是等效的。这是因为选用估计联合导向矢量重要参数 $\lambda$ 作为依据时,其结束迭代时,该值趋于稳定范围,即算法的目标函数已经在可接受的范围内。而 $\lambda$ 是广义对角加载量,与联合导向矢量是一一对应的关系,因此迭代终止时联合导向矢量估计值也处于一个稳定的可接受范围,从这一点上来看,这两种终止迭代条件是等效的。因此 MIMO 雷达系统的迭代终止条件可以表示为

$$\begin{cases} |\hat{\lambda}_i - \hat{\lambda}_{i-1}| < \delta \text{ 或 } |\hat{\mathbf{a}}_i - \hat{\mathbf{a}}_{i-1}| < \delta \\ \frac{|\hat{\mathbf{a}}_i^H \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\hat{\mathbf{a}}_i\| \cdot \|\bar{\mathbf{a}}_0\|} \leq \min \left( \frac{|\hat{\mathbf{a}}_{\text{under}}^H \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\hat{\mathbf{a}}_{\text{under}}\| \cdot \|\bar{\mathbf{a}}_0\|}, \frac{|\hat{\mathbf{a}}_{\text{above}}^H \bar{\mathbf{a}}_0|}{\|\hat{\mathbf{a}}_{\text{above}}\| \cdot \|\bar{\mathbf{a}}_0\|} \right). \end{cases} \quad (11)$$

上述迭代终止条件只是对条件本身进行设计。事实上,与普通阵列信号处理不同,MIMO 雷达系统不仅具有接收端,同时还具有发射端,因此需要对联合导向矢量上下限进行针对性的设计。集中式 MIMO 雷达系统结构相对简单,发射角度和接收角度大致相同。假设初始估计的方向角是 $\hat{\theta}$ ,并且角误差容限是 $[\hat{\theta} - \Delta\theta, \hat{\theta} + \Delta\theta]$ ,那么导向矢量的上限和下限可以分别表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{a}}_{\text{above}} = \hat{\mathbf{a}}_i(\theta + \Delta\theta) \otimes \hat{\mathbf{a}}_r(\theta + \Delta\theta) \\ \hat{\mathbf{a}}_{\text{under}} = \hat{\mathbf{a}}_i(\theta - \Delta\theta) \otimes \hat{\mathbf{a}}_r(\theta - \Delta\theta) \end{cases}. \quad (12)$$

然而,对于分布式 MIMO 雷达而言,其收发端分离,发射角度和接收角度通常是不同的,因此有必要结合其特征设计导向矢量的上限和下限。由于发送端和接收端都具有误差角度公差,假设的发送角度范围和接收角度域可分别表示为 $[\hat{\theta}_t - \Delta\theta, \hat{\theta}_t + \Delta\theta]$ 和 $[\hat{\theta}_r - \Delta\theta, \hat{\theta}_r + \Delta\theta]$ ,因此其联合导向矢量的上下限的选取更加灵活。联合导向矢量上下限的选取可用图1阐述。

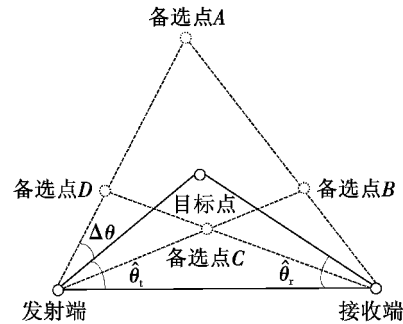


图1 联合导向矢量失配误差上下限示意图

Fig.1 Upper and lower limit of the mismatch error of the joint steering vector

分布式 MIMO 雷达的处理过程的思路是一致的,都是依靠角度维信息建立以假定目标点为中心的高维误差约束集。为了能够将所有的误差包含在高维曲面体内,选用空间维相离最大的两点,即备选点 A 和备选点 C,则联合导向矢量的上下限可以分别表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{a}}_{\text{above}} = \hat{\mathbf{a}}_i(\theta_t + \Delta\theta) \otimes \hat{\mathbf{a}}_r(\theta_r + \Delta\theta) \\ \hat{\mathbf{a}}_{\text{under}} = \hat{\mathbf{a}}_i(\theta_t - \Delta\theta) \otimes \hat{\mathbf{a}}_r(\theta_r - \Delta\theta) \end{cases}. \quad (13)$$

不难发现,式(12)与式(13)形式上具有一致性。换句话说,从表达的角度来看,集中式 MIMO 雷达可以被视为具有相同发射和接收角度的分布式 MIMO 雷达。因此,MIMO 雷达系统的联合导向矢量的一般形式可以由式(13)表示。

利用式(7)求解联合导向矢量估计值,假定第 $i$ 次迭代获得的联合导向矢量估计值和拉格朗日乘子分别为 $\hat{\mathbf{a}}_i$ 和 $\lambda_i$ ,则本文提出的联合波束形成算法具体总结如下:

- 1) 初始化假定值,即 $i=0$ ,则 $\hat{\mathbf{a}}_0 = \bar{\mathbf{a}}$ ;
- 2) 当迭代次数 $i=1$ 时,利用 RCB 算法求解出 $\hat{\mathbf{a}}_i$ 和 $\lambda_i$ ,并将其作为 $\mathbf{a}_i$ 和 $\lambda_i$ ;
- 3) 当使用迭代次数 $i>1$ 时,RCB 算法用于求解 $\hat{\mathbf{a}}_i$ 和 $\lambda_i$ ,并判断是否满足终止条件,否则,用新 $\hat{\mathbf{a}}_i$ 和 $\lambda_i$ 获得的值重复该步骤并替换原始假设值 $\hat{\mathbf{a}}_{i-1}$ 和拉格朗日乘数 $\lambda_{i-1}$ ;
- 4) 利用最终获得的联合导向矢量估计值 $\hat{\mathbf{a}}$ 替换最

最优权矢量求解式中的  $\mathbf{a}$ , 同时用采样协方差矩阵作为理想协方差矩阵的估计, 可以获得最优权矢量  $\mathbf{w}_{\text{IRCB}}$ 。

### 3 仿真结果与分析

在不失一般性的情况下, 假设 MIMO 雷达系统是具有半波长间隔的均匀线性阵列。发送阵列元素的数量  $M_t = 10$ , 接收阵列元素的数量  $M_r = 10$ , 研究对象是远场点目标, 并且在该空间中存在两个干扰目标, 其干噪比 INR 均为 30 dB, 噪声为标准高斯白噪声。本文研究集中式 MIMO 雷达和分布式 MIMO 雷达在各种误差条件下的性能, 并与文献[3, 14]提出的基于双迭代思想的 BIA-RCB 算法和 BI-QCQP 算法进行对比分析。

#### 3.1 集中式 MIMO 雷达

仿真实验环境与文献[12]验证 BI-QCQP 算法基本一致。集中式 MIMO 雷达具有集中的空间分布, 发射端和接收端通常位于同一个位置, 因此发射角和接收角通常是相同的。在模拟条件下, 真实目标方向的假定值是  $6^\circ$ , 目标方向的假定值  $3^\circ$ , 方向角的失配误差是  $3^\circ$ , 并且方向角干涉值分别是  $30^\circ$  和  $50^\circ$ , 快拍数为  $L=200$ 。各算法参数选取为: WC 算法参数  $\varepsilon = 7$ , RCB 算法参数  $\varepsilon = 8$ , BIA-RCB 算法参数  $\varepsilon = 8$ ; BI-QCQP 算法、MIMO-IRCB 算法的约束角度容限均为  $\Delta\theta = 5^\circ$ , 终止迭代参数  $\delta = 10^{-4}$ , MIMO-IRCB 算法不确定集参数  $\varepsilon = 4$ 。蒙特卡罗实验次数均为 100。

图 2 显示了不同 SNR 条件下各种算法的输出 SINR 性能比较。仿真实验中假定联合导向矢量具有任何失配误差, 即每个元素被复杂的高斯分量“污染”, 其均方差为 0.04。从图 2 中可以看出, MIMO-IRCB 对任何误差鲁棒性都很好, 特别是当 SNR 大于  $-20$  dB 时, 输出 SINR 性能始终最高。

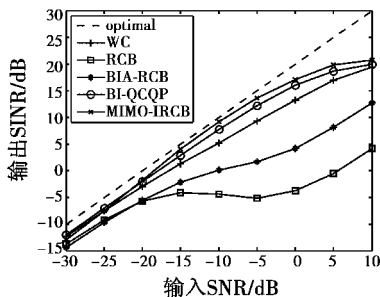


图 2 不同 SNR 条件下的 SINR

Fig. 2 The output SINRs versus the input SNRs

图 3 显示了当信噪比为  $-5$  dB 且快拍数量不同时算法的输出 SINR。所提算法具有 100 到 1000 之间的最大输出 SINR, 尤其是当快拍数接近 1000 时, 该算法的性能更接近理论值, 并且所提算法对快拍数量的依

赖性降低。

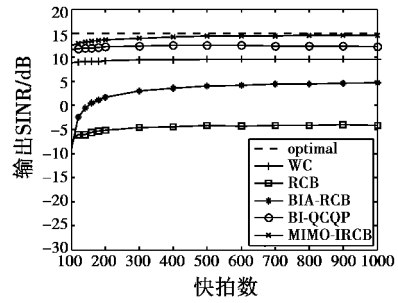


图 3 不同快拍数下的 SINR

Fig. 3 The output SINRs versus number of snapshots

图 4 显示了不同角度估计误差下算法的性能比较。WC 算法和 RCB 算法难以应对角度估计误差, 输出 SINR 严重降低, 而 BIA-RCB 和 BI-QCQP 算法在误差较小时对方向角估计误差具有鲁棒性; 但在失配较大时, 效果差强人意。而所提算法即使在失配误差较大时仍能获得最高输出 SINR, 即算法对方向角失配误差较大情形也具有很强的鲁棒性。

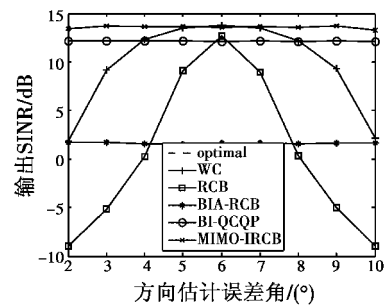


图 4 角度估计误差不同时的 SINR

Fig. 4 The output SINRs versus the direction errors

#### 3.2 分布式 MIMO 雷达

分布式 MIMO 雷达收发器的空间分布通常较远, 因此传输角度和接收角度往往不同。在仿真实验中,  $\theta_t, \theta_r$  分别表示波的离开角和到达角, 仿真条件与文献[3]基本一致, 验证了 BI-RCB 算法。真实的目标角为  $(-30^\circ, 10^\circ)$ , 假定的目标角为  $(-33^\circ, 7^\circ)$ , 方向角存在  $3^\circ$  的失配误差, 两个干扰的角度分别为  $(-40^\circ, 20^\circ)$  和  $(20^\circ, -30^\circ)$ , 并且算法参数与集中式 MIMO 雷达模拟环境相同。本文只对任意失配误差条件下和方向角度估计误差条件下两种情形进行研究。

图 5 显示了在任意失配误差条件下算法的输出 SINR 性能的比较, 不难发现 MIMO-IRCB 算法对任意失配误差具有鲁棒性。从图 6 可以看出, 在失配误差较大时, 本文所提算法在方向角失配误差为  $(-4^\circ, 4^\circ)$  范围内始终能获得最高输出 SINR, 即算法具有很强的鲁棒性。

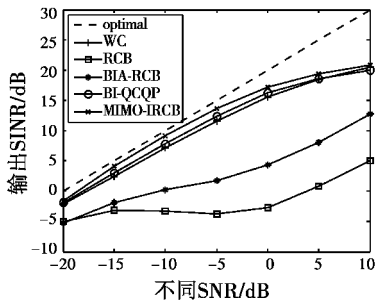


图 5 任意失配误差下的 SINR

Fig. 5 Output SINRs under random mismatched errors

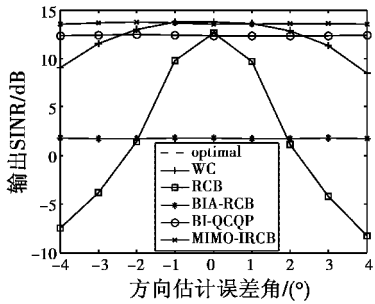


图 6 角度估计误差不同时的 SINR

Fig. 6 Output SINRs versus direction errors

### 3.3 算法性能分析

为了充分验证算法有效性,对算法性能提升原因和大失配情形下性能也进行了仿真实验。图 7 和图 8 分别给出了各类算法的归一化方向图和误差角度范围内的局部放大图。从图 8 中不难发现,所提算法的方向角的估计非常接近理论值,并且所获得的导向矢量更准确。所提算法对方向误差、校正误差等任意失配误差均具有很强的鲁棒性。

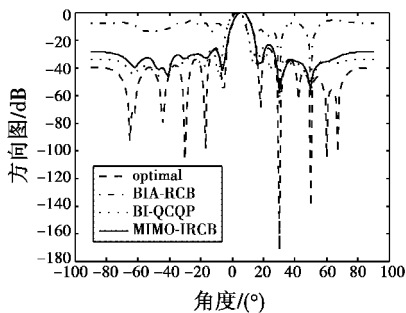


图 7 各算法归一化方向图

Fig. 7 The normalized beampatterns of different algorithms

图 9 显示了不同发射阵列元素的算法性能比较。不难看出,当虚拟阵元数增大,其失配误差亦会变大,其他算法性能均有不同程度的下降,而本文所提算法仍然具有较好的鲁棒性,这是因为小不确定集对于大失配误差约束能力更强,获得的联合导向矢量更准确。

图 10 显示了每种算法与不同迭代次数下的性能比较。显然,当迭代次数达到 3 时,即 BI-QCQP 算法建

议的迭代次数时,本文所提算法可以获得最优输出 SINR 性能。值得注意的是,BI-QCQP 每次迭代时需要发射端和接收端进行 2 步交错求解,而所提算法只需要 1 步求解,因而事实上迭代效率更高。

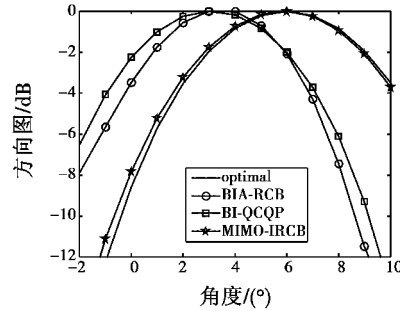


图 8 算法归一化方向图局部放大图

Fig. 8 Partial enlarged detail of the normalized beampatterns

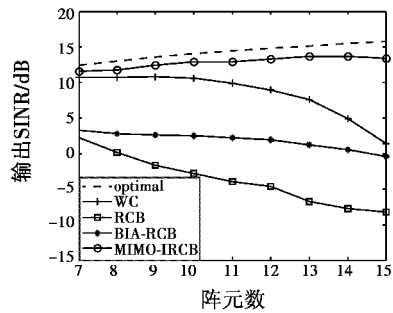


图 9 发射端阵元数不同时的 SINR

Fig. 9 The output SINRs versus number of array elements of transmitting side

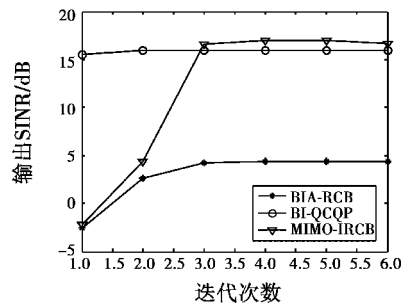


图 10 不同迭代次数下的 SINR

Fig. 10 The output SINRs versus number of iteration

## 4 结束语

本文提出的 MIMO 雷达迭代鲁棒 Capon 波束形成算法,使用小的不确定性集可解决大误差大不匹配的情况,通过迭代思想,解决导向矢量期望值估计问题,可保证联合导向矢量更准确。仿真结果表明,该算法对联合导向矢量失配误差具有鲁棒性,输出信噪比性能最优。

## 参考文献

[1] LI J, STOICA P. MIMO radar with colocated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5):106-114.

- [2] XIANG C, FENG D Z, LV H, et al. Robust adaptive beamforming for MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(12):3185-3196.
- [3] 王勇. MIMO 雷达稳健的自适应波束形成方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [4] 谭志浩,金伟,贾维敏. MIMO 雷达迭代最差性能最优鲁棒波束形成算法[J]. *信号处理*,2018,34(2):192-200.
- [5] 熊孝华,杨安会. 现代雷达信号处理及发展趋势研究[J]. *中国高新技术企业*,2011(13):23-24.
- [6] 李茂仙,董天临,黄高明. 一种针对分布 MIMO 雷达的高效干扰功率分配方法[J]. *火力与指挥控制*,2017,42(4):26-31.
- [7] HUANG L, ZHANG J, XU Z, 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] VOROBYOV S A, CHEN H, GERSHMAN B. On the relationship between robust minimum variance beamformers with probabilistic and worst case distortionless response of constraints[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(11):5719-5724.
- [12] JIN W, JIA W M, YAO M L, et al. Robust adaptive beamforming based on iterative implementation of worst-case performance optimization[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(22):1389-1391.
- [13] 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.
- [14] 虞泓波,冯大政,解虎. MIMO 雷达迭代降维稳健波束形成方法[J]. *西安电子科技大学学报*,2016,43(1):30-35.

(上接第 11 页)

Institute of Technology, 2013.

- [8] 马宇申. 基于 ADS-B 的空中交通预警防撞技术研究[D]. 天津:中国民航大学,2014.
- [9] 李仙颖. 基于 ADS-BIN 的终端区避撞仿真平台设计与实现[D]. 天津:中国民航大学,2016.
- [10] 罗文田,赵泽荣,张德银. 基于 ADS-B 的飞机预警避撞算法研究[J]. *控制工程*,2011,18(4):559-563.
- [11] 戴超成,肖刚,敬忠良. 采用 ADS-B 的冲突飞机选择算法[J]. *电光与控制*,2011,18(10):11-14,19.
- [12] XIAO G, XU Y, DAI C, et al. A selection algorithm for conflict aircrafts and performance analysis based on ADS-B [C]//*Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, IEEE, 2011:1D3-1-1D3-6.
- [13] HWANG S S, SPEYER J L. Collision detection system based on differential carrier-phase global positioning system broadcasts[J]. *Journal of Aircraft*, 2009, 46(6):2077-2089.

(上接第 15 页)

测[J]. *光学精密工程*,2017,25(7):1954-1960.

- [3] 王敏,赵金宇,陈涛,等. 基于时空域的暗弱空间运动点目标检测算法[J]. *电子与信息学报*,2017,39(7):1578-1584.
- [4] 张健,娄树理,任建存. 基于时序多帧投影的空间目标检测算法[J]. *激光与红外*,2015,45(1):88-93.
- [5] 张健,奚晓梁,周晓东. 基于运动信息的星图中空间目标检测算法[J]. *系统工程与电子技术*,2014,36(5):838-845.
- [6] 周苑,张健民,林晓. 基于加权 LoG 算子的红外弱小目标检测方法研究[J]. *应用光学*,2017,38(1):114-119.
- [7] 刘帅,王铎,孙腾飞. 基于 SUSAN 算子的白天红外星目标检测[J]. *红外技术*,2013,23(9):571-574,586.
- [8] 王鲲鹏,马超伟,侯旺,等. 凝视观测图像空间弱小目标检测方法[J]. *应用光学*,2014,35(4):614-618.
- [9] 蒲静松,许东,刘乙君,等. 星空背景下红外弱小目标的快速检测[J]. *激光与红外*,2017,47(4):513-518.
- [10] 乔立永,徐立新,高敏. 红外目标识别图像复杂度度量方法综述[J]. *红外技术*,2013,35(2):88-96.
- [11] 周冰,王永仲,应家驹. 弱小目标检测技术浅析[J]. *红外技术*,2007,29(1):30-33.
- [12] 张惠娟,梁彦,程咏梅,等. 运动弱小目标先跟踪后检测技术的研究进展[J]. *红外技术*,2006,28(7):423-430.
- [13] CHU P L. *Efficient detection of small moving objects*[D]. Lexington:Massachusetts Institute of Technology, 1989.