

目标个数未知时双基地MIMO雷达多目标角度跟踪算法研究

张正言* 张剑云 周青松

(国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037)

摘要: 针对目标个数未知时双基地MIMO雷达角度跟踪问题, 该文提出一种基于改进自适应非对称联合对角化(AAJD)的目标个数与角度联合跟踪算法。AAJD算法中无法得到特征值变量, 因此改进AAJD算法引入主成分顺序估计思想, 循环求出特征值, 然后运用改进信息论准则估计出目标个数。其次提出目标个数防抖动算法, 提高了稳健性。最后改进了ESPRIT算法, 完成了目标参数的自动配对和关联。仿真结果表明改进AAJD算法能够成功跟踪目标个数和角度, 验证了理论分析的有效性。

关键词: 双基地MIMO雷达; 角度跟踪; 目标个数跟踪; 自动关联与配对

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2491-07

DOI: 10.11999/JEIT171174

Study on Multi-target Angle Tracking Algorithm of Bistatic MIMO Radar with Unknown Target Number

ZHANG Zhengyan ZHANG Jianyun ZHOU Qingsong

(National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to solve the angle tracking problem of bistatic MIMO radar when the number of target is unknown, a joint tracking algorithm of the number of target and the angle is proposed. There is no variable in Adaptive Asymmetric Joint Diagonalization (AAJD) algorithm that can directly represent the eigenvalue. Therefore, the idea of principal component sequence estimation is introduced to the improved AAJD algorithm, and the eigenvalues are iteratively evaluated. Then, the number of target is estimated by using the improved information theory. Secondly, the anti-dithering algorithm of target number is proposed, which improves the robustness of the algorithm. Finally, the ESPRIT algorithm is improved to realize the automatic matching and association of DOD and DOA. The simulation results show that the improved AAJD algorithm can successfully track the number of target and angle trajectories. The efficiency of the proposed method is verified.

Key words: Bistatic MIMO radar; Angle tracking; Target number tracking; Automatic matching and association

1 引言

多输入多输出(MIMO)雷达利用多发多收结构获得了诸多优势, 引起许多学者的关注^[1]。MIMO雷达可以依据阵列结构分为两种类型: 小间隔MIMO雷达(又称为相干MIMO雷达)和大间隔MIMO雷达(又称为统计MIMO雷达)。相干MIMO雷达利用一个发射阵列, 通过不同的阵元发射正交信号, 由接收阵列每个阵元接收后通过一组匹配滤波器进行处

理, 可以得到更多的观测通道。总体来看, 相干MIMO雷达的阵列孔径被有效地扩展, 能够获得更加灵活的发射波形设计、更稳健的性能和多目标定位与跟踪的能力^[2-5]。双基地MIMO雷达收发基地分布较远, 因此获得了“四抗”优势, 同时具有双基地雷达与MIMO雷达的优势, 因此本文以双基地MIMO雷达为研究对象。

双基地MIMO雷达的文献研究集中在目标检测识别、参数估计等方面^[6-9], 而关于目标跟踪问题研究较少。

文献^[10~12]研究了单基地MIMO雷达角度跟踪问题。而单基地MIMO雷达的发射角(Direction Of Departure, DOD)和接收角(Direction Of Arrival, DOA)相同, 联合方向矢量较简单, 因此上述文献算法无法直接解决收发基地分置的双基地

收稿日期: 2017-12-14; 改回日期: 2018-06-20; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 张正言 zzyaisj@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671453, 61201379), 安徽省自然科学基金(1608085MF123)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671453, 61201379), The Natural Science Foundation of Anhui Province (1608085MF123)

MIMO雷达目标跟踪问题。

文献[13]提出了一种新的信号模型,解决了目标方位角和俯仰角的跟踪问题。但算法的信号模型不具有通用性。文献[14]提出了一种适合低角速率目标的角度快速跟踪算法,计算复杂度低,可自动关联角度,但目标角速率高时算法性能急剧下降。文献[15]运用紧缩投影近似子空间跟踪(Projection Approximation Subspace Tracking with deflation, PASTd)算法成功地解决了目标跟踪问题,跟踪精度高于文献[14],但当目标的收发角度不同时算法失效。文献[16]提出了自适应非对称联合对角化(Adaptive Asymmetric Joint Diagonalization, AAJD)算法。该算法将寻优过程分为两步,能够跟踪相同DOD或DOA的目标,并且实现了目标角度的自动关联,克服了文献[14,15]的不足。

上述文献中双基地MIMO雷达角度跟踪算法的前提是目标个数已知,而实际中目标个数往往是未知的,因此本文提出一种双基地MIMO雷达目标个数和角度的联合跟踪算法。现有的目标个数估计算法需要得到特征值,而AAJD算法中没有可以表示特征值的变量,因此借鉴主成分循环估计思想,通过循环迭代获得特征值,结合信息论准则估计出目标个数,并且实现了目标个数与角度的跟踪。在稳定跟踪状态时,目标个数大部分时间保持不变,因此提出目标个数防抖动算法,提高了算法的稳健性。最后改进了ESPRIT算法,完成目标的配对和关联。改进AAJD算法能够同时跟踪目标个数与角度,并且跟踪性能较好。

2 双基地MIMO雷达运动目标信号模型

假设双基地MIMO雷达收发基地分别由 M 个发射阵元和 N 个接收阵元组成,收发阵元间隔相同且为波长 λ 的一半,等效阵元个数为 $L = M \times N$ 。由于阵元间距充分小,收发天线每个阵元对应的目标截面积相同,双基地MIMO雷达的配置如图1所示。

空中存在 P 个远场目标,可近似为点目标。 t 时刻目标的位置分别为 $[(\varphi_{t,1}, \theta_{t,1}), (\varphi_{t,2}, \theta_{t,2}), \dots, (\varphi_{t,P}, \theta_{t,P})]$,第 i 个目标的速度为 v_i , φ'_i 和 θ'_i 分别为收

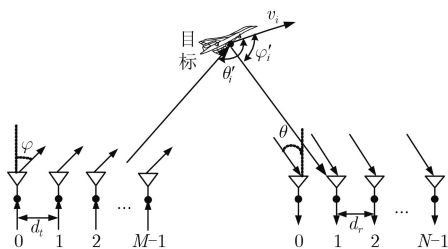


图1 双基地MIMO雷达配置结构

发角方向与速度方向的夹角。

接收阵元的输出信号为

$$\bar{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^P \mathbf{a}_r(\theta_{t,i}) \varepsilon_i \mathbf{a}_t^T(\varphi_{t,i}) \mathbf{s}(t - \tau_i) \cdot \exp(j2\pi f_i t) + \bar{\mathbf{n}}(t) \quad (1)$$

其中, $f_i = \frac{v_i(\cos \theta'_i + \cos \varphi'_i)}{\lambda}$ 为多普勒频移, $\mathbf{a}_t(\varphi_{t,i}) = [1, e^{j\pi \sin \varphi_{t,i}}, \dots, e^{j\pi(M-1) \sin \varphi_{t,i}}]^T$ 为发射方向矢量, $\mathbf{a}_r(\theta_{t,i}) = [1, e^{j\pi \sin \theta_{t,i}}, \dots, e^{j\pi(N-1) \sin \theta_{t,i}}]^T$ 为接收方向矢量, 其中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_P$ 为目标的截面积, 设其满足Swerling II模型。 $\mathbf{s}(t - \tau_i) = [s_1(t - \tau_i) \exp[j2\pi \cdot f_c(t - \tau_i)], \dots, s_M(t - \tau_i) \exp[j2\pi f_c(t - \tau_i)]]^T$, $\bar{\mathbf{n}}(t)$ 是高斯加性白噪声。

对 $\bar{\mathbf{x}}(t)$ 进行匹配滤波处理,并矩阵化表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_r(\theta) \text{diag}(\mathbf{d}(t)) \mathbf{A}_t^T(\varphi) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{d}(t) = [\varepsilon_1 \exp(j2\pi f_1 t), \dots, \varepsilon_P \exp(j2\pi f_P t)]^T$ 满足Swerling II模型。 $\mathbf{n}(t)$ 为滤波后的噪声。

式(2)取直后

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t) &= \mathbf{A}_t(\varphi) \odot \mathbf{A}_r(\theta) \text{vec}(\text{diag}(\mathbf{d}(t))) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{W}(t) \mathbf{d}(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{W}(t) = [\mathbf{a}_r(\theta_{t,1}) \otimes \mathbf{a}_t(\varphi_{t,1}), \mathbf{a}_r(\theta_{t,2}) \otimes \mathbf{a}_t(\varphi_{t,2}), \dots, \mathbf{a}_r(\theta_{t,P}) \otimes \mathbf{a}_t(\varphi_{t,P})]$ 为 $MN \times P$ 维的联合导向矢量, $\mathbf{A}_r(\theta) = [\mathbf{a}_r(\theta_1), \mathbf{a}_r(\theta_2), \dots, \mathbf{a}_r(\theta_P)]$ 和 $\mathbf{A}_t(\varphi) = [\mathbf{a}_t(\varphi_1), \mathbf{a}_t(\varphi_2), \dots, \mathbf{a}_t(\varphi_P)]$ 为收发方向矢量。

3 基于改进AAJD的特征值估计算法

传统的目标源个数估计算法可以分为两类:一类是根据信息论相关准则从信号描述角度来判断目标源个数,另一类是直接根据数据矩阵的结构,包括其特征分解情况进行判别,其中经典的估计算法需要预先得到特征值信息。而文献[16]中的AAJD算法中没有能够表征特征值的变量,因此本节改进了AAJD算法,估计出特征值变量,用于求解目标个数。

3.1 改进AAJD角度跟踪算法

借鉴经典子空间类算法中的特征分解过程,本文将主成分顺序估计思想[17,18]引入到AAJD算法中。根据主成分顺序估计思想得出结论,改进AAJD估计出的 $g_i(t)$ 与特征分解得到的 λ_i 相等,都为估计出的特征值。因此可以利用主成分顺序估计思想改进AAJD算法,一一求出特征矢量 $\mathbf{W}_i(t)$,同时求出相应的特征值 $g_i(t)$ 。表1描述了改进AAJD算法的流程。

3.2 特征值估计

改进AAJD算法求出了特征值向量 $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_L(t)]^T$, 可用来估计目标个数,但

表1 改进AAJD算法流程

初始值: $\mathbf{P}(0) = \mathbf{I}_{P \times P}$, $0 < \beta \leq 1$, K 为稳定脉冲数
 输入: $\mathbf{y}(t)$
 输出: $\varphi(t), \theta(t)$
 For $t = 1, 2, \dots, T$
 步骤 1 for $i = 1, 2, \dots, L$
 $d_i(t) = \mathbf{W}_i^{-1}(t-1) \mathbf{y}_i(t)$
 $g_i(t) = \beta g_i(t-1) + |d_i(t)|^2$
 $Q_i(t) = d_i^*(t) / g_i(t)$
 $\eta_i(t) = |d_i(t)|^2 / g_i(t)$
 $\mathbf{e}_i(t) = \mathbf{y}_i(t) - \mathbf{W}_i(t-1) d_i(t)$
 $\widehat{\mathbf{W}}_i(t) = \mathbf{W}_i(t-1) + 1/(\beta + \eta_i(t)) \mathbf{e}_i(t) Q_i(t)$
 $\mathbf{y}_{i+1}(t) = \mathbf{y}_i(t) - \widehat{\mathbf{W}}_i^{-1}(t) d_i(t)$
 end
 if $t < K$
 对 $\mathbf{g}(t)$ 进行降序排列, 并取最大的 P 个特征值对应的矢量
 构成 $\mathbf{W}(t)$
 else
 取前 P 个特征矢量构成 $\mathbf{W}(t)$
 end
 步骤 2
 if $t == 1$
 $\Psi_r = \mathbf{W}_{r1}^{-1} \mathbf{W}_{r2}$, 对 Ψ_r 进行特征值分解:
 $\Psi_r = \mathbf{T} \Phi_r \mathbf{T}^{-1}$, 取 Φ_r 的对角线元素组成 ω_r
 $\Phi_t = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{W}_{t1}^{-1} \mathbf{W}_{t2} \mathbf{T}$, 取 Φ_t 的对角线元素组成 ω_t
 else
 $\Psi_r = \mathbf{W}_{r1}^{-1} \mathbf{W}_{r2}$, $\Psi_t = \mathbf{W}_{t1}^{-1} \mathbf{W}_{t2}$, 取 Ψ_r 和 Ψ_t 的对角线元素组成 ω_r 和 ω_t
 end
 利用 $\theta_p = \arcsin \{ \text{angle} [\omega_r(p)] / \pi \}$,
 $\varphi_p = \arcsin \{ \text{angle} [\omega_t(p)] / \pi \}$, 得到了 $\theta(t), \varphi(t)$
 根据 $\mathbf{W}(t) = [\mathbf{a}_r(\theta_1) \otimes \mathbf{a}_t(\varphi_1), \dots, \mathbf{a}_r(\theta_P) \otimes \mathbf{a}_t(\varphi_P)]$ 更新 $\widehat{\mathbf{W}}(t)$
 End

改进AAJD算法步骤2利用得到的估计角度更新了特征矢量, 因此需要求出更新后的特征值。通过下述步骤更新特征值向量。

For $i = 1, 2, \dots, L$

$$\begin{aligned} d_i(t) &= \mathbf{W}_i^{-1}(t-1) \mathbf{y}_i(t); \\ g_i(t) &= \beta g_i(t-1) + |d_i(t)|^2; \\ \mathbf{y}_{i+1}(t) &= \mathbf{y}_i(t) - \widehat{\mathbf{W}}_i^{-1}(t) d_i(t) \end{aligned}$$

End

4 运动目标个数与角度联合跟踪算法

4.1 运动目标个数估计算法

由第3节求出的特征值变量可以结合信息论准则进行目标个数估计。阵列信号处理中AIC(Akaike

Information Criterion)和MDL(Minimum Description Length)是常见的信息论准则。

$$\begin{aligned} \text{AIC}(k) &= \min_k \{ (L-k) J \ln(\theta(k)) + k(2L-k) \}, \\ \text{MDL}(k) &= \min_k \left\{ (L-k) J \ln(\theta(k)) \right. \\ &\quad \left. + k(2L-k) \frac{\ln(J)}{2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,

$$\theta(k) = \frac{\left(\sum_{i=k+1}^L \lambda_i \right) / (L-k)}{\left(\prod_{i=k+1}^L \lambda_i \right)^{1/(L-k)}} \quad (5)$$

$k = 0, 1, \dots, L-1$, $L = M \times N$, J 是观测取样数, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L$ 按照降序排列。

式(5)中的特征值 λ_i 可以使用特征值矢量 $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_L(t)]^T$ 代替。改进AAJD算法采用权重系数对数据进行利用, 可知观测取样数 J 可用有效窗长度表示, 通过式(6)获得

$$J(\beta, t) = \sum_{i=1}^t \beta^{t-i} = \frac{1 - \beta^t}{1 - \beta} \stackrel{t \gg 1}{\approx} \frac{1}{1 - \beta} \quad (6)$$

通过式(6)可以看出跟踪过程中取样数与遗忘因子有关, 遗忘因子的取值一般较大, 导致有效取样数较小, 而取样数较少时, AIC的漏警概率较小, 即目标个数的错误检测概率低于MDL准则, 因此本文采用更加适合跟踪过程的AIC准则。

下面给出运动目标个数估计算法。

跟踪过程可以分为稳定和非稳定状态, 跟踪初始时为非稳定状态, 估计出的特征值随机分布, 并且误差相对较大, 随着跟踪的继续, 算法逐渐收敛, 进入稳定状态, 此时大特征值位于特征值向量的前面, 并且误差较小, 当观测目标状态发生变化时, 跟踪又进入非稳定状态。因此根据跟踪状态的不同将目标跟踪过程分为对应的两种。

(1)非稳定状态时, 由于特征值随机分布, 因此首先对特征值进行降序排列, 将排序后的特征值代入式(4), 估计出目标个数。(2)稳定跟踪状态时, 目标个数保持不变, 对特征值进行排序, 前 P 个大特征值对应着目标, 其余小特征值表示噪声功率。理论上小特征值相同, 因此将小特征值取平均即

$$g_N(t) = \sum_{i=P+1}^L g_i(t) / (L-P) \quad (7)$$

得到了变换后的特征值向量 $\mathbf{g}(t) = [g_1(t),$

$g_2(t), \dots, g_P(t), g_N(t), \dots, g_N(t)]^T$ 。将 $\mathbf{g}(t)$ 代入 AIC 准则, 观测取样数 J 由式(6)求得。由于后面 $L - P$ 个特征值相同使得

$$\theta(k) = 1, k = P, P+1, \dots, L \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)得

$$\text{AIC}(k) = \min_k k(2N - k), k = P, P+1, \dots, L \quad (9)$$

当 $k \geq P$ 时, $\text{AIC}(k)$ 严格单调递增, 因此只需要计算 $k \leq P$ 时的 AIC 值, 即可得到全局最小值, 减小了计算量。

4.2 运动目标个数跟踪算法

改进 AAJD 算法能够实现目标个数和角度参数联合跟踪的关键在于实现目标个数的跟踪, 即在已知 $t-1$ 时刻目标个数 $P(t-1)$ 的基础上估计出 t 时刻的目标个数。由于 t 时刻目标个数可能会发生突变, 造成式(7)估计出错误的噪声功率, 4.1 节中稳定跟踪状态的目标个数估计算法将失效。因为 $t-1$ 与 t 两个相邻时刻的噪声功率近似相等, 因此本文用 $g_N(t-1)$ 代替 $g_N(t)$, 并多保留比前一时刻目标个数多一位的特征值, 其余小特征值取平均。令

$$g_N(t-1) = \sum_{i=P(t-1)+2}^L g_i(t-1) / (L - P(t-1) - 1),$$

最终得到 t 时刻变化后的特征值向量 $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_{P(t-1)}(t), g_{P(t-1)+1}(t), g_N(t-1), \dots, g_N(t-1)]^T$, 因为 $\mathbf{g}(t)$ 中后 $L - P(t-1) - 1$ 个数据相同, 因此只需要计算前 $k \leq P(t-1) + 1$ 个 $\text{AIC}(k)$ 值即可。下面考虑 t 时刻可能出现的 4 种情况, (1) 目标个数保持不变且信号参数没有突变, 此时前 $P(t-1)$ 个特征值仍是最大的, $g_{P(t-1)+1}(t)$ 代表噪声功率, 与 $g_N(t-1)$ 近似相等, 因此求出的 t 时刻的目标个数不变。(2) 目标减少 1 个时, $g_{P(t-1)}(t), g_{P(t-1)+1}(t)$ 都代表噪声功率与 $g_N(t-1)$ 近似相同, 估计出的 t 时刻的目标个数为 $P(t-1) - 1$ 。(3) 目标增加 1 个时, $g_{P(t-1)}(t)$ 大于噪声功率 $g_N(t-1)$, 估计出的目标个数为 $P(t-1) + 1$ 。(4) 目标个数变化大于 1 个时, 当增加的目标个数大于 1 个时, 如仍采用 $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_{P(t-1)+1}(t), g_N(t), \dots, g_N(t)]^T$, 则除了 $g_{P(t-1)+1}(t)$ 增大, 其后 $g_{P(t-1)+2}(t)$ 也会增大, 而 $g_N(t) = \sum_{i=P(t-1)+2}^L g_i(t) / (L - P(t-1) - 1)$, 将会导致 $g_N(t)$ 大于噪声功率, 估计出错误的目标个数, 所以本文采用 $g_N(t-1)$ 代替 $g_N(t)$, 避免估计出错误目标个数。减少的目标个数大于 1 个时, 对 $g_N(t)$ 的值不造成影响, 因此不会影响估计结果的准确性。可以看出本文不仅仅是将 AIC 准则引入, 也是对 AIC 准则的扩展, 使其更好地适用于双

基地 MIMO 雷达跟踪过程, 表 2 给出目标个数跟踪过程。

表 2 目标个数跟踪过程

输入: $\mathbf{y}(t), \mathbf{W}(t), P(t-1)$, 稳定脉冲数 K
输出: $P(t)$
For $i = 1, 2, \dots, L$
$d_i(t) = \mathbf{W}_i^{-1}(t) \mathbf{y}_i(t)$
$g_i(t) = \beta g_i(t-1) + d_i(t) ^2$
$\mathbf{y}_{i+1}(t) = \mathbf{y}_i(t) - \widehat{\mathbf{W}}_i^{-1}(t) d_i(t)$
End
If $t < K$, K 为稳定脉冲数
$\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_L(t)]^T$
Else
取 $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_{P(t-1)}(t), g_{P(t-1)+1}(t), g_N(t-1), \dots, g_N(t-1)]^T$
End
根据 AIC 准则估计出 t 时刻的目标个数 $P(t)$, 注意当 $t > K$ 只需求出前 $P(t-1) + 1$ 个 AIC 值, 即可得到全局最小值。

4.3 稳定状态目标个数防抖动算法

改进 AAJD 算法将单位阵作为初始收发方向矢量, 误差较大, 跟踪处于非稳定状态, 得到的特征值不准确, 随着跟踪的继续, 进入稳定状态, 此时目标个数大部分时间保持不变, 但由于有效取样数较小, 有可能导致部分时刻估计出的目标个数发生突变。为了解决这个问题, 增加目标个数防抖动算法, 只有当连续 3 次以上估计出的目标个数相同且与前面的目标个数不同时, 才认为是目标个数发生改变, 令目标个数等于当前估计出的目标个数, 其余情况保持目标个数不变。通过本节的稳定状态目标个数防抖动算法, 增加了本文算法的稳健性。

4.4 目标个数与角度联合跟踪算法流程

步骤 1 根据表 1 中的改进 AAJD 算法求出 $\mathbf{W}(t)$ 和 $\mathbf{g}(t)$;

步骤 2 根据表 2 更新特征值向量, 当 $t < K$ 时, 令 $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_L(t)]^T$, 当 $t \geq K$ 时, 令 $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_{P(t-1)}(t), g_{P(t-1)+1}(t), g_N(t-1), \dots, g_N(t-1)]^T$, K 为稳定脉冲数, 可以根据经验获得;

步骤 3 将 $\mathbf{g}(t)$ 降序排列, 并根据表 2 得到 t 时刻的目标个数 $P(t)$;

步骤 4 如果 $t > K$ 时, 增加防抖动算法: 如果 $P(t) = P(t-1) = P(t-2) \neq P(t-3)$, 令 $P = P(t)$, 否则 $P = P(t-3)$ 。

5 仿真实验

双基地MIMO雷达收发阵元间距均为半波长, 正交信号的载波频率为1 GHz, 脉冲宽度和重复频率分别为10 μ s和10 kHz。给出如下仿真实验。

信噪比定义为: $\text{SNR} = 10 \lg \sum_{p=1}^P \sigma_p^2 / P\sigma_e^2$ 。定

$$\text{RMSE}(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{P} \sqrt{\sum_{k=1}^P (\hat{\theta}_{k,m,t} - \theta_{k,m,t})^2},$$

其中 $\hat{\theta}_{k,m,t}$ 是第 m 次实验 t 时刻 $\theta_{k,m,t}$ 的估计值。

实验1 静止目标个数与位置联合跟踪 假设发射脉冲数 $K = 500$, 观测的目标分别位于 $(\theta_1, \varphi_1) = (30^\circ, -40^\circ)$, $(\theta_2, \varphi_2) = (20^\circ, 10^\circ)$, $(\theta_3, \varphi_3) = (50^\circ, 20^\circ)$, $\text{SNR} = 10$ dB, $150 < K < 300$ 时, 新增的两个目标位于 $(\theta_4, \varphi_4) = (-14^\circ, 38^\circ)$ 和 $(\theta_5, \varphi_5) = (-1^\circ, 2^\circ)$, $\text{SNR} = 15$ dB, $400 < K < 450$ 时, 新增观测目标位于 $(\theta_6, \varphi_6) = (-35^\circ, 48^\circ)$, $\text{SNR} = 5$ dB。收发阵元数 $M = N = 4$, 遗忘因子 $\beta = 0.95$ 。目标个数和角度跟踪结果如图2、图3所示, 由于非稳定跟踪状态时, 估计出的目标个数不稳定, 不具有比较意义, 因此选取脉冲数100后的角度跟踪结果。

图2中估计出的目标个数与真实个数基本重合, 说明算法成功估计出了目标个数, 估计出的目标个数相对真实个数略有延迟, 符合理论分析。图3(a)和图3(b)中除了目标个数发生变化的初始阶段外, 估计出的目标DOD和DOA与真实DOD和DOA重合, 说明算法能够成功定位目标, 并且在目标个数发生变化时, 能够迅速实现新增目标定位。图2和图3说明本文算法成功实现了静止目标个数及位置的联合跟踪。

实验2 运动目标个数与位置联合跟踪 假设 $K = 500$, 整个观测期间空中始终有3个运动点目标, 信噪比 $\text{SNR} = 10$ dB, $150 < K < 300$ 时, 空

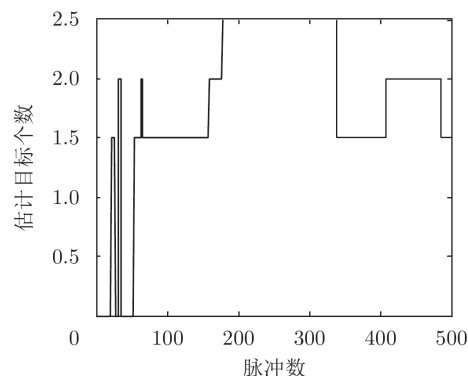


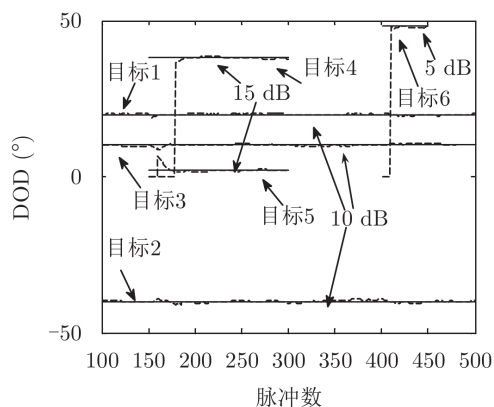
图2 静止目标个数跟踪结果

中出现两个新的运动目标, $\text{SNR} = 15$ dB, $400 < K < 450$ 时, 空中出现一个固定目标, $\text{SNR} = 5$ dB。 $M = N = 5$, $\beta = 0.95$ 。改进AAJD算法目标个数跟踪结果如图4所示, 角度跟踪结果如图5所示, 同样给出稳定状态后的仿真结果($K > 100$)。

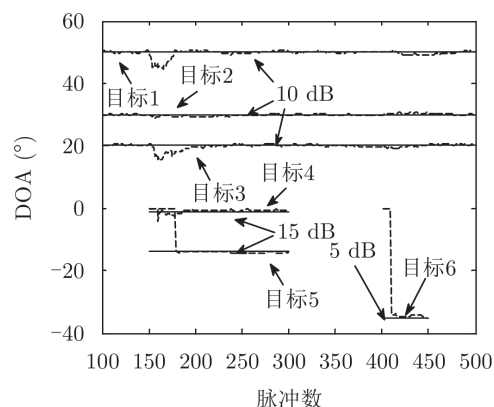
图4中本文算法估计出的目标个数与目标真实个数基本相同, 特别是当 $150 < K < 300$ 时, 空中出现了两个新目标, 本文算法能够快速跟踪到目标个数的变化, 实现目标个数的跟踪。

从图5(a), 图5(b)可以看出本文算法估计出的DOD与DOA与目标真实的DOD与DOA重合, 成功实现了目标角度的跟踪。特别是在目标个数发生变化时, 本文算法也能够快速跟踪到新目标的角度, 成功解决了目标个数变化时的角度跟踪问题。从图5(c)估计轨迹星座图中可以看出本文算法的估计运动轨迹与目标真实运动轨迹重合, 说明本文算法能够成功实现目标角度的跟踪。观察新出现目标的估计轨迹, 可以发现角度初始值到估计轨迹起始点近似成直线, 说明本文算法收敛速度较快, 能够快速跟踪到新出现目标的运动轨迹。

综合图4和图5, 可以看出当目标信噪比不同时, 本文算法估计出了正确的目标个数和角度, 说



(a) DOD估计结果



(b) DOA估计结果

图3 目标定位结果

明本文算法能够实现运动目标个数与角度的联合跟踪,并且算法收敛速度较快、跟踪精度较好。

实验3 本文算法的跟踪性能 给出改进AA-JD算法的跟踪误差性能,信噪比 $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$,遗忘因子 $\beta = 0.95$,其余条件和上一实验相同。蒙特卡洛次数为100,为了保证仿真结果有意义,只计算发射脉冲数为 $1 \leq K \leq 500$ 始终存在的3个目标跟踪误差,仿真结果如图6所示。

从图6可以看出本文算法的RMSE较低,在稳定状态时,特别是在目标个数发生变化时,性能基本保持不变,说明本文算法具有较好的稳定性。从

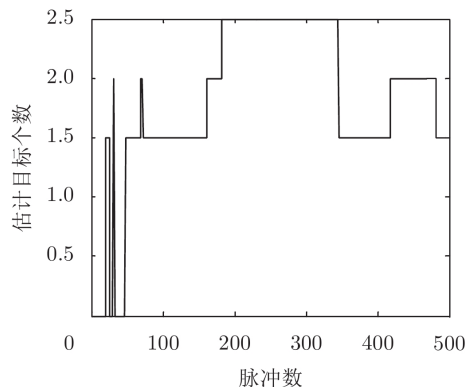


图4 运动目标个数跟踪结果

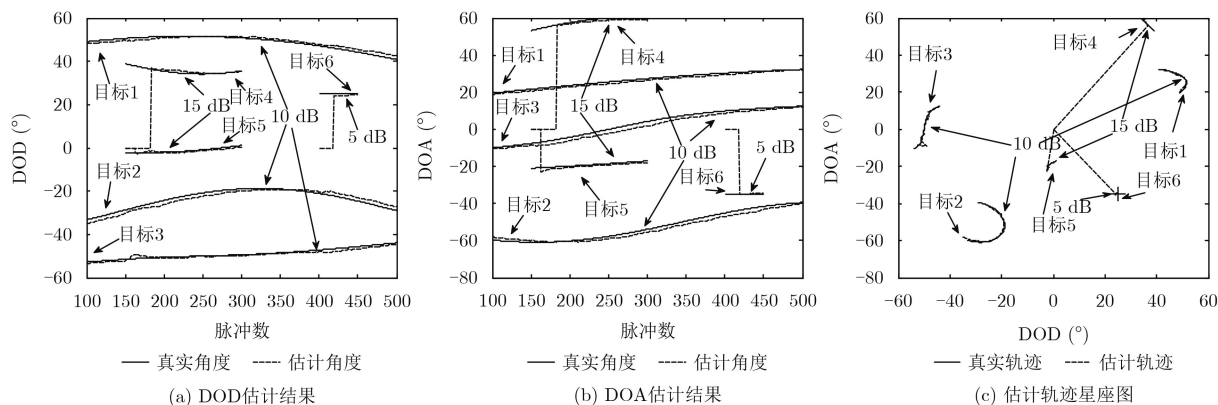


图5 目标跟踪结果

仿真结果可以看出目标的DOD和DOA在发射脉冲数50以后进入稳定状态,收敛速度较快,适用于运动目标实时跟踪。

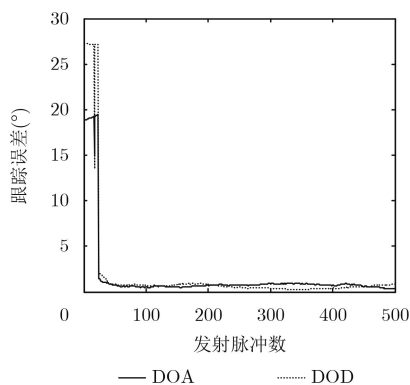


图6 算法的跟踪性能

6 结束语

针对目标个数未知时双基地MIMO雷达角度跟踪问题,本文提出基于改进AAJD的目标个数与角度联合跟踪算法。首先对AAJD算法进行改进,得到了特征值,用于估计目标个数。然后改进AIC准则,使其适合双基地MIMO雷达运动目标情况,完成目标个数的跟踪。在此基础上,增加稳定状态目

标个数防抖动运算,增强了算法的稳健性。最后改进ESPRIT算法实现了目标角度的自动配对与关联。仿真结果表明改进AAJD算法能够有效地实现目标个数与角度联合跟踪,收敛速度与稳健性较好。

参考文献

- [1] FISHER E, HAIMOVICH A, BLUM R S, *et al.* Spatial diversity in radar-models and detection performance[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823–838. doi: [10.1109/TSP.2005.862913](https://doi.org/10.1109/TSP.2005.862913).
- [2] 徐旭宇, 李小波, 梁浩, 等. 基于二次虚拟孔径扩展的双基地MIMO雷达相干分布式目标中心角度估计[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 953–959. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00955](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00955).
XU Xuyu, LI Xiaobo, LIANG Hao, *et al.* Central angle estimation of coherently distributed sources for bistatic MIMO radar on second virtual array aperture extension[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 953–959. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00955](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00955).
- [3] 樊劲宇, 顾红, 苏卫民, 等. 基于张量分解的互质阵MIMO雷达目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 933–938. doi: [10.11999/JEIT140826](https://doi.org/10.11999/JEIT140826).
FAN Jinyu, GU Hong, SU Weimin, *et al.* Co-prime MIMO radar multi-parameter estimation based on tensor decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information*

- Technology*, 2015, 37(4): 933–938. doi: [10.11999/JEIT140826](https://doi.org/10.11999/JEIT140826).
- [4] TANG Bo, TANG Jun, and PENG Yingning. MIMO radar waveform design in colored noise based on information theory[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(9): 4684–4697. doi: [10.1109/TSP.2010.2050885](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2050885).
- [5] 梁浩, 崔琛, 余剑. 基于ESPRIT算法的十字型阵列MIMO雷达降维DOA估计[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(1): 80–89. doi: [10.11999/JEIT150402](https://doi.org/10.11999/JEIT150402).
LIANG Hao, CUI Chen, and YU Jian. Reduced-dimensional DOA estimation based on ESPRIT algorithm in monostatic MIMO radar with cross array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 80–89. doi: [10.11999/JEIT150402](https://doi.org/10.11999/JEIT150402).
- [6] TANG Bo and TANG Jun. Joint design of transmit waveforms and receive filters for MIMO radar space time adaptive processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(18): 4707–4722. doi: [10.1109/TSP.2016.2569431](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2569431).
- [7] 刘晓莉, 廖桂生. 基于MUSIC和ESPRIT的双基地MIMO雷达角度估计算法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(9): 2179–2183. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.01459](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.01459).
LIU Xiaoli and LIAO Guisheng. Combined MUSIC with ESPRIT algorithm for angle estimation in bistatic MIMO radar system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2179–2183. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.01459](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.01459).
- [8] ZHENG Zhidong and ZHANG Jianyun. Fast method for multi-target localization in bistatic MIMO radar[J]. *IEEE Electronics Letters*, 2011, 47(2): 138–139. doi: [10.1049/el.2010.2577](https://doi.org/10.1049/el.2010.2577).
- [9] 梁浩, 崔琛, 余剑. 十字型阵列MIMO雷达高精度二维DOA估计[J]. *雷达学报*, 2016, 5(3): 254–264. doi: [10.12000/JR16016](https://doi.org/10.12000/JR16016).
LIANG Hao, CUI Chen, and YU Jian. Two-dimensional DOA estimation with high accuracy for MIMO radar using cross array[J]. *Journal of Radar*, 2016, 5(3): 254–264. doi: [10.12000/JR16016](https://doi.org/10.12000/JR16016).
- [10] WU Hailang, ZHANG Xiaofei, FENG Gaopeng, *et al.* DOA tracking in monostatic MIMO radar using PARAFAC-RLST algorithm[C]. The 3rd International Conference on Information Science and Engineering (ICISE'2011), Yangzhou, China, 2011: 958–961.
- [11] ZHANG Xiaofei, LI Jianfeng, FENG Gaopeng, *et al.* Kalman-PASTd based DOA tracking algorithm for monostatic MIMO radar[C]. International Conference on Information, Services and Management Engineering, Beijing, 2011: 220–224.
- [12] YU Huaxin, ZHANG Xiaofei, CHEN Xueqiang, *et al.* Computationally efficient DOA tracking algorithm in monostatic MIMO radar with automatic association[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014(12): 1–10. doi: [10.1155/2014/501478](https://doi.org/10.1155/2014/501478).
- [13] 李丽, 邱天爽. 双基地MIMO雷达目标参数估计及动态跟踪新算法[J]. *信号处理*, 2014, 30(2): 155–162.
LI Li and QIU Tianshang. A novel algorithm for target parameter estimation and dynamic tracking in bistatic MIMO radar system[J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, 30(2): 155–162.
- [14] 张正言, 李小波, 徐旭宇, 等. 双基地MIMO雷达角度快速跟踪算法[J]. *信号处理*, 2016, 32(6): 701–706. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2016.06.009](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2016.06.009).
ZHANG Zhengyan, LI Xiaobo, XU Xuyu, *et al.* Target angle rapid algorithm for bistatic MIMO radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2016, 32(6): 701–706. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2016.06.009](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2016.06.009).
- [15] WU Hailang and ZHANG Xiaofei. DOD and DOA tracking for bistatic MIMO radar using PASTd without additional angles pairing[C]. IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence, Nanjing, 2012: 1132–1136. doi: [10.1109/ICACI.2012.6463350](https://doi.org/10.1109/ICACI.2012.6463350).
- [16] ZHANG Weitao, LOU Shuntian, LI Xiaojun, *et al.* Tracking multiple target in MIMO radar Via adaptive asymmetric joint diagonalization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(11): 2880–2893. doi: [10.1109/TSP.2016.2535249](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2535249).
- [17] YANG J and KAVEH M. Adaptive eigensubspace algorithms for direction or frequency estimation and tracking[J]. *IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988, 36(2): 241–251. doi: [10.1109/29.1516](https://doi.org/10.1109/29.1516).
- [18] BANNOUR S and AZIMI-SADJADI M R. An adaptive approach for optimal data reduction using recursive least squares learning method[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, San Francisco, 1992: 297–300. doi: [10.1109/ICASSP.1992.226061](https://doi.org/10.1109/ICASSP.1992.226061).
- 张正言: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、MIMO雷达信号处理。
- 张剑云: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达及目标环境模拟、雷达信号处理、高速信号处理。
- 周青松: 男, 1983年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为阵列信号处理和雷达信号处理。