

改进模糊综合评价的 ESM 与雷达航迹关联算法

张肖强, 王 星, 周东青, 杜文红, 于 媛

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 针对机动目标贴近和交叉运动影响下的 ESM 与雷达的航迹关联问题, 提出了基于改进的模糊综合评价的航迹关联算法。该算法综合考虑了 ESM 传感器和雷达在双机协同无源定位中获得的距离、角度、速度、相位差和时间差信息, 丰富了模糊因素集; 给出了模糊综合评价中的隶属度和权重的动态计算方法, 并对评价集和评价准则进行了相应的改进。仿真结果表明, 在目标距离 200 m 时, 传统的多因素模糊综合决策航迹关联算法的关联正确率为 55.2%, 航迹关联算法的关联正确率为 74.0%。在增大目标距离和雷达探测误差的情况下, 算法的关联正确率始终高于传统的多因素模糊综合决策航迹关联算法。

关键词 模糊综合评价; 航迹关联; 模糊因素; 动态隶属度; 雷达

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.01.008

中图分类号 TP274 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)01-0044-06

An ESM-Radar Track Correlation Algorithm Based on Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation

ZHANG Xiaoqiang, WANG Xing, ZHOU Dongqing, DU Wenhong, YU Yuan

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to solve ESM-radar track correlation problem under condition of the influence on the maneuvering target close and cross, this paper presents a track correlation algorithm based on the improved Fuzzy comprehensive evaluation. In consideration of distance, angle, speed, phase difference and time difference information of the ESM sensor and radar in the cooperative passive location, the algorithm enriches the fuzzy factor set, gives out a dynamic calculation method of membership degree and weight in fuzzy comprehensive evaluation, and correspondingly improves the evaluation set and the evaluation criterion. The simulation results show that when the target is at the distance of 200m, the traditional multi-factor fuzzy integration judgment algorithm's correlation accuracy is 55.2%, and this paper's algorithm's correlation accuracy is 74.0%. Under condition of increasing the target distance and the radar detection error, this algorithm's correlation accuracy is always higher than that of the traditional multi-factor fuzzy integration judgment algorithm.

Key words: fuzzy comprehensive evaluation; track association; fuzzy factors; dynamic membership degree; radar

收稿日期: 2016-07-03

基金项目: 航空科学基金(20152096019; 20145596025)

作者简介: 张肖强(1992-), 男, 山东威海人, 硕士生, 主要从事电子对抗理论与技术研究. E-mail: 13325388538@163.com

引用格式: 张肖强, 王星, 周东青, 等. 改进模糊综合评价的 ESM 与雷达航迹关联算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(1): 44-49. ZHANG Xiaoqiang, WANG Xing, ZHOU Dongqing, et al. An ESM-Radar Track Correlation Algorithm Based on Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(1): 44-49.

未来信息化战争中,武器装备复合化已成为趋势,其中,有源/无源复合化探测可极大改善探测定位精度,并防止敌方干扰^[1]。探测信息经信息融合用于对目标的综合分析,而航迹关联是信息融合的前提与基础,在进行航迹关联后,才能进行目标的运动状态信息和属性信息的融合^[2]。因此,航迹关联成为一个关键的问题。雷达与 ESM 是重要的机载传感器,作战时会将二者结合使用,对二者的探测信息进行融合。在信息融合时,ESM 与雷达的航迹关联是必不可少的环节。

目前,用于进行航迹关联的算法主要分为两大类^[3-4]:一类是基于统计方法的航迹关联,一类是基于模糊数学方法的航迹关联。基于统计关联的方法有加权航迹关联算法^[5]、统计双门限算法^[6]、最近邻算法^[7-8]等;基于模糊数学的方法有模糊双门限法^[9]、模糊综合函数法^[10]、多因素模糊综合决策法^[11]等。统计关联方法在系统的导航、传感器对准中存在转换和延迟误差,在航迹关联判决中有着很大的不确定性,容易关联错误,而基于模糊数学的航迹关联方法对不确定性问题具有强大的处理能力,适用于存在较大误差的系统^[12]^[151-165]。文献^[11]中的多因素模糊综合决策法是模糊综合评价在航迹关联上的应用,它通过计算各因素的整体隶属度判断航迹的关联情况。但在机动目标进行贴近和交叉飞行时各因素的测量值误差较大,会影响到整体隶属度的计算从而产生关联错误。

为解决这些问题,本文在模糊综合评价方法的基础上对其进行改进,改进主要有 3 个方面:一是模糊因素的扩展与补充,综合考虑了雷达和 ESM 传感器探测的角度、速度、相位差等共同信息,并利用时差-测向法定位时获得的时间差信息,增加了模糊因素集中的因素个数;二是动态思想的引入,充分利用每一采样时刻的探测信息,提出动态隶属度和动态权重的计算方法,减少了目标进行机动时对隶属度和权重的影响,相应的对综合评判准则进行了改进;三是评价集的改变,本文用“雷达航迹”作为评价集中的评价级别,使模糊综合评价由原先的适用于一对一评价转换为适用于一对多评价。

1 雷达和 ESM 的时间对准

ESM 和雷达在时间上的不同步,观测数据存在着时间差,在进行航迹关联前,必须要将观测数据进行时间对准。由于雷达的探测精度要高于 ESM 的探测精度,本文采用插值法^[13],将雷达的测量数据对准统一到 ESM 的采样时刻。

ESM 的数据率一般要高于雷达的数据率,因此,设在雷达的 1 个测量周期 $[t_k, t_{k+1}]$ 内,ESM 有 n 个测量值, $k+i$ 时刻 ESM 的距离、速度、角度、相位差、时间差的测量值为 $\mathbf{Z}_x(k+i)=[r_x(k+i), v_x(k+i), \theta_x(k+i), \varphi_x(k+i), \Delta t_x(k+i)]^T$,其中, $i=1,2,\dots,n$ 。 k 时刻雷达的距离、速度、角度、相位差、时间差的测量值为 $\mathbf{Z}_y(k)=[r_y(k), v_y(k), \theta_y(k), \varphi_y(k), \Delta t_y(k)]^T$ 。根据插值法,雷达和 ESM 时间对准公式为:

$$\hat{\mathbf{Z}}_y(t_g) = \mathbf{Z}_y(t_1) + \frac{\mathbf{Z}_y(t_2) - \mathbf{Z}_y(t_1)}{t_2 - t_1} (t_g - t_1) \quad (1)$$

各观测值方差的时间对准公式为:

$$\hat{\sigma}_y^2 = \sigma_y^2 \left[1 + 2 \left(\frac{\Delta t_i}{t_2 - t_1} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: t_g 是 ESM 的观测时间; t_1, t_2 是雷达相邻的 2 个观测时间,并存在 $t_1 \leq t_g \leq t_2$,则雷达对应时刻方差为 $\sigma_y^2 = [\sigma_{r_y}^2, \sigma_{v_y}^2, \sigma_{\theta_y}^2, \sigma_{\varphi_y}^2, \sigma_{\Delta t_y}^2]^T$,雷达在对准时刻 t_g 的对准测量值为 $\hat{\mathbf{Z}}_y(t_g) = [\hat{r}_y(t_g), \hat{v}_y(t_g), \hat{\theta}_y(t_g), \hat{\varphi}_y(t_g), \hat{\Delta t}_y(t_g)]$ 。

2 模糊综合评价航迹关联算法

模糊综合评价是综合考虑与被评价事物相关的模糊因素,对其进行整体性的评价,从而得出最佳决策的过程^[14-16]。

2.1 多因素模糊综合决策航迹关联算法

多因素模糊综合决策航迹关联算法按照模糊综合评价的流程计算 2 条航迹的关联程度,算法步骤如下^[12]:

- 1) 选取模糊因素,建立模糊因素集 $\mathbf{X}, \mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, n 为因素个数;
- 2) 将两条航迹的关联结果分为 m 个级别,这些评价级别的集合称为评价集 $\mathbf{V}, \mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$;
- 3) 建立评价矩阵 $\mathbf{R}, \mathbf{R} = (r_{kl})_{n \times m}$,其中 r_{kl} 表示 2 条航迹的第 k 个因素,对第 l 种评价级别的可能程度;
- 4) 计算各因素权重,建立因素权重模糊集 \mathbf{A} ;
- 5) 对因素权重模糊集 \mathbf{A} 和评价矩阵 \mathbf{R} 进行合成运算,得到模糊综合评价集 \mathbf{B} ,即:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (3)$$

式中: $b_l, l=1,2,\dots,m$ 表示 2 条航迹对于第 l 种评价级别的隶属度。

- 6) 综合评价:按照最大隶属度原则,模糊综合评价集 \mathbf{B} 中最大的 b_l 所对应的评价级别即为两条航迹的关联结果。

2.2 改进的模糊综合评价航迹关联算法

本文航迹关联算法是对模糊综合评价算法的改

进,综合考虑了雷达和ESM传感器在双机协同无源定位中获得的距离、角度、速度、相位差和时间差信息,丰富了模糊因素集;通过引入动态思想,减少目标机动对隶属度计算的影响,随之对综合评判准则进行相应的调整与改进;为使模糊综合评价由原先的一对一评价适用于一对多评价,评价集中用“雷达航迹”作为评价级别。雷达与ESM已经进行时间对准后,模糊综合评判的具体过程如下:

2.2.1 建立因素集

ESM传感器与雷达在双机协同无源定位中获得的共同探测信息为:角度、速度、相位差、时间差,雷达可以探测目标的距离信息,ESM采用时差-测向法可以解算得到目标的距离信息,因此,本文采用这些信息作为模糊因素进行评价,大大丰富了模糊因素集。设因素集为 $\mathbf{X}=\{x_1=\text{距离},x_2=\text{速度},x_3=\text{角度},x_4=\text{相位差},x_5=\text{时间差}\}$ 。

2.2.2 建立评价集

本文解决的是一条ESM航迹与多条雷达航迹进行关联的问题,因此对评价集进行了调整与改进,将“雷达航迹”作为评价级别,设评价集 $\mathbf{V}=\{v_1=\text{雷达航迹1},v_2=\text{雷达航迹2},\dots,v_n=\text{雷达航迹n}\}$ 。

2.2.3 单因素评价

对因素集中各因素进行评价,求出各因素对于评价 $v_j(j=1,2,\dots,n)$ 的隶属度 r_{ij} 。本文采用了动态隶属度,对每一采样时刻进行隶属度计算。设ESM航迹的各因素对于每条雷达航迹对应因素的隶属度为 $\mathbf{r}_i(k),\mathbf{r}_i(k)=\{r_{i1}(k),r_{i2}(k),\dots,r_{im}(k)\}$,动态隶属度 $r_{ij}(k)$ 的计算方法如下:

$$r_{ij}(k) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\left[\frac{1}{|x_{i0}(k) - x_{ij}(k)|} \right]^2}} \quad (4)$$

2.2.4 构造综合评价矩阵

计算出隶属度 $\mathbf{r}_i(k)$ 后,建立 k 时刻的综合评价矩阵为:

$$\mathbf{R}(k) = [r_{ij}(k)]_{m \times l} \quad (5)$$

式中: m 为模糊因素, l 为评价级别。

构造 k 时刻的综合评价矩阵为:

$$\mathbf{R}(k) = [r_{ij}(k)]_{m \times l} = \begin{bmatrix} r_{11}(k) & r_{12}(k) & \cdots & r_{1l}(k) \\ r_{21}(k) & r_{22}(k) & \cdots & r_{2l}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{s1}(k) & r_{s2}(k) & \cdots & r_{sl}(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.5 确定因素权重模糊集

因素权重模糊集: $\mathbf{A}=\{a_1,a_2,\dots,a_i,\dots,a_m\}$, a_i 为因素集中第 i 个因素在所有因素中的权重。本文采用

的模糊因素为距离、角度、速度、相位差和时间差,根据文献[12],多个目标间的距离信息是最重要的,其次是速度信息,第3位是角度信息,最后是时间差信息和相位差信息,用层次分析法设置其初始权重:

1)构造判断矩阵。根据因素集中采用的模糊因素,对各因素进行两两比较判断,确定其相对重要性程度^[14],结果见表1。

表1 判断矩阵

Tab.1 The judgement matrix

因素	距离	速度	角度	时间差	相位差
距离	1	3	5	7	9
速度	1/3	1	3	5	7
角度	1/5	1/3	1	3	5
时间差	1/7	1/5	1/3	1	3
相位差	1/9	1/7	1/5	1/3	1

2)一致性检验。构造出判断矩阵后,计算出判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 及一致性指标, n 为因素个数。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

经计算,判断矩阵的最大特征值为 $\lambda_{\max}=5.2375$,一致性指标 $C_I=0.059375$,最后计算一致性比例 $C_R=C_I/R_I \approx 0.053(n=5$ 时,平均随机一致性指标 $R_I=1.12)$ 。由于 $C_R < 0.1$,所以此判断矩阵具有“满意一致性”。

3)计算权重。根据判断矩阵 $\mathbf{B}=(b_{ij})_{5 \times 5}$,用方根法计算出各因素的权重为:

$$a_i = \frac{\sqrt[5]{b_{i1}b_{i2}\dots b_{i5}}}{\sum_{k=1}^5 \sqrt[5]{b_{k1}b_{k2}\dots b_{k5}}} \quad (7)$$

经计算 $a_1=0.51, a_2=0.26, a_3=0.13, a_4=0.07, a_5=0.03$ 。

由于ESM传感器采用无源定位对目标进行定位,距离误差较大,且目标进行机动时会使距离误差增大,因此应对距离因素的权重进行相应的调整,本文根据目标的机动指数对目标进行动态调整。

目标机动指数^{[17]57-58}

$$\alpha = \left(\frac{\sigma_\omega T^2}{2\sigma_n} \right)^2 \quad (8)$$

式中: σ_ω^2 是机动加速度方差; σ_n^2 是观测误差方差; T 是雷达天线扫描周期。 σ_ω^2 的实时获取方法如下:

目标的状态预测方程见式(9),测量预测值见式(10),残差见式(11)。

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1/k) = \Phi(k)\hat{\mathbf{X}}(k/k) \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}(k+1/k) = \mathbf{F}[\hat{\mathbf{X}}(k+1/k)] \quad (10)$$

$$\mathbf{V}(k) = \mathbf{Z}(k) - \hat{\mathbf{Z}}(k+1/k) \quad (11)$$

式中: $\Phi(k)$ 为状态转移矩阵; \mathbf{F} 为测量矩阵。设残差有雷达扫描周期内有 N 个天线采样, 则:

$$\sigma_{\omega}^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V^2(i) \quad (12)$$

实时目标机动指数为:

$$\alpha(k) = \left[\frac{\sigma_{\omega}(k) T^2}{2\sigma_n} \right]^2 \quad (13)$$

得到实时目标机动指数后, 将每一时刻距离因素的权重调整为:

$$a'_1(k+1) = 0.51e^{-\left[\frac{\alpha(k)}{\alpha_{\max}}\right]^2} \quad (14)$$

进行归一化处理, 各因素的动态权重为:

$$a_1(k+1) = \frac{a'_1(k+1)}{a'_1(k+1) + \sum_{j=2}^5 a_j(1)} \quad (15)$$

$$a_i(k+1) = \frac{a_i(k)}{a'_1(k+1) + \sum_{j=2}^5 a_j(1)} \quad i=2,3,4,5 \quad (16)$$

2.2.6 建立模糊综合评价集

根据确定因素动态权重模糊集 $\mathbf{A}(k)$ 和综合评价矩阵 $\mathbf{R}(k)$, 对各采样时刻航迹进行综合评价, 得到各采样时刻模糊综合评价集:

$$\mathbf{B}(k) = \mathbf{A}(k) \cdot \mathbf{R}(k) = [b_1(k), b_2(k), \dots, b_i(k)] \quad (17)$$

$\mathbf{B}(k)$ 的计算需要采用适当的模糊合成运算, 典型的运算模型有“主因素决定型”“加权平均型”“混合型”3 种算法^[18]。其中, 加权平均型能够体现权重的作用, 利用隶属度信息, 并对所有因素依权重大小均衡兼顾, 因此, 本文采用加权平均型的模糊合成运算, 具体形式为:

$$b_j(k) = \sum_{i=1}^m a_i(k) r_{ij}(k) \quad (18)$$

式中: $b_j(k)$ 为加权隶属度。

2.2.7 综合评价

建立出各采样时刻的模糊综合评价集后, 要根据一定的模糊判决准则进行判决, 判决出与 ESM 航迹最相似的雷达航迹。最常用的判决准则是最大隶属度原则, 即选择模糊综合评价集 $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 中最大的 b_j 为综合评价的结果。由于本文建立了一个动态的模糊综合评价集, 各采样时刻的模糊综合评价集随时间动态变化, 本文对最大隶属度原则进行了改进, 使其适用于动态的模糊综合评价集。具体方法为:

计算出各采样时刻加权隶属度后, 求出各雷达航迹的加权隶属度的平均值, 选出最大平均值 \bar{b}_j 所对应的雷达航迹即为与 ESM 航迹最相似的航迹。

3 算法仿真

为验证算法的有效性, 本文根据目标机动背景, 进行目标贴近、交叉飞行的仿真设置, 在该仿真设置下验证算法的关联性能, 并与传统的多因素模糊综合决策航迹关联算法进行对比。

3.1 仿真设置

假设我方 2 架飞机上各搭载 1 台雷达与 ESM 传感器, 2 架飞机匀速飞行, 相对位置保持不变, ESM 和雷达已经完成了时间对准与空间对准, 采样周期同为 1 s。

敌方有 3 架飞机向我机飞来, 初始位置分别为 $x_1 = (13\ 000\ \text{m}, 20\ 000\ \text{m})$, $x_2 = (13\ 200\ \text{m}, 20\ 000\ \text{m})$, $x_3 = (10\ 200\ \text{m}, 15\ 000\ \text{m})$, 其中敌机目标 1 与目标 2 进行蛇形机动, 运动形式完全相同, 距离保持不变; 目标 3 对于目标 1、2 进行交叉直线飞行。

雷达与 ESM 传感器的各测量参数假定见表 2。

表 2 雷达与 ESM 的测量误差

传感器	测量误差				
	距离	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	角度/ /mrad	时间差/ /s	相位差/ /rad
雷达	0.01R	10	8	3×10^{-8}	0.5
ESM	*	20	30	3×10^{-8}	1

R 表示目标距我机的距离; * 表示 ESM 的距离测量误差由其它观测因素的误差决定。

由于目标 1、2 运动方式完全相同, 且运动方式较目标 3 复杂, 因此, ESM 传感器采用时差-测向法(不考虑搭载 ESM 传感器的 2 架飞机与敌机的相对运动)对敌机目标 2 进行定位与跟踪; 雷达同时对敌方 3 个目标进行定位跟踪。

1) 根据给定的运动形式及参数, 对 3 个目标的飞行轨迹仿真见图 1。

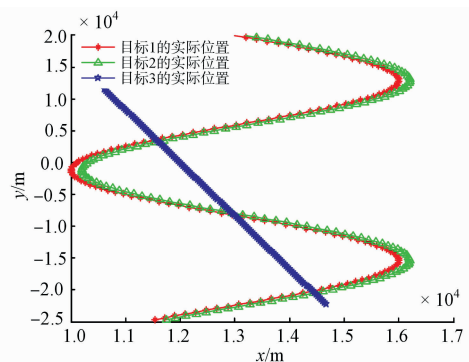


图 1 目标的真实航迹

Fig. 1 True track of target

2)采用测向-时差定位方法,对目标2的定位见图2。

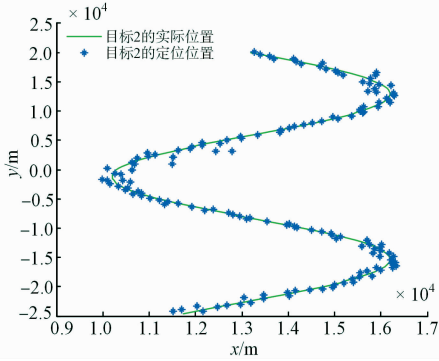


图2 目标2的真实航迹及ESM定位航迹

Fig. 2 True track of target 2 and ESM location track

3.2 仿真分析

实验1:在给定的仿真场景下,为验证本文算法在目标贴近和交叉运动时的有效性,分别采用本文关联算法和传统的多因素模糊综合决策航迹关联算法,进行500次蒙特卡洛仿真,2种算法的关联结果见表3。

在目标距离为200m,运动状态完全相同的情况下,由于本文算法利用了多个模糊因素,采用了动态权重,降低了目标运动过程中距离信息的影响,使在目标贴近的情况下,本文算法的关联正确率高于传统的多因素模糊综合决策航迹关联算法。

表3 本文算法与传统算法关联结果

Tab. 3 Two algorithm's association results

ESM 测得	雷达测得			关联正确 率/%
	航迹1	航迹2	航迹3	
本文算法 航迹2	130	370	0	74.0
传统算法	224	276	0	55.2

为进一步验证本文算法的有效性,分别改变目标的距离和雷达的距离探测误差,观察2种算法的航迹关联正确率。

实验2:为验证本文算法在目标间距离不同时的有效性,改变敌方目标1和2的距离,观察在不同距离下2种算法的关联正确率变化曲线,见图3。

结果表明,目标距离较近时,2种算法关联正确率下降,本文算法采用了多模糊因素,使距离因素的影响弱化,在目标贴近情况下关联正确率明显高于传统算法;目标距离较远时,两种算法关联正确率上升,距离因素起主导作用,两种算法关联正确率差异变小。

实验3:探测误差对航迹关联的正确率有很大影响,增大雷达的距离测量误差,观察在不同距离测量误差下两种算法的关联正确率的变化曲线,见图4。

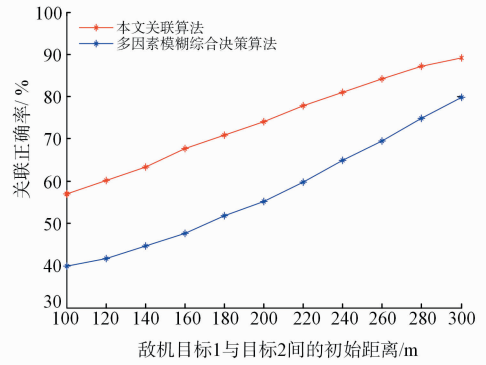


图3 不同距离下2种算法的关联正确率

Fig. 3 Correlation accuracy of the two algorithms at different distances

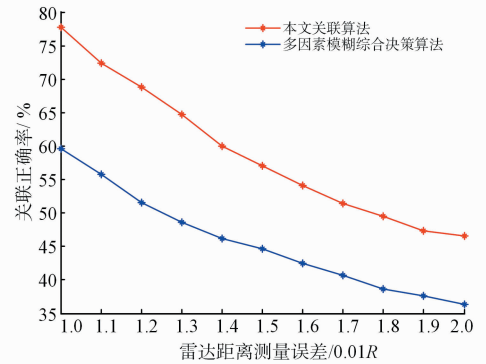


图4 不同雷达测量误差距离下2种算法的关联正确率

Fig. 4 Correlation accuracy of the two algorithms under different radar measurement errors

结果表明,在不同测量噪声的影响下,本文关联算法与多因素模糊综合决策算法的关联正确率下降。由于本文算法采用了动态隶属度,能够在噪声的影响下动态的调整隶属度大小,相对于传统算法,提升了关联正确率。

4 结语

航迹关联是信息融合的前提与基础,为实现机动目标在贴近和交叉运动时的航迹关联,本文对模糊综合评价算法进行了改进,充分利用雷达与ESM的共同信息,丰富了模糊因素集,在目标贴近飞行时能够充分利用除距离外的因素进行关联;在隶属度与权重的计算中采用了动态隶属度的思想,使算法更适用于目标机动的情况;根据算法改进,对评价集和评价准则进行了相应的调整。仿真结果表明,在目标贴近和交叉飞行时,本文算法要优于传统的多因素模糊综合决策航迹关联算法。敌机目标距离变化和雷达测量噪声改变时,本文算法始终要高于传

统算法。

参考文献(References):

- [1] 王丹梅. 一种具有复合侦察定位功能的雷达对抗系统[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(2): 24-27.
WANG D M. Radar Countermeasures System with Compositive Reconnaissance and Positioning[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008, 24(2): 24-27. (in Chinese)
- [2] 石教华, 张靖. 航迹关联算法仿真中的几个假定[J]. 火力指挥与控制, 2015, 40(4): 132-135.
SHI J H, ZHANG J. Preconditions Assumed in Simulation Analyses of Track Correlation Algorithms[J]. Fire Control and Command Control, 2015, 40(4): 132-135. (in Chinese)
- [3] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 290.
HAN C Z, ZHU H Y, DUAN Z S. Multi-Information Fusion [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 290. (in Chinese)
- [4] LLINAS J, WALTZ E. Multisensor Data Fusion [M]. Norwood Massachusetts: Artech House, 1990.
- [5] SINGERR A, KANYUCK A J. Computer Control of Multiple Site Track Correlation [J]. Automation, 1971, 7(4): 455-463.
- [6] 何友, 彭应宁, 陆大綸, 等. 分布式多传感器数据融合系统中的双门限航迹相关算法[J]. 电子科学学刊, 1997, 19(6): 721-728.
HE Y, PENG Y N, LU D J, et al. Binary Track Correlation Algorithms in a Distributed Multisensor Data Fusion System[J]. Journal and Electronics, 1997, 19(6): 721-728. (in Chinese)
- [7] BLACKMAN S. Multiple-Target Tracking with Radar Applications [M]. Norwood, MA: Artech House, 1986.
- [8] BAR-SHALOM Y, FORTMANN T E. Tracking and Data Association [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1988.
- [9] BAR-SHALOM Y, WILLIAM D B. Multitarget-Multi-Sensor Tracking Applications and Advances [M]. London: Artech House, 2000.
- [10] 何友, 陆大綸, 彭应宁, 等. 基于模糊综合函数的航迹相关算法[J]. 电子科学学刊, 1998, 20(5): 325-329.
HE Y, LU D J, PENG Y N, et al. Track Correlation Algorithms Based on Fuzzy Synthetic Function[J]. Journal and Electronics, 1998, 20(5): 325-329. (in Chinese)
- [11] 兰旭辉, 熊家军, 马建朝, 等. 一种改进的多源异类航迹关联方法[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(4): 263-265.
LAN X H, XIONG J J, MA J C, et al. Improved Method for Multi-Source and Heterogeneous Track Correlation[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012, 26(4): 263-265. (in Chinese)
- [12] 何友, 彭应宁, 陆大綸, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
HE Y, LU D J, PENG Y N, et al. Multi-sensor Information Fusion with Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. (in Chinese)
- [13] SAHA R K, CHANG K C. An Efficient Algorithm for Multisensor Track Fusion [J]. IEEE Trans on AES, 1998, 34(1): 200-210.
- [14] 张小红, 裴道武, 代建华. 模糊数学与 Rough 集理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 100-120.
ZHANG X H, PEI D W, DAI J H. Fuzzy Mathematics and Rough Set Theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 100-120. (in Chinese)
- [15] 孙小军. 模糊权值网络最短路问题的数学模型及算法 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2016, 29(3): 413-418.
SUN X J. Mathematical Model and algorithm for Shortest Path Problem in Fuzzy Weighted Network [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2016, 29(3): 413-418. (in Chinese)
- [16] 代雪珍, 常在斌. 基于矩阵的模糊决策系统的属性约简算法 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2015, 28(2): 224-229.
DAI X Z, CHANG Z B. Attribute Reduction Algorithm of Fuzzy Decision System Based on Matrix [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2015, 28(2): 224-229. (in Chinese)
- [17] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
YANG W H. Multi-sensor Data Fusion with Application [M]. Xi'an: Publishing House of Xidian University, 2004. (in Chinese)
- [18] 林长川, 孙腾达, 洪爱助, 等. 雷达与 AIS 目标航迹模糊关联算法与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2006, 2(18): 903-905.
LIN C C, SUN T D, HONG Y Z, et al. Algorithm and Simulation of Fuzzy Correlation of Tracks from Radar and AIS [J]. Journal of System Simulation, 2006, 2(18): 903-905. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)