

基于航迹矢量检测的雷达与电子支援设施抗差关联算法

李保珠* 关 键 董云龙

(海军航空大学信息融合研究所 烟台 264001)

摘 要: 针对雷达与电子支援设施(ESM)存在系统误差、上报目标不完全一致等复杂场景下目标航迹关联问题, 该文基于高斯随机矢量统计特性, 提出一种基于航迹矢量检测的雷达与ESM航迹抗差关联算法。首先在修正极坐标系(MPC)下推导目标状态估计分解方程, 采用真实状态对消的方法得到航迹矢量, 为剔除大部分非同源目标航迹, 构建方位角变化率-距离变化率与距离比(ITG)统计量进行粗关联, 然后采用基于航迹矢量 χ^2 检验的方法实现雷达与ESM的航迹关联。最后通过实验仿真验证了该文算法在不同系统误差、目标密度、检测概率等环境下的有效性。

关键词: 航迹关联; 系统误差; 雷达; 电子支援设施; 航迹矢量; 修正极坐标系

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0123-07

DOI: 10.11999/JEIT180303

Anti-bias Track Association Algorithm of Radar and Electronic Support Measurements Based on Track Vectors Detection

LI Baozhu GUAN Jian DONG Yunlong

(Institute of Information Fusion, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: To address track-to-track association problem of radar and Electronic Support Measurements (ESM) in the presence of sensor biases and different targets reported by different sensors, an anti-bias track-to-track association algorithm based on track vectors detection is proposed according to the statistical characteristics of Gaussian random vectors. The state estimation decomposition equation is firstly derived in the Modified Polar Coordinates (MPC). The track vectors are obtained by the real state cancellation method. Second, In order to eliminate most non-homologous target tracks, the rough association is performed according to the features of the azimuthal rate and Inverse-Time-to-Go (ITG). Finally, the track-to-track association of radar and ESM is extracted based on track vectors chi-square distribution. The effectiveness of the proposed algorithm are verified by Monte Carlo simulation experiments in the presence of sensor biases, targets densities and detection probabilities.

Key words: Track-to-track association; Sensor bias; Radar; Electronic Support Measurements (ESM); Track vectors; Modified Polar Coordinates (MPC)

1 引言

在多传感器信息融合系统中, 航迹关联是信息

融合的一项关键技术^[1, 2], 旨在判断不同传感器上报的航迹是否源于同一目标。近年来, 由于军事平台搭载多种传感器进行战场态势监视, 异类传感器间的航迹关联显得尤为重要。作为机载平台中应用最广泛的传感器, 雷达与电子支援设施(ESM)航迹关联成为多源异类传感器信息融合的典型问题。雷达能够通过获取目标的距离测量和角度测量实现目标跟踪, 而ESM只能接收电磁波实现辐射源角度测量^[3], 测量维度的不同给雷达与ESM间的航迹关联带来很多困难。当传感器存在随机虚警、漏警、探测区域不完全相同时, 造成传感器上报目标不完全一致, 导致各传感器上报的航迹无法一一对应, 使得原本复杂的航迹关联问题难度增大^[4, 5]。此

收稿日期: 2018-03-30; 改回日期: 2018-07-24; 网络出版: 2018-08-06

*通信作者: 李保珠 libaozhu1324@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61401495, 61471382, 61501487, 61531020, U1633122), 山东省自然科学基金(2015ZRA06052), 航空科学基金(20150184003, 20162084005, 20162084006)和“泰山学者”建设工程专项经费资助

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401495, 61471382, 61501487, 61531020, U1633122), The Natural Science Foundation of Shandong Province (2015ZRA06052), The Aeronautical Science Foundation of China (20150184003, 20162084005, 20162084006), The Special Funds of Taishan Scholars Construction Engineering

外,由于传感器普遍存在系统误差,目标量测位置发生偏移,导致航迹关联问题更加困难。

大量文献研究了雷达与ESM航迹关联问题。文献[6]将其看作由角度量测组成的ESM量测集合与多个可能的雷达航迹关联问题,利用方位角信息构建航迹关联似然函数,采用最大似然分类准则进行航迹关联判决。随后,文献[7, 8]基于模糊综合分析理论和统计原理,将不等样本容量下的关联问题转化为目标状态相似性度量问题,提出了一种基于模糊综合分析理论的航迹关联算法。文献[9, 10]分别对雷达和ESM量测进行滤波处理后,利用直角坐标系下位置和速度构造关联统计量,但忽视了滤波过程中的发散问题^[11],传感器与目标之间需要有一定的机动。针对雷达与ESM位于同一平台的情况,文献[12]将目标状态估计在笛卡尔坐标系转化到修正极坐标系(MPC),利用统计学原理构建航迹关联统计量进行航迹关联,分析了各参数对关联性能的影响。文献[13]在此基础上增加了两个目标运动信息,采用最大似然估计的方法进行航迹关联。但实际情况下,系统误差普遍存在于雷达和ESM中,上述传统的雷达与ESM航迹关联方法并未给出系统误差条件下雷达与ESM航迹关联的有效方法。

为此,文献[14, 15]分别研究了系统误差对基于角度和基于位置统计量关联算法的影响,但尚未提出相应解决方法。文献[16]提出一种基于区间重合度的灰色关联算法,将时变系统误差下的不确定性转化为区间问题,通过区间的重合度来衡量雷达与ESM航迹关联程度。在文献[17]中,雷达状态估计被转换为MPC中的方位/方位变化率参数空间。通过计算目标曲线积分的重合比例,将检验统计量修正为卡方分布,实现抗差航迹关联。但统计上积分重度的估计精度有限,需要大量航迹样本。

针对以上分析的问题,本文提出了一种基于航迹矢量检测的雷达与ESM航迹抗差关联算法。首先在修正极坐标系下推导目标状态估计分解方程,基于真实状态对消得到目标间的航迹矢量,其次为剔除大部分非同源目标航迹,基于系统误差下方位角变化率与ITG的无偏性构建统计量进行粗关联,然后基于航迹矢量 χ^2 检验的方法实现雷达与ESM的航迹关联,最后通过实验仿真,验证本文算法在不同场景下雷达与ESM航迹关联性能。

2 问题描述

考虑位于同一平台的雷达与ESM,以平台中心为原点建立坐标系对若干目标进行探测,目标 T 分别为雷达和ESM探测到的第 i 个和第 j 个目标。

受到系统误差与随机误差的影响,雷达量测与目标的真实距离、方位角存在偏差。雷达对目标 T 的量测为

$$\begin{bmatrix} \rho_i^r \\ \theta_i^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\rho}_i^r \\ \bar{\theta}_i^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\rho^r \\ \Delta\theta^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\rho^r \\ v_\theta^r \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, ρ_i^r, θ_i^r 分别为目标 T 相对于雷达的量测距离和方位角, $\bar{\rho}_i^r, \bar{\theta}_i^r$ 分别为目标 T 的真实距离和方位角, $\Delta\rho^r, \Delta\theta^r$ 为雷达的测距系统误差和方位角系统误差, v_ρ^r, v_θ^r 分别为雷达的距离和方位角随机量测误差, 且 $v_\rho^r \sim N(0, \sigma_{r,\rho}^2)$, $v_\theta^r \sim N(0, \sigma_{r,\theta}^2)$ 。同理, 由于系统误差与随机误差的存在, ESM量测与目标的真实方位角存在偏差。ESM对目标 T 的量测为

$$\theta_j^e = \bar{\theta}_j^e + \Delta\theta^e + v_\theta^e \quad (2)$$

其中, $\theta_j^e, \bar{\theta}_j^e$ 分别为目标 T 相对于ESM的量测方位角和真实方位角, $\Delta\theta^e$ 为ESM的方位角系统误差, v_θ^e 为随机量测误差, 且 $v_\theta^e \sim N(0, \sigma_{e,\theta}^2)$ 。

由于ESM只能通过接收电磁波获得目标的角度信息, 为避免ESM在直角坐标系中的滤波发散问题, 一般采用修正极坐标系对目标进行跟踪^[18]。在修正极坐标系中通常将目标方位角变化率, ITG, 方位角作为ESM目标的状态估计。 $\hat{\mathbf{X}}_j^e(k) = [\hat{\theta}_j^e(k) \hat{\rho}_j^e(k)/\hat{\rho}_j^e(k) \hat{\theta}_j^e(k)]^T$ 表示 k 时刻ESM探测到的目标 T 的状态估计。作为主动式传感器, 雷达在直角坐标系下进行滤波, 实现目标跟踪。根据文献[11], 雷达目标 T 在直角坐标系下的状态估计转化到MPC中为 $\hat{\mathbf{X}}_i^r(k) = [\hat{\theta}_i^r(k) \hat{\rho}_i^r(k)/\hat{\rho}_i^r(k) \hat{\theta}_i^r(k)]^T$ 。

由于一个目标产生一条雷达航迹, 而一个目标可以搭载多个辐射源, 产生多条ESM航迹, 导致一条雷达航迹可以与多条ESM航迹关联, 而一条ESM航迹至多和一条雷达航迹关联。那么, 雷达航迹与ESM航迹的关联问题可以转化为如下假设:

H_0 : 雷达航迹 i 与ESM航迹 j 源于同一目标;

H_1 : 雷达航迹 i 与ESM航迹 j 源于不同目标。

传统的航迹关联中, 构造雷达航迹 i 与ESM航迹 j 关联统计量:

$$\tau = (\hat{\mathbf{X}}_i^r(k) - \hat{\mathbf{X}}_j^e(k))^T (\mathbf{P}_i^r(k) + \mathbf{P}_j^e(k))^{-1} \cdot (\hat{\mathbf{X}}_i^r(k) - \hat{\mathbf{X}}_j^e(k)) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{P}_i^r(k), \mathbf{P}_j^e(k)$ 分别为MPC下雷达与ESM状态估计的协方差矩阵。假设 H_0 成立时, 传统算法中的统计量 τ 服从自由度为3的 χ^2 分布。

然而, 在实际应用中, 由于系统误差的存在, 导致传感器对目标的量测偏离目标真实状态, 传统

算法中的统计量不再服从标准的中心卡方分布，算法性能严重降低。

3 算法描述

3.1 航迹矢量的推导

由于系统误差的存在，目标状态估计由目标真实状态、系统误差和随机噪声3部分组成。本文定义MPC下 k 时刻雷达目标的等价测量 $\tilde{\mathbf{X}}_i^r(k)$ ，表示只受系统误差影响的目标状态，则目标状态估计可表示为

$$\hat{\mathbf{X}}_i^r(k) = \tilde{\mathbf{X}}_i^r(k) + \mathbf{v}_i^r(k) \quad (4)$$

其中，量测误差 $\mathbf{v}_i^r(k)$ 服从零均值高斯分布，误差协方差为 $\mathbf{P}_i^r(k)$ ，

$$\tilde{\mathbf{X}}_i^r(k) = [\tilde{X}_i^{r,1}(k) \quad \tilde{X}_i^{r,2}(k) \quad \tilde{X}_i^{r,3}(k)]^T \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{X}_i^{r,1}(k) &= \dot{\theta}_i^r(k) + \Delta\dot{\theta}^r = \dot{\theta}_i^r(k) \\ \tilde{X}_i^{r,2}(k) &= \frac{\dot{\rho}_i^r(k) + \Delta\dot{\rho}^r}{\bar{\rho}_i^r(k) + \Delta\rho^r} = \frac{\dot{\rho}_i^r(k)}{\bar{\rho}_i^r(k) + \Delta\rho^r} \\ \tilde{X}_i^{r,3}(k) &= \bar{\theta}_i^r(k) + \Delta\theta^r \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

一般情况下，目标与雷达距离较远，雷达测距系统误差 $\Delta\rho^r$ 远小于目标的距离 $\bar{\rho}_i^r$ ($\Delta\rho^r \ll \bar{\rho}_i^r$)，则

$$\tilde{X}_i^{r,2}(k) \approx \frac{\dot{\rho}_i^r(k)}{\bar{\rho}_i^r(k)} \quad (7)$$

同理，MPC下ESM目标状态估计可表示为

$$\hat{\mathbf{X}}_j^e(k) = \tilde{\mathbf{X}}_j^e(k) + \mathbf{v}_j^e(k) \quad (8)$$

其中，量测误差 $\mathbf{v}_j^e(k)$ 服从零均值高斯分布，误差协方差为 $\mathbf{P}_j^e(k)$ ，

$$\tilde{\mathbf{X}}_j^e(k) = [\tilde{X}_j^{e,1}(k) \quad \tilde{X}_j^{e,2}(k) \quad \tilde{X}_j^{e,3}(k)]^T \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{X}_j^{e,1}(k) &= \dot{\theta}_j^e(k) + \Delta\dot{\theta}^e = \dot{\theta}_j^e(k) \\ \tilde{X}_j^{e,2}(k) &= \frac{\dot{\rho}_j^e(k)}{\bar{\rho}_j^e(k)} \\ \tilde{X}_j^{e,3}(k) &= \bar{\theta}_j^e(k) + \Delta\theta^e \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

若雷达航迹 i 与ESM航迹 j 源于同一目标， $\bar{\rho}_i^r(k) = \bar{\rho}_j^e(k)$ ， $\bar{\theta}_i^r(k) = \bar{\theta}_j^e(k)$ ，由式(4)~式(10)得，

$$E\{\hat{\mathbf{X}}_i^r(k) - \hat{\mathbf{X}}_j^e(k) | H_0\} = [0 \quad 0 \quad \Delta\theta^r - \Delta\theta^e]^T \quad (11)$$

由式(11)可知，雷达与ESM状态估计中的角度变化率与ITG几乎不受系统误差影响，两者仍是近似无偏的，而由于系统误差的存在，目标角度状态估计存在固定偏差。因此，在修正极坐标系中，

ESM目标状态估计可近似表示为

$$\hat{\mathbf{X}}_j^e(k) = \bar{\mathbf{X}}_j^e(k) + [0 \quad 0 \quad \Delta\theta^e]^T + \mathbf{v}_j^e(k) \quad (12)$$

其中， $\bar{\mathbf{X}}_j^e(k) = [\dot{\theta}_j^e(k) \quad \dot{\rho}_j^e(k)/\bar{\rho}_j^e(k) \quad \bar{\theta}_j^e(k)]^T$ 表示ESM目标的真实状态。修正极坐标系下雷达目标状态估计的近似表达式同理可得。假设雷达与ESM各状态变量时间同步，省略时间变量 k 。定义目标在修正极坐标系下的航迹矢量为

$$\Delta_{ij}^{re} = \hat{\mathbf{X}}_i^r - \hat{\mathbf{X}}_j^e = \bar{\mathbf{X}}_i^r - \bar{\mathbf{X}}_j^e + \mathbf{J}_{re}\boldsymbol{\eta} + (\mathbf{v}_i^r - \mathbf{v}_j^e) \quad (13)$$

其中， $\mathbf{J}_{re} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T$ ，系统误差矢量 $\boldsymbol{\eta} = [\Delta\theta^r \quad \Delta\theta^e]^T$ ， $(\mathbf{v}_i^r - \mathbf{v}_j^e) \sim N([0 \quad 0 \quad 0]^T, \mathbf{P}_i^r + \mathbf{P}_j^e - \mathbf{P}_{ij}^{re} - \mathbf{P}_{ij}^{er})$ ， $\mathbf{P}_{ij}$ 为估计误差互方差矩阵。

如果雷达上报的航迹 i 与ESM上报的航迹 j 源于同一目标，

$$\mathbf{X}_i^r = \mathbf{X}_j^e \quad (14)$$

$$\Delta_{ij}^{re} = \mathbf{J}_{re}\boldsymbol{\eta} + (\mathbf{v}_i^r - \mathbf{v}_j^e) \quad (15)$$

由式(13)、式(15)可知，当上报航迹源于不同目标时，航迹矢量与目标真实状态之差、系统误差矢量 $\boldsymbol{\eta}$ 和随机误差之差线性相关；当上报航迹源于同一目标时，航迹矢量由系统误差矢量 $\boldsymbol{\eta}$ 和随机噪声构成。由于不同目标间真实状态差别较大，所以源于同一目标的航迹矢量受随机误差的影响，在常数矢量 $\mathbf{J}_{re}\boldsymbol{\eta}$ 附近浮动，而非同源航迹矢量偏差较大。

3.2 基于方位角变化率与ITG统计量的粗关联

由于系统误差对雷达与ESM目标状态估计中的方位角变化率与ITG是近似无偏的，所以可以利用目标角度变化率与ITG构建关联统计量进行粗关联。将3维式(13)拆分出角度变化率与ITG项，构成2维等式：

$$\mathbf{Y} = \Delta_{ij}^{re}([1, 2]) = (\bar{\mathbf{X}}_i^r - \bar{\mathbf{X}}_j^e + \mathbf{v}_i^r - \mathbf{v}_j^e)([1, 2]) \quad (16)$$

$\mathbf{Y}$ 为3维航迹矢量 Δ_{ij}^{re} 前两个元素构成的2维矢量， $([1, 2])$ 表示列向量取前两个元素构成的2维矢量。令 $\mathbf{P}_{ij}^{\rho\theta} = (\mathbf{P}_i^r + \mathbf{P}_j^e - \mathbf{P}_{ij}^r - \mathbf{P}_{ji}^e)([1, 2], [1, 2])$ ，则构建粗关联统计量：

$$\alpha_{ij} = \mathbf{Y}^T (\mathbf{P}_{ij}^{\rho\theta})^{-1} \mathbf{Y} \quad (17)$$

若雷达上报的航迹 i 与ESM上报的航迹 j 源于同一目标，则 α_{ij} 服从自由度为2的 χ^2 分布，即 $\alpha_{ij} \sim \chi^2(2)$ 。给定漏关联概率 λ ，则粗关联的判决门限为 $\chi_{\lambda}^2(2)$ ，其中 $\chi_{\lambda}^2(2)$ 是自由度为2，水平为 λ 的卡方分布上侧分位数。通过粗关联，可以剔除大部分非同源航迹，为下一步细关联降低运算量。

3.3 基于航迹矢量检测的细关联

基于方位角变化率与ITG统计量的关联方法能够判决大部分源于同一目标的航迹,排除大部分非同源的航迹。当监视环境中存在平行直线运动且速度相似的不同目标时,特别是在目标密集环境中,方位角度差近似于常数,基于方位角变化率与ITG统计量的粗关联难以判断航迹是否源于同一目标。因此需要在满足粗关联的航迹集合中进一步通过细关联进行判别。

根据式(15)可得

$$\Delta_{i_1 j_1}^{re} - \Delta_{i_2 j_2}^{re} = (\mathbf{v}_{i_1}^r - \mathbf{v}_{j_1}^e) - (\mathbf{v}_{i_2}^r - \mathbf{v}_{j_2}^e) \quad (18)$$

其中, i_1, i_2 为雷达上报的满足粗关联的航迹, j_1, j_2 为ESM上报的满足粗关联的航迹。 $(\Delta_{i_1 j_1}^{re} - \Delta_{i_2 j_2}^{re})$ 的协方差矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{i_1 j_1 i_2 j_2}^{re} = & (\mathbf{P}_{i_1}^r + \mathbf{P}_{j_1}^e - \mathbf{P}_{i_1 j_1}^r - \mathbf{P}_{j_1 i_1}^e) \\ & + (\mathbf{P}_{i_2}^r + \mathbf{P}_{j_2}^e - \mathbf{P}_{i_2 j_2}^r - \mathbf{P}_{j_2 i_2}^e) \end{aligned} \quad (19)$$

若上报航迹 i_1 与 j_1 源于同一目标,且上报航迹 i_2 与 j_2 源于同一目标,则满足

$$(\Delta_{i_1 j_1}^{re} - \Delta_{i_2 j_2}^{re})^T [\mathbf{P}_{i_1 j_1 i_2 j_2}^{re}]^{-1} (\Delta_{i_1 j_1}^{re} - \Delta_{i_2 j_2}^{re}) \leq \chi^2(3) \quad (20)$$

综上所述,基于航迹矢量的雷达与ESM航迹抗差关联算法流程如图1所示。

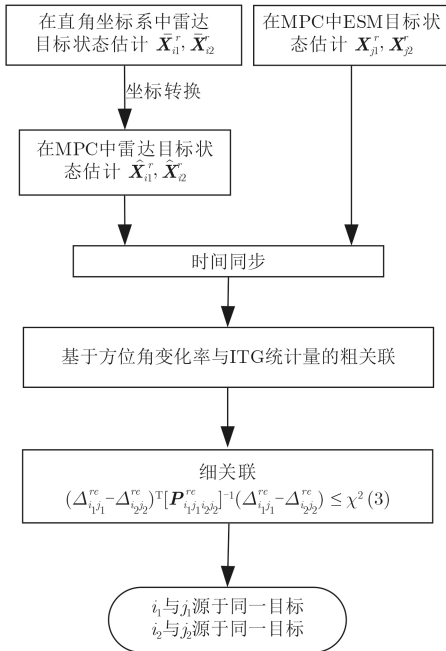


图1 算法流程图

4 实验结果与分析

4.1 仿真环境

为验证在系统误差、上报目标不完全一致等复杂场景下算法的有效性,对本文算法与文献[10]、

文献[17]中的经典算法进行对比。仿真环境设置如下:在全局直角坐标系下,雷达与ESM传感器位于同一运动平台,平台在X轴方向做匀速直线运动,初始位置坐标为(0,0),初始速度为100 m/s。有 $N = 20$ 批目标在区域 $[150 \text{ km}, 170 \text{ km}] \times [150 \text{ km}, 170 \text{ km}]$ 中均匀分布,目标初始速度服从均匀分布且匀速运动, $v_o \sim U(100 \text{ m/s}, 200 \text{ m/s})$, 目标的初始航向均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 范围内。雷达在直角坐标系下进行卡尔曼滤波跟踪目标,ESM在修正极坐标下进行目标跟踪。雷达的测距量测误差标准差为 $\sigma_{\rho}^r = 100 \text{ m}$ 。雷达与ESM传感器的方位角量测误差标准差分别为 $\sigma_{\theta}^r = 0.3^\circ$, $\sigma_{\theta}^e = 0.5^\circ$ 。雷达测距系统误差为 $\Delta \rho^r = 1000 \text{ m}$ 。雷达与ESM传感器的方位角系统误差分别为 $\Delta \theta^r = -1.0^\circ$, $\Delta \theta^e = 1.2^\circ$ 。两传感器的采样周期为 $T = 2 \text{ s}$, 目标跟踪周期数为 $K = 300$, 传感器的探测概率分别为 $P_1 = 0.9$, $P_2 = 0.7$, 允许的漏关联概率为0.05。目标与平台的运动轨迹如图2所示。

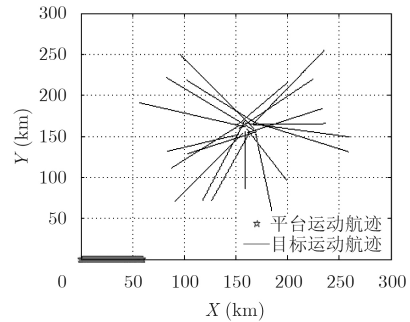


图2 仿真环境设置

为描述算法的关联性能,本文采用平均正确关联率作为评价指标[19]:

$$P_c = \frac{1}{MK} \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^K \frac{N_c^i(t)}{N'(t)} \quad (21)$$

其中, N' 为雷达与ESM上报的同源航迹目标数, N_c^i 为第 i 次蒙特卡洛仿真实验中正确关联的目标个数, K 为传感器跟踪目标的步数, M 为蒙特卡洛仿真次数,本文实验仿真中蒙特卡洛次数为100次。

4.2 仿真结果分析

图3为系统误差条件下雷达与ESM跟踪的某个共同探测目标的状态估计。可以看出,在修正极坐标系下雷达与ESM均能够稳定跟踪。存在系统误差时,雷达与ESM状态估计中的角度变化率与ITG快速收敛于目标真实状态值,角度变化率与ITG是近似无偏的。同时,可以看出雷达的测距系统误差对ITG几乎无影响,说明式(7)中忽略雷达

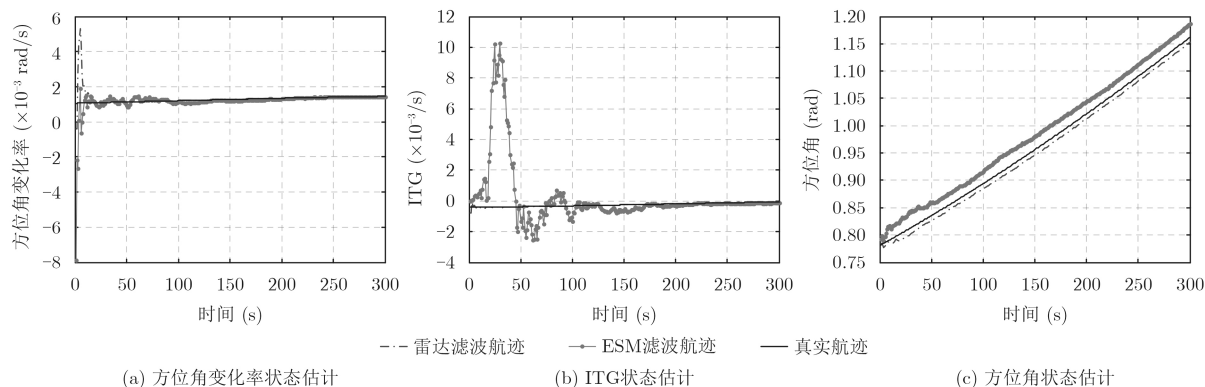


图3 系统误差下雷达与ESM滤波航迹

的测距系统误差对目标状态估计影响不大；因为雷达与ESM方位角系统误差的存在，方位角状态估计与目标的真实状态存在相对固定的偏差。因此，在传感器系统误差条件下，传统基于统计量的方法不再适用。

图4为不同雷达测距系统误差下所提算法的性能对比图。在仿真过程中只改变雷达的测距系统误差，其他参数不变，测距系统误差在 $\Delta\rho^r$ 在0.1~1 km等间隔分布。由图5可知，随着雷达的测距系统误差的不断增大，3种关联算法性能相对稳定，本文所提算法的性能最优，平均正确关联率均在85%以上。由此可以看出在一定范围内，雷达的测距系统误差对航迹关联性能影响不大，目标的状态估计的近似处理是合理有效的。

图5为不同ESM方位角系统误差下所提算法的

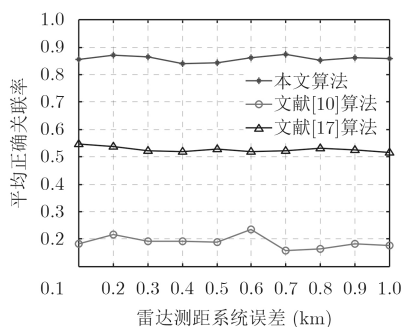


图4 不同雷达测距系统误差平均正确关联率

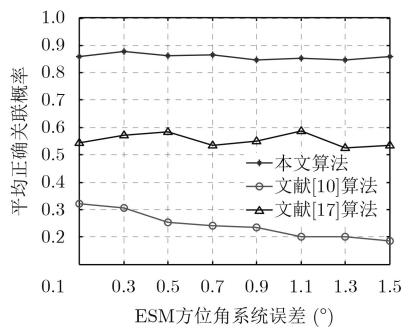


图5 不同ESM方位角系统误差平均正确关联率

性能对比图。在仿真过程中只改变ESM的方位角系统误差，其他参数不变，ESM的方位角系统误差 $\Delta\theta^e$ 在 0.1° ~ 1.5° 等间隔分布。可以看出随着方位角系统误差的不断增大，文献[10]算法的正确关联率明显下降，所提算法与文献[17]中的经典算法性能相对稳定。所提算法的平均正确关联率保持在80%以上，明显优于经典的传统算法。

通过图4、图5可知，随着系统误差的增大，所提算法性能相对稳定，平均正确关联率明显优于传统算法。这是因为文献[10]算法采用伪线性滤波后的状态估计属于有偏估计，在系统误差下关联统计量不再适用。文献[17]虽然考虑了系统误差的影响，但目标数量不一致时角度-角度变化率曲线无法完全重合，测角系统误差偏差估计精度不高，关联性能不够理想。本文算法采用航迹矢量 χ^2 检验判断航迹关联关系，根据高斯随机矢量特性计算关联门限，能够抵消系统误差对航迹关联的影响，因此能保持较好的关联性能。

图6为不同ESM探测概率下所提算法的性能对比图。在仿真过程中只改变ESM的探测概率，其他参数不变，ESM探测概率 P_2 在0.55~1.00等间隔变化。由图6可知，随着ESM探测概率的不断增大，雷达与ESM上报的同源航迹不断增多，作为干扰的非同源航迹相对较少，降低了对航迹关联的影响，文献[10]算法平均正确关联率明显提高。文

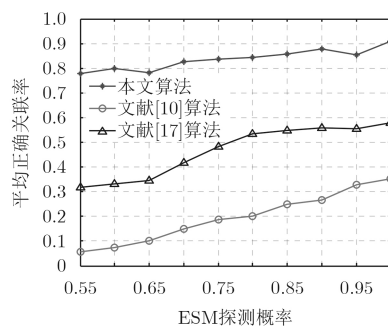


图6 不同探测概率下平均正确关联率

献[17]算法随着探测概率的不断增大, 角度-角度变化率曲线重合度越高, 测角系统误差偏差估计越精确, 算法平均正确关联率提高。本文采用航迹矢量 χ^2 检验判断航迹关联关系, 根据高斯随机矢量特性计算关联门限, 不受非同源航迹比例的影响, 在低探测概率下仍能保持较高的正确关联率, 具有较强的稳健性。当传感器探测概率较高时, 本文算法的平均正确关联率能达到85%以上。

图7为不同目标分布密度下所提算法的性能对比图。在仿真过程中目标分布区域大小不变, 目标数量在15~50之间等间隔分布, 其他参数不变。可以看出, 随着目标数量的增加, 目标的密度逐渐增大, 非同源航迹数量增加, 对航迹关联过程造成干扰, 文献[10]、文献[17]中的算法的平均正确关联率明显下降, 而本文采用航迹矢量 χ^2 检验判断航迹关联关系, 根据高斯随机矢量特性计算关联门限, 对非同源航迹具有较好的分辨能力, 算法平均正确关联率保持在80%以上, 明显优于对比算法, 且算法性能几乎不受目标密集程度的影响, 具有较强的稳健性。

图8为不同ESM方位角随机误差下所提算法的性能对比图。在仿真过程中只改变ESM方位角随机误差, 其他参数不变, ESM的方位角随机误差在 $0.2^\circ \sim 2.0^\circ$ 等间隔分布。可以看出随着方位角随机误差的增大, 在一定程度上抵消系统误差造成的航迹偏差, 文献[10]、文献[17]中的算法性能有明显的提升。本文算法航迹矢量 χ^2 检验的方法, 受方位角

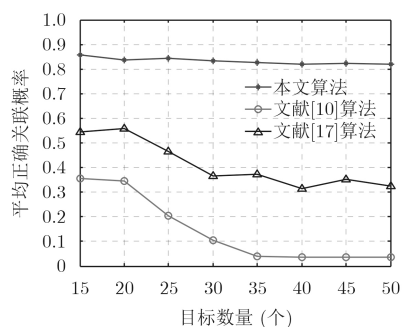


图7 不同目标分布密度平均正确关联率

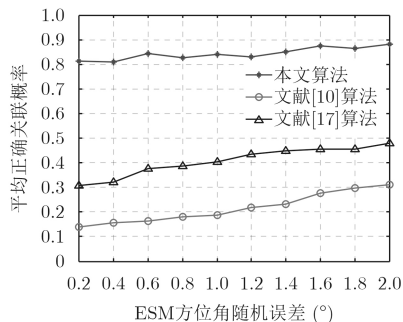


图8 不同ESM方位角随机误差下平均正确关联率

随机误差影响较小, 平均正确关联率保持在80%以上, 算法性能明显优于传统算法。

5 结束语

为了提高雷达与ESM航迹关联在传感器系统误差、上报目标不一致情况下的关联率和稳定性, 本文基于高斯随机矢量统计特性, 提出一种基于航迹矢量检测的雷达与ESM航迹抗差关联算法。本文首先在修正极坐标系(MPC)下推导目标状态估计分解方程, 采用真实状态对消的方法得到航迹矢量, 利用系统误差对方位角变化率-ITG的无偏性构建统计量进行粗关联, 然后采用航迹矢量 χ^2 检验的方法实现雷达与ESM的航迹关联。最后通过实验仿真证明了在不同系统误差、目标密度、检测概率等环境下, 本文算法具有较高的正确关联率和较强的稳健性。

参考文献

- [1] ZHU Hao, WANG Mingliang, Yuen K V, *et al.* Track-to-track association by coherent point drift[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(5): 643–647. doi: [10.1109/LSP.2017.2682857](https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2682857).
- [2] 彭彬彬, 关欣. 基于空间分布信息的雷达与ESM航迹灰色关联算法[J]. *电光与控制*, 2017, 24(6): 34–38. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2017.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2017.06.007).
- [3] PENG Binbin and GUAN Xin. Gray track correlation algorithm of radar and ESM based on spatial distribution information[J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(6): 34–38. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2017.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2017.06.007).
- [4] PENG Binbin and GUAN Xin. A new track association algorithm of radar and ESM[C]. *CIE International Conference on Radar*, Guangzhou, China, 2016: 1–5. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059337](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059337).
- [5] QI Lin, DONG Kai, LIU Yu, *et al.* Anti-bias track-to-track association algorithm based on distance detection[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(2): 269–276. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0139](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0139).
- [6] 李保珠, 董云龙, 李秀友, 等. 基于t分布混合模型的抗差关联算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(7): 1774–1778. doi: [10.11999/JEIT161084](https://doi.org/10.11999/JEIT161084).
- [7] LI Baozhu, DONG Yunlong, LI Xiyou, *et al.* Anti-bias track association algorithm based on t-distribution mixture model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1774–1778. doi: [10.11999/JEIT161084](https://doi.org/10.11999/JEIT161084).
- [8] TRUNK G V and WILSON J. Association of DF bearing measurements with radar tracks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1987, 23(4): 438–447. doi: [10.1109/TAES.1987.310877](https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310877).
- [9] WANG Guohong, HE You, GAO Zhiyong, *et al.* Improved

- association of ESM measurements with radar tracks[C]. IET Radar Systems Conference, Edinburgh, UK, 1997: 648–652. doi: [10.1049/cp:19971755](https://doi.org/10.1049/cp:19971755).
- [8] WANG Guohong, MAO Shiyi, HE You, *et al.* Triple-threshold radar-to-ESM correlation algorithm when each radar track is specified by different number of measurements[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(4): 177–181. doi: [10.1049/ip-rsn:20000094](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20000094).
- [9] CHEN Huimin and BAR-SHALOM Y. Track association and fusion with heterogeneous local trackers[C]. IEEE Conference on Decision & Control, New Orleans, USA, 2007: 2675–2680. doi: [10.1109/CDC.2007.4434638](https://doi.org/10.1109/CDC.2007.4434638).
- [10] WANG Guohong, ZHANG Xiangyu, and TAN Shuncheng. Effect of biased estimation on radar-to-ESM track association[J]. *Journey of System Engineering and Electronic Techniques*, 2012, 23(2): 188–194. doi: [10.1109/JSEE.2012.00024](https://doi.org/10.1109/JSEE.2012.00024).
- [11] SCALA B F L and FARINA A. Choosing a track association method[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(2): 119–122. doi: [10.1016/S1566-2535\(02\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S1566-2535(02)00050-7).
- [12] BENAMEUR K. Radar ESM track to track association[R]. Ottawa: Defence Research Establishment Ottawa, 2001.
- [13] ZHOU Yifeng, LI Winston, and LEUNG H. Maximum likelihood based ESM/radar track association algorithm in a new modified polar coordinate[R]. Ottawa: Defence Research and Development Canada, 2004.
- [14] 张翔宇, 王国宏, 王娜, 等. 系统误差下异地配置的雷达和电子支援测量航迹关联[J]. *电光与控制*, 2012, 19(3): 30–34.
- ZHANG Xiangyu, WANG Guohong, WANG Na, *et al.* Track association of radar and ESM with systematic at different sites[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(3): 30–34.
- [15] OFFER C R. Performance of bearing-only ESM-radar tracking association[C]. IET Data Fusion & Target Tracking Conference, London, UK, 2012: 1–6. doi: [10.1049/cp.2012.0409](https://doi.org/10.1049/cp.2012.0409).
- [16] 关欣, 彭彬彬, 衣晓. 基于区间重合度的雷达与ESM航迹关联算法[J]. *雷达科学与技术*, 2017, 15(1): 61–67. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.011).
- GUAN Xin, PENG Binbin, and YI Xiao. Track association algorithm of radar and ESM based on the interval overlap ratio[J]. *Radar Science and Technology*, 2017, 15(1): 61–67. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.011).
- [17] 关欣, 彭彬彬, 衣晓. 修正极坐标系下雷达与ESM航迹对准关联[J]. *航空学报*, 2017, 38(5): 221–232. doi: [10.7527/S1000-6893.2016.0287](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2016.0287).
- GUAN Xin, PENG Binbin, and YI Xiao. Track alignment-association of radar and ESM in MPC[J]. *Acta Aeronautics et Astronautics Sinica*, 2017, 38(5): 221–232. doi: [10.7527/S1000-6893.2016.0287](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2016.0287).
- [18] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 220–223.
- HE You, XIU Jianjuan, ZHANG Jingwei, *et al.* Radar Data Processing with Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 220–223.
- [19] ZHU Hongyan, WANG Wei, and WANG Chen. Robust track-to-track association in the presence of sensor biases and missed detections[J]. *Information Fusion*, 2016, 27: 33–40. doi: [10.1016/j.inffus.2015.05.002](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2015.05.002).
- 李保珠: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为雷达数据处理、航迹关联和误差配准等.
- 关 键: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达目标检测与跟踪与识别、海上目标信息感知与融合.
- 董云龙: 男, 1974年生, 博士, 副教授, 研究方向为雷达目标组网检测等.