

基于目标参照拓扑的模糊航迹关联方法*

石 玥¹,王 钺¹,王树刚²,山秀明¹

(1. 清华大学 电子工程系,北京 100084; 2. 空军装备研究院 雷达与电子对抗研究所,北京 100084)

摘 要 :航迹关联是分布式多雷达数据融合系统中的关键问题。多个雷达对同一目标观测的局部航迹,在系统偏差的影响下相差很大,难以通过目标位置、速度等信息进行关联判决。基于目标参照拓扑的模糊航迹关联方法,首先利用目标空间上的相对位置信息,提取新的特征——目标拓扑向量,然后考虑正北偏差的影响将其弥散化,继而应用模糊模式识别方法进行分析,建立关联准则,实现目标航迹的自动关联,并可为数据的进一步校准提供先验信息。仿真结果表明该方法具有较高的关联精度和鲁棒性。

关键词 :多传感器数据融合;航迹关联;系统偏差;模糊模式识别

中图分类号 :TN957 文献标识码 :A

Fuzzy Data Association based on Target Topology of Reference

SHI Yue¹, WANG Yue¹, WANG Shu-gang², SHAN Xiu-ming¹

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Airforce Institute of Radar and Electronic Warfare, Beijing 100084, China)

Abstract :Track association has been recognized as one of the major problems in distributed multiple-radar multiple-target tracking systems. Tracks formed on the same targets by multiple radars may differ due to misalignment or bias error. So the traditional features, such as target position and speed, cannot be reliably used for track-to-track association. The information of relative positions among targets, however, is found to contain special characters and can be extracted as target topology vector of reference dynamically. Applying fuzzy pattern recognition to analyze the similarity of vectors or patterns can set up the criterion of association and provide prior information for alignment. Simulation results show that the proposed algorithm is effective to solve the association problem under the condition of inter-radar bias and robust to the random errors.

Key words :multiple-sensor data fusion; track fusion; system bias; fuzzy pattern recognition

在多雷达跟踪系统中,融合来自多部雷达对同一目标的观测信息可以获得更为精确的目标状态估计。实际系统多采用分布式的融合体系结构,即单部雷达产生局部航迹传送到融合中心,在融合中心进行航迹关联,对同一目标的航迹进行融合,得到系统航迹。多目标环境中,航迹关联是多雷达数据融合中的一个关键问题,也是实现航迹融合的前提,关联判决结果将直接影响整个融合系统的性能^[1]。系统中的多种不确定性,包括雷达自身的系统误差、随机误差以及密集的杂波干扰,是航迹关联实际应用中面临的主要问题。

航迹或数据关联算法通常假设多传感器数据经过校准后只存在随机误差,然后将关联问题看作是对多个数据集合的最优分配问题^[2-3]。从数学角度来说,关联算法大致可分为基于统计理论(如加权法、最近邻域法、K近邻以及修正的K近邻方法等)和基于模糊理论的两大类^[4-6]。统计方法在系统误差较大时,性能急剧下降,而基于模糊理论的航迹关联算法可以处理判决过程中各种因素的模糊性,在实际中得到了广泛的应用。位置、速度、加速度间以及航向、航速变化率之间的欧式距离是模糊航迹关联算法常用的因素集^[6-7]。

雷达系统的方位偏差(如图1所示)对航迹的关联与融合质量影响很大。通常采用安装角反射器或

* 收稿日期 2006 - 02 - 14

基金项目 :航天支撑技术基金项目

作者简介 :石玥(1979—),女,博士生。

借助装有 GPS 的飞机的方法校准雷达的方位偏差,但也不可能完全消除;在实际作战中这些方法也受到限制。因此,工程实践中往往因为缺少相应的先验信息无法在数据关联前完成数据校准。如果系统偏差(相对雷达探测的随机误差)不可忽略,在目标密集、杂波干扰或是编队飞行等场景下,基于位置、速度以及其他动态因素的模糊关联方法也同样会遇到困难。此外,多雷达融合系统中数据的校准通常需要部分关联信息^[8-9],因此在数据校准前快速地建立起关联关系也是数据进一步校准的保障。

本文定义了一种新的特征量——目标拓扑向量,借此提出了一种模仿人工判别的航迹关联算法。目标拓扑向量将目标的相对位置关系抽象成一种模式,利用模糊模式识别,决定目标间的关联关系,有效地克服了多雷达跟踪融合系统中各雷达系统偏差对航迹关联的影响。仿真试验表明,该方法在目标密集、编队飞行等场景下具有较高的关联精度,并且受系统偏差和随机观测误差的影响较小,具有较高的鲁棒性。

1 目标参照拓扑

多雷达目标航迹关联问题需要考虑各雷达系统偏差、数据时间对准、观测随机误差等因素的影响。较大的系统偏差会造成雷达探测的局部航迹相对于目标真实航迹的旋转与平移。如图 1 所示, $\Delta\theta_A$ 、 $\Delta\theta_B$ 分别为雷达 A、B 的方位偏差;目标 A、目标 B 分别为雷达 A、B 对真实目标的观测。方位测量上存在的偏差使得局部航迹相对真实航迹发生了旋转。此时,仅借助目标的位置、航向、航速等状态信息无法进行有效的关联判决,需要更多的有关信息。

受到人工判别过程的启发:将待关联目标周边的其他目标作为参照物,目标间的空间信息就可为关联判决提供更多的参考。

定义这种新的信息称为目标的参照拓扑,即以待判目标为原点,周边的目标作为参照物所构成的拓扑图(如图 2 所示)。可见,空间上相距较近的目标,参照拓扑截然不同。因此,参照拓扑是区分目标的一个有效的特征。将不同雷达观测到的同一个目标的参照拓扑进行比较,实际上就是把雷达观测坐标进行了平移变换,把坐标原点平移到了待判决目标上。图 3(a)中比较了不同雷达对目标 C 观测的参照拓扑,方位偏差导致了参照拓扑之间的旋转,虽然观测的目标的绝对位置有较大差异,但参照拓扑结构的差别却不大;图 3(b)是两部雷达看到的不同目标(B 目标和 C 目标)的参照拓扑之间的比较,差异很大。

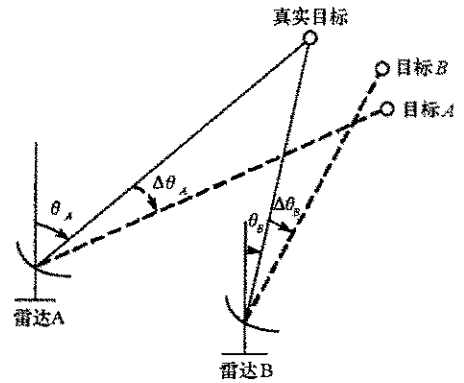


图 1 正北偏差对雷达目标航迹的影响
Fig.1 Influence of radar azimuth bias on tracks

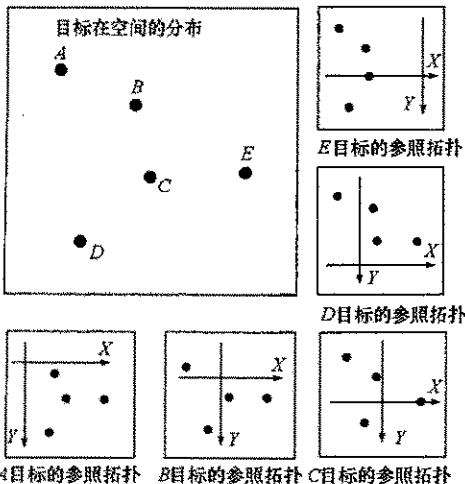


图 2 一组目标的参照拓扑
Fig.2 A group of reference topology

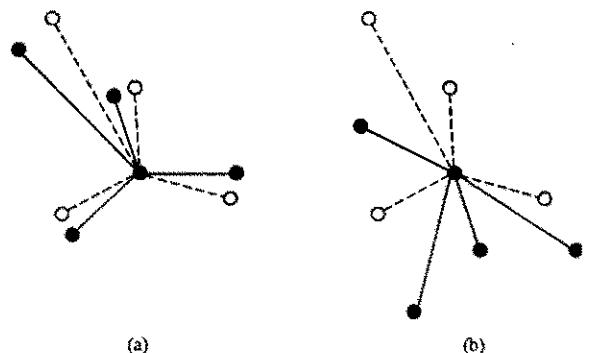


图 3 参照拓扑的比较
Fig.3 Comparison of reference topology from two radars (indicated by different colors)

2 目标参照拓扑的特征提取

2.1 目标参照拓扑矩阵

为定量比较参照拓扑,对参照拓扑进行量化,即构造参照拓扑矩阵。对于一个待关联目标,以目标所在位置为中心,对其特定的圆形参照区域做扇形区域划分。假设沿径向等间距划分为 M 个环形区,等分中心角成 N 个扇区,目标的参照区域即被划分成 $M \times N$ 个小单元格。每一个单元格代表参照拓扑中的一个特定区域。按照参照拓扑中对应区域是否有参照物(其它目标)存在,给予每个单元适当的隶属度 u_{ij} , i, j 分别为沿径向和中心角的划分区域号。约定:

$$\begin{cases} u_{ij} = 0 & \text{相应区域中存在目标} \\ u_{ij} = 1 & \text{相应区域中不存在目标} \end{cases} \quad (1)$$

以 u_{ij} 为元素(i, j 对应元素在矩阵中的行数和列数),就构成了与目标的参照拓扑图相对应的参照拓扑矩阵,也称作标准的参照拓扑矩阵。图 4 所示的是对图 2 中目标 C 的参照拓扑进行量化得到参照拓扑矩阵的过程。

2.2 参照拓扑矩阵的弥散化

雷达的系统偏差和观测随机误差是观测目标位置不确定性的主要原因。通常,经过雷达本地航迹滤波,随机误差对航迹不确定性的影响已经相对减弱;只要目标的观测位置仍位于参照拓扑中的同一单元格内,参照拓扑矩阵就不会改变。将参照拓扑量化成拓扑矩阵,降低了随机误差对关联判决的影响。

雷达的方位偏差对参照拓扑矩阵的影响只发生在同一圆环分割区域内,即参照拓扑矩阵中同一行的两个相邻元素上;且无论参照物的距离远近,落入相邻格子的概率相同。图 5 表明了方位偏差对参照拓扑的影响。

考虑到上述现象,可对标准的参照拓扑矩阵进行弥散化处理。当雷达探测到参照拓扑的一个单元格中存在一个目标时,在其所在单元格的周围单元内增加弥散化系数 Δ ($0 < \Delta < 1$)。图 2 中目标 C 的弥散化拓扑矩阵如图 4(b)所示。 Δ 表示随机误差带来的弥散, Δ' 表示随机误差和正北偏差共同作用带来的弥散。目标弥散化的参照拓扑矩阵即为表征目标参照拓扑的模糊矩阵。相对于方形格的区域划分方式,扇形格划分使得参照拓扑矩阵受正北偏差影响较小,具有一定的鲁棒性。

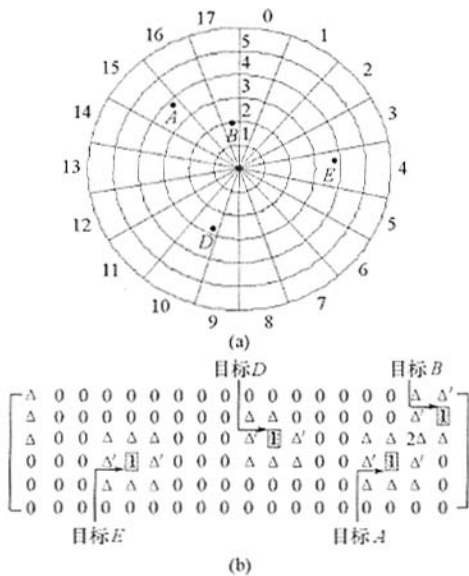


图 4 图 2 中 C 目标的参照拓扑量化

Fig.4 Quantification of reference topology for target C in Fig.2

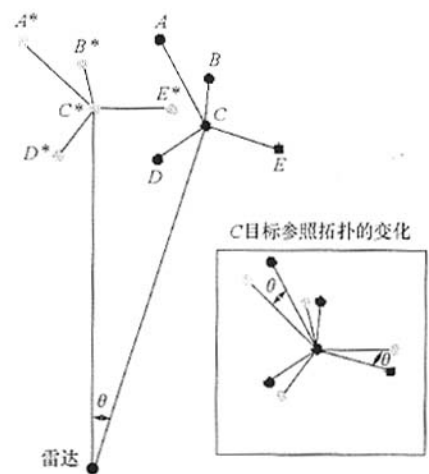


图 5 正北偏差对图 2 中 C 目标的参照拓扑的影响
带有 * 上标的是真实目标,正北偏差为 θ

Fig.5 Influence of azimuth bias on RET. Points with * are the true positions and the bias is θ

3 基于弥散拓扑向量的模糊航迹关联

对于分布式的多雷达数据融合系统,数据融合中心需要将各雷达局部目标航迹与中心的系统航迹进行关联。目标参考拓扑矩阵将目标的相对位置信息抽象成一种模式,航迹关联就是将待关联局部航迹的参照拓扑矩阵与系统航迹的参照拓扑矩阵做比较,找出最为匹配的关联航迹对。应用模糊模式识别,将模糊贴适度作为匹配性的度量,匹配过程将更加逼近人脑工作模式,从功能上增强了关联判决器对人类智能的模拟。

先将弥散化参照拓扑矩阵(即模糊矩阵)转化为模糊向量,矩阵的第*i*行放在向量的第*i*个分量上。假设目标参照区域被划分成 $M \times N$ 个单元格,那么与一个目标的参照拓扑相对应的是一个 $M \times N$ 维的模糊向量。

设 k 时刻待关联的局部航迹模糊向量集合与系统航迹模糊向量集合分别为

$$A = \{a_i | i = 0, \dots, l\}, a_i = (a_{i1} \ a_{i2} \ \dots \ a_{iM \times N}) \quad B = \{b_j | j = 0, \dots, s\}, b_j = (a_{j1} \ a_{j2} \ \dots \ a_{jM \times N})$$

$$a_{ij} \in [0, 1], j = \{1, \dots, M \times N\} \quad b_{jk} \in [0, 1], k = \{1, \dots, M \times N\}$$

a_0 表示局部未观测到的目标, l 为局部观测目标数; b_0 表示新目标, s 为系统航迹数。

两个集合中的模糊向量都表征一个目标,关联判决就是要找到两个集合中最为匹配的一组。设 T 为关联映射,建立映射 $T, T(a_i) = b_j$ 。设 $T(a_i) = b_j, T(a_k) = b_t$, 则 $\forall i, k \in \{1, \dots, l\}, \forall j, t \in \{1, \dots, s\}$:

$$i \neq k \leftrightarrow j \neq t \tag{2}$$

计算两条航迹在 k 时刻的贴适度:

$$W_k(a_i, b_j) = \sum_{p=1}^{M \times N} ((a_{ip} \wedge b_{jp}) \vee (a_{ip}^c \wedge b_{jp}^c)) \tag{3}$$

当 $a_i = b_j$ 即两目标参照拓扑矩阵完全相同时,贴适度 $W_k(a_i, b_j) = M \times N$; 两条航迹参照拓扑的贴适度越接近 $M \times N$, 表明两条航迹为同一目标的可能性越大。对于一条系统航迹 b_j , 当 $\max_{i \in \{1, \dots, l\}} (W_k(a_i, b_j)) > \lambda$ (其中 λ 为贴适度门限) 时, 可根据择近原则选取参照拓扑与之最为匹配的局部航迹作为关联对; 反之, 判决 b_j 与 a_0 为关联对, 即局部雷达没有观测到该目标; 对于一条局部航迹 a_i , 若在一个关联周期内未与任何一条系统航迹建立关联关系, 则认为 a_i 与 b_0 相关联, 即为新目标。为避免航迹中的野值点造成航迹的错关联或漏关联, 该方法可同时为关联航迹对设置航迹关联质量, 以便随时解除错误的关联判决。

4 仿真结果

仿真试验在某多雷达融合系统仿真平台上完成。在雷达存在方位系统偏差的情形下, 利用多部雷达的信息, 完成对空中目标的跟踪。仿真试验场景如图 6 所示。共模拟 8 部雷达对目标进行探测, 雷达 $R_1 \sim R_8$ 位置如图 6 所示, 扫描周期均为 10s; 仿真系统中雷达的最大方位误差达到 5° , 观测随机误差标准差为 $0.5 \sim 1^\circ$, 径向观测随机误差标准差为 500 ~ 1000m (均呈正态分布)。模拟生成两类目标: 编队飞行目标和杂散飞行目标。设定 5 个杂散目标和 3 批编队目标, 其中每批编队均由 5 个目标组成, 间距 20km, 声速飞行, 设定轨迹如图所示。仿真实验持续 15min。

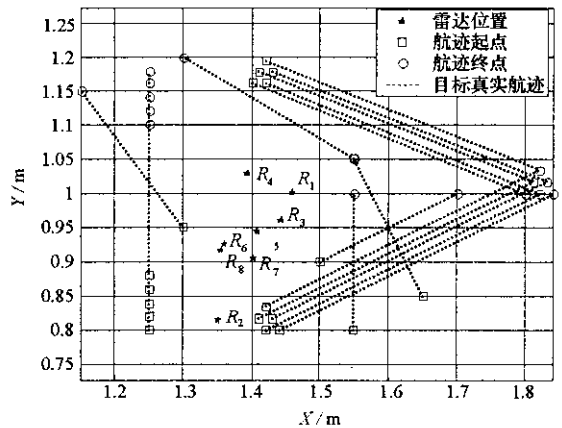


图 6 仿真试验场景
Fig.6 Simulation setup

航迹关联性能评价标准采用在模式识别中较为常用的 Precision-Recall-F1 的评价标准。

表 1 Precision-Recall-F1 评价标准四种判例集合含义

Tab.1 Definition of Precision-Recall-F1

正确检测	漏警	正确判别	虚警
预测为正例的正样本数	预测为负例的正样本数	预测为负例的负样本数	预测为正例的负样本数
TP	FN	TN	FP
正例情况 样本数 P		负例情况 样本数 N	

定义四种判例集合 :TruePositive(TP), TrueNegative(TN), FalsePositive(FP), FalseNegative(FN)。表 1 结合雷达中的相关概念给出了四种判例集合含义的描述。Precision-Recall-F1 的评价标准的各指标定义如下

$$\begin{cases} \text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \\ \text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \\ \text{F1} = 2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall}) \end{cases}$$

其中 Precision 反映了预测为正例(即判决为关联)的正确率,Recall 反映了对正例(即实际上关联的航迹)做正确判断的概率,F1 是 Precision 和 Recall 之间的均衡值,反映了算法的总体性能。

本次仿真试验关联统计结果如下:

指标	结果
Precision	99.9034%
Recall	99.5362%
F1	99.7195%

可见,基于目标参照拓扑的模糊航迹关联算法判决关联的正确率为 99.5362%,对所有关联航迹(真实关联)判决的正确率为 99.9034%,接近于 1 的 F1 值反映了航迹关联算法具有很高的准确度。

5 结论

目标之间的位置关系可以为目标航迹关联提供更多的信息。利用目标参照拓扑这一新的特征量进行判决,与人工进行航迹关联判决的过程非常相似。本文针对多雷达跟踪融合系统中系统偏差造成局部航迹旋转平移,无法通过传统方法进行关联的问题,提出了基于目标参照拓扑的模糊航迹关联算法。仿真结果表明了该方法的有效性和鲁棒性。工程实践中,在数据校准前应用该方法可以快速地建立目标关联关系,同时为数据的校准提供一定的先验信息,因而具有实用价值。

参考文献:

- [1] Bar-shalom Y. Multitarget-multisensor Tracking: Advanced Applications [M]. Boston, MA: Artech House, 1989: 167 - 207.
- [2] Blackman S, Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems [M]. Boston, MA: Artech House, 1999: 325 - 402.
- [3] Bar-Shalom Y, Chen H. Multisensor Track-to-track Association for Tracks with Dependent Errors [A]. Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control [C], Nassau, Bahamas, Dec. 2004: 2674 - 2679.
- [4] Bar-Shalom Y, Li X R. Multitarget-multisensor Tracking: Principles and Techniques [D]. New Orleans: University of New Orleans, 1995.
- [5] 何友,陆大金,彭应宁.一种多目标多传感器航迹相关算法[J].清华大学学报,1997(9):108 - 113.
- [6] 李秋华,李吉成,沈振康,等.基于模糊综合的红外目标融合识别[J].国防科技大学学报,2003,25(1):51 - 55.
- [7] 何友,王国宏,陆大金,等.多传感器信息融合及应用[M].北京:电子工业出版社,2000:114 - 166.
- [8] Singh R N P, Bailey W H. Fuzzy Logic Applications to Multisensor-multitarget Correlation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(3): 752 - 769.
- [9] Lin X, Kirubarajan T, Bar-Shalom. Multisensor-multitarget bias Estimation for Asynchronous Sensors [A]. Proceedings of SPIE Conference on Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XIII [C], 2004: 5429: 105 - 116.

