

航迹关联不确定度的表示

陈世友, 肖 厚, 刘 颢

(武汉数字工程研究所, 湖北武汉 430074)

摘 要: 本文给出了航迹关联不确定度的定义, 解释了航迹关联不确定度与信息不确定性的香农熵度量和哈特利度量之间的关系, 简述了航迹关联不确定度在信息融合过程中的作用, 提出了航迹关联不确定度评定方法应满足的五个基本要求, 给出了一种航迹关联不确定度评定方法. 仿真结果表明, 航迹关联不确定性是能量度的, 所提出的评定方法能够正确反映目标间隔距离、传感器测量误差、航迹关联的正确性等与航迹关联不确定度之间的关系; 而且, 对于相同的关联判决结果, 无论传感器是否存在系统误差, 应用本文提出的评定方法, 同一航迹关联对的航迹关联不确定度评定结果几乎相同.

关键词: 多传感器; 数据融合; 不确定度评定; 航迹关联

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 07-1589-05

Expression of Track Correlation Uncertainty

CHEN Shi-you, XIAO Hou, LIU Hao

(Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The measure of track correlation uncertainty was defined and was compared with the Shannon entropy measure and Hartley measure of information uncertainty. Then, the usage of track correlation uncertainty was expressed. Lastly, the requirements and a mathematic model for evaluating the track correlation uncertainty were proposed. Simulation results show that the track correlation uncertainty is measurable and can be correctly evaluated. The proposed evaluation method can quantitatively describe the effects of target separations, sensor measurement errors, correctness of track correlation, etc. to the track correlation uncertainty very well. Moreover, to the same input of correlation results, the proposed evaluating method can output almost the same evaluating results of track correlation uncertainty for the same correlated track pairs, no matter the sensors have systematic errors or not.

Key words: multi-sensor; data fusion; uncertainty evaluation; track correlation

1 引言

数据融合处理在功能上可划分为数据准备、数据关联、状态估计和预测等三个部分^[1], 其中, 数据关联通过假设生成、假设评估和假设选择三个步骤确定一个“最优”的分配, 即将输入数据集分配给目标、其他的观测或其他可能的数据解释(如虚情), 使得关联集合在特定的优化准则下成本最低. 观测数据的不确定性和数据关联的“组合最优化”本质决定了数据关联通常会存在一定的错误分配比例. 错误的分配比例会导致虚情、漏情, 降低目标融合航迹的纯度和准确度; 同时, 也会降低传感器系统误差与精度等参数估计的准确性.

在基于航迹的分布式融合系统中, 航迹关联同样存在一定的错误比例, 也就是说, 航迹关联判决所生成的若干“航迹关联对”不都是正确的, 它存在不确定性. “航

迹关联对”及其“航迹关联不确定性的度量值”都是航迹关联信息的重要组成部分, 它们共同构成完整的航迹关联信息. 获取航迹关联对的航迹关联不确定度, 用以描述被判定为关联的两条航迹产生于同一个目标的可疑程度, 对航迹关联结果中具有不同航迹关联不确定度的航迹关联对进行有区别的使用, 将不确定推理扩展到航迹关联结果应用的领域, 对提高航迹融合系统的自适应能力和自动化水平是很有益的.

在航迹关联不确定性方面, Blackman^[2]定性地将跟踪关联问题空间划分为三个区域: 正确关联区域、不稳定区域和错误关联区域; 三个区域的边界是目标间隔距离、测量时间间隔、检测概率等的函数, 目标间隔距离由大变小、测量时间间隔由小变大、检测概率由高到低, 都将使跟踪关联判决从正确关联区域转向不稳定区域甚至错误关联区域; 一些相关的研究表明, 当目标角度间

隔大约是角度测量标准差的 2 到 5 倍时,跟踪关联判决可能处于不稳定区域,当大于 5 倍时,可能处于正确关联区域. Llinas^[1]在关联工程中的研究中,深入分析了各种关联算法能取得良好性能的问题空间,并对各算法从问题空间到解空间的映射进行了比较;研究过程中,对造成数据关联发生错误的原因进行了全面分析.

本文从定量度量的角度研究航迹关联不确定性,包括相关定义、在融合系统中的作用、评定方法应满足的基本要求等,并给出一种航迹关联不确定度评定方法. 本文将航迹关联不确定性的度量和航迹关联不确定性度量的量值不加区分地简称为航迹关联不确定度. 本文为在融合处理过程中有区别地使用具有不同关联不确定度的航迹关联对提供一种理论基础和技术手段.

2 基本原理

2.1 基本概念

数据关联依据先验信息,对传感器的航迹进行分配. 由于传感器对目标跟踪具有信息的不完整性、不准确,并存在虚情和漏情,而且目标及其存在环境的诸多信息也难以数据关联所充分掌握或应用,在数据关联看来,一个航迹通常与另一传感器的多条航迹、而不是仅与一条航迹有相关的可能性. 多传感器航迹关联关系可以用关联概率矩阵表示:

$$A_c = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{j1} & \cdots & \mathbf{y}_{jq} & \cdots & \mathbf{y}_{jn} & \times \\ p(A_{i1,j1}) & \cdots & p(A_{i1,jq}) & \cdots & p(A_{i1,jn}) & p(A_{i1,\times}) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ p(A_{ip,j1}) & \cdots & p(A_{ip,jq}) & \cdots & p(A_{ip,jn}) & p(A_{ip,\times}) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ p(A_{im,j1}) & \cdots & p(A_{im,jq}) & \cdots & p(A_{im,jn}) & p(A_{im,\times}) \\ p(A_{\times,j1}) & \cdots & p(A_{\times,jq}) & \cdots & p(A_{\times,jn}) & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \mathbf{y}_{i1} \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{ip} \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{im} \\ \times \end{matrix}$$

其中, $\mathbf{y}_{ip}(t)$ 表示航迹, t 表示时间,下标 i, p 分别表示传感器编号和航迹序号, \times 表示不存在的航迹, $A_{ip,jq}$ 表示航迹 \mathbf{y}_{ip} 与航迹 \mathbf{y}_{jq} 来源于同一个目标(或虚情)的事件, $A_{ip,\times}$ 表示 \mathbf{y}_{ip} 不对应于另一传感器的任何航迹的事件, $p(A_{ip,jq})$ 表示事件 $A_{ip,jq}$ 发生的概率.

数据关联进行航迹分配的多种可能性,导致关联判决客观地存在不确定性. 本文以航迹关联不确定度来描述关联判决的可疑程度的,并采用信息的香农熵(Shannon entropy)^[3]进行度量. 本文规定 $x \cdot \log_2 x \Big|_{x=0} = 0$, 则:

定义 1 在基于航迹的分布式融合系统中,对于来自传感器 i 的任一条航迹 \mathbf{y}_{ip} ,以 $p(A_{ip,jq})$ 表示 \mathbf{y}_{ip} 与传感器 j 的航迹 \mathbf{y}_{jq} 来源于同一个目标(或虚情)的概率,以 $p(A_{ip,\times})$ 表示 \mathbf{y}_{ip} 不对应于传感器 j 的任何航迹的概率,则定义航迹 \mathbf{y}_{ip} 的关联不确定度为

$$U(\mathbf{y}_{ip}) = - \sum_k [p(A_{ip,jk}) \cdot \log_2 p(A_{ip,jk})] - p(A_{ip,\times}) \cdot \log_2 p(A_{ip,\times})$$

获取航迹关联不确定度的目标是有区分地使用数据关联结果. 数据关联结果一般以若干个航迹关联对表示,为此,需要定义航迹关联对的关联不确定度.

定义 2 在基于航迹的分布式融合系统中,以 $(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 表示数据关联判定的一对关联航迹,定义航迹关联对 $(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 的关联不确定度为 $U(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq}) = \max[U(\mathbf{y}_{ip}), U(\mathbf{y}_{jq})]$.

依照定义 2,获取 $U(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 需要获得关联矩阵中第 p 行和第 q 列中的所有分配概率,计算过程较复杂.

对于任意的 k ,已知 $-p(A_{ip,jk}) \cdot \log_2 p(A_{ip,jk}) \geq 0$, 则有 $-\sum_k [p(A_{ip,jk}) \cdot \log_2 p(A_{ip,jk})] - p(A_{ip,\times}) \cdot \log_2 p(A_{ip,\times}) \geq -p(A_{ip,jq}) \cdot \log_2 p(A_{ip,jq})$. 对于需要进行航迹关联关系筛选的应用,若 $-p(A_{ip,jq}) \cdot \log_2 p(A_{ip,jq})$ 超出了设定的门限,则 $-\sum_k [p(A_{ip,jk}) \cdot \log_2 p(A_{ip,jk})] - p(A_{ip,\times}) \cdot \log_2 p(A_{ip,\times})$ 必超出设定门限,因此,可以将 $U(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 简化为 $-p(A_{ip,jq}) \cdot \log_2 p(A_{ip,jq})$. 但 $-p(A_{ip,jq}) \cdot \log_2 p(A_{ip,jq})$ 不是 $p(A_{ip,jq}) \in [0, 1]$ 的单调函数. 为使得 $U(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 的简化保持单调递减,则有定义 3 的要求.

定义 3 定义航迹关联对 $(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 的关联不确定度 $U(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 的第一种简化:

$$U_1(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq}) = -\log_2 p(A_{ip,jq}).$$

$U_1(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 在形式上与信息不确定性的哈特利(Hartley)度量^[3]相同.

定义 4 定义航迹关联对 $(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 的关联不确定度 $U(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 的第二种简化:

$$U_2(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq}) = [1 - p(A_{ip,jq})] / p(A_{ip,jq}).$$

$U_2(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 的物理含义直接、明确,并为 $p(A_{ip,jq}) \in [0, 1]$ 的递减函数. 而且,当 $p(A_{ip,jq}) > 0.4$ 时, $[1 - p(A_{ip,jq})] / p(A_{ip,jq})$ 与 $-\log_2 p(A_{ip,jq})$ 的取值也比较接近.

容易证明, $U(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 、 $U_1(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 、 $U_2(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 在以下几个方面具有相同的性质:

- (1) 均为 $p(A_{ip,jq}) \in [0, 1]$ 的递减函数;
- (2) 当 $p(A_{ip,jq}) = 1$ 时,其取值均为 0;
- (3) 当 $p(A_{ip,jq}) = 0.5$ 时,其取值均为 1;
- (4) 当 $p(A_{ip,jq}) \rightarrow 0$ 时,均趋于正无穷大.

2.2 应用方法

航迹关联不确定度用于描述不同信源的两个航迹源于同一个目标的可疑程度. 开发航迹关联不确定度评定算法不是为了提高航迹数据关联的正确率,而是

为了更准确地描述航迹关联判决是否可信、可信程度如何,以便在融合处理过程中有区别的使用具有不同关联不确定度的航迹关联对。

航迹关联不确定度及其评定主要用于支持航迹关联结果的不确定推理,包括用于对多种关联算法的在线优选或综合、用于选用生成融合航迹的源航迹、进行传感器系统误差估计或精度估计时用于滤除航迹关联不确定度较高的关联航迹对、在线调整和优化关联判决参数(如序贯的“记忆长度”、K-NN 的门限^[4])等。

以传感器系统误差或精度参数估计为例,现有的方法^[4,5]大部分是基于能够获得正确的多源目标关联关系这一前提。为保证只使用正确的航迹关联信息,传统上,依靠人工进行航迹关联关系筛选。由于需要人工参与,传感器系统误差与精度等参数的在线估计难以实现自动化,融合系统难以实现自适应。

应用航迹关联不确定度的概念,进行航迹关联不确定度评定,并用评定结果代替人工对航迹关联判决结果进行筛选,只将航迹关联不确定度低的关联航迹数据用于传感器系统误差与精度参数估计,实现传感器系统误差与精度等参数自动、在线估计,从而使系统具备自学习、自校准和自适应能力。在自适应航迹融合系统中,航迹关联不确定度评定的作用如图 1 所示。

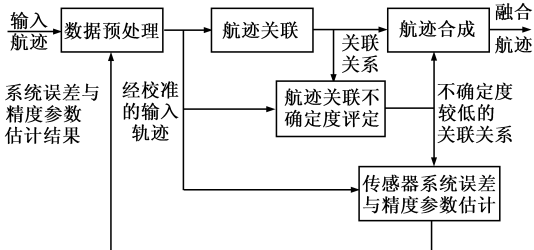


图1 自适应航迹融合系统结构图

3 评定方法

类似于测量不确定度评定^[6,7]过程不需要依据被测量值的真实值,航迹关联不确定度评定是在航迹真实关联关系未知的情况下进行的,评定过程的输入数据是传感器的航迹数据和航迹关联结果,其评定结果可以综合反映建立两航迹关联关系的充分性和必然性。航迹关联性能评估则不同,它是在已知航迹真实关联关系的情况下对测试数据进行统计计算,其目的是为了获得航迹关联正确率、虚情率、漏情率等性能指标。

航迹关联不确定度评定可采用不同的方法^[8],建议满足以下基本要求:

(1)航迹关联不确定度评定过程不得假设已知航迹的真实关联关系;

(2)航迹关联不确定度评定不得假设能够准确掌

握传感器的系统误差和跟踪精度;

(3)航迹关联不确定度评定结果应决定于关联判决结果(航迹关联对的集合):只要关联结果相同,即便最近邻、基于目标参照拓扑的关联算法、JPDA 等关联算法^[9-12]具有不同的特性,无论传感器是否存在系统误差,航迹关联对的航迹关联不确定度评定应当有相近的结果;

(4)当传感器测量精度、目标分布、观测时间等变化时,航迹关联不确定度评定结果的变化应当符合正确的变化规律^[2];

(5)航迹关联不确定度评定结果应当能正确反映错误关联关系的影响。

3.1 评定方法

本文提出了一种适用于定义 3 和定义 4 的评定方法。首先以被判定的关联航迹,估算航迹偏差(矢量)的均值(矢量)和协方差矩阵,用于描述传感器探测的不确定度,并以此计算两传感器各航迹间的似然度,用于描述传感器探测信息的不完整、不精确性以及目标分布对航迹关联判决的影响;然后,综合虚情、漏情等多传感器探测信息的不一致性对航迹关联判决的影响,形成航迹关联概率的评定值,并计算航迹关联不确定度。对于航迹关联对 (y_{ip}, y_{jq}) ,其航迹关联不确定度的评定模型如下。

(1)确定参评航迹集

以被评定航迹关联对 (y_{ip}, y_{jq}) 中的航迹 y_{ip} 在当前时刻 t_k 的位置为中心,取一个适当大小的连通区域,并以 A_0 表示该区域内所有航迹的集合。

定义 $A_c = \{(y_{ia}, y_{jb}) | y_{ia} \in A_0 \text{ 或 } y_{jb} \in A_0\}$ 为参评航迹对集合,其元素的个数为 n_c ,将构成 A_c 中航迹对的所有航迹组成的集合称为 A_g ;将 $A_i = \{y_{ic} | y_{ic} \in A_0 \text{ 或 } y_{ic} \in A_g\}$ 称为信源 i 的参评航迹集,其元素的个数为 n_i ;将 $A_j = \{y_{jd} | y_{jd} \in A_0 \text{ 或 } y_{jd} \in A_g\}$ 称为信源 j 的参评航迹集,其元素的个数为 n_j 。

(2)计算航迹偏差的统计量

定义航迹偏差 r 为两航迹在相同时刻的差,定义 $r_1 = y_{ip} - y_{jq}$,并将集合 A_c 中其他航迹对的偏差依次定义为 $r_l, l = 2, 3, \dots, n_c$ 。则可根据下式计算航迹偏差的统计量:

$$\bar{r} = \frac{1}{n_c(k-h+1)} \sum_{w=1}^{n_c} \left[\sum_{v=h}^k r_w(t_v) \right] \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{n_c(k-h+1)-1} \sum_{w=1}^{n_c} \left[\sum_{v=h}^k [r_w(t_v) - \bar{r}][r_w(t_v) - \bar{r}]^T \right] \quad (2)$$

其中, t_v 表示航迹更新时刻, h, k 均为顺序号。

(3)计算归一化航迹似然度

定义两航迹的航迹似然度:

$$L = \exp\left(-\sum_{l=h}^k [\mathbf{r}(t_l) - \bar{\mathbf{r}}]^T \mathbf{V}^{-1} [\mathbf{r}(t_l) - \bar{\mathbf{r}}] / [2(k-h+1)]\right) \quad (3)$$

则可分别计算 \mathbf{y}_{ip} 与集合 A_j 中每一个航迹的航迹似然度, 构成向量 $\mathbf{a}_{ip} = [L_{ip,jq}, \dots]$.

定义归一化航迹似然度

$$a_{s,ip} = \frac{L_{ip,jq}}{\|\mathbf{a}_{ip}\|_1} \quad (4)$$

式中, $\|\mathbf{a}_{ip}(t)\|_1$ 表示向量的 1-范数.

(4) 计算修正因子

以 Ω_{ip} 表示信源 i 对航迹 p 的探测不确定区域, 以 $\Omega_{ip,j}$ 表示 Ω_{ip} 被信源 j 的探测范围所覆盖的部分, 以 $p(\Omega_{ip,j} | \Omega_{ip})$ 表示在目标在 Ω_{ip} 的条件下处于 $\Omega_{ip,j}$ 中的概率.

信源都有一定的虚情率和漏情率. 以 $p_{fp,j}$ 、 $p_{fn,j}$ 分别表示信源 j 的虚情率和漏情率. 信源 j 的虚情率和漏情率取先验值, 可分别由信源 j 在以往使用中或测试中的统计数据计算确定.

对于关联航迹对 $(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$, 定义未关联率为

$$\eta = \frac{n_i + n_j - 2 \cdot n_c}{n_i + n_j} \quad (5)$$

则定义航迹 $\mathbf{y}_{ip}(t)$ 和 $\mathbf{y}_{jq}(t)$ 因虚情和漏情的关联不确定性修正因子:

$$r_f(i, p, j) = [1 - p(\Omega_{ip,j} | \Omega_{ip})] \cdot (1 - p_{fp,j}) \cdot (1 - p_{fn,j}) \cdot (1 - \eta) \quad (6)$$

(5) 确定航迹关联概率

综合式(4)和式(6), 计算 \mathbf{y}_{ip} 的修正似然度 a_{ip} :

$$a_{ip} = a_{s,ip} \cdot r_f(i, p, j) \quad (7)$$

对航迹 \mathbf{y}_{jq} , 采用同样的模型计算其修正似然度 a_{jq} , 则取航迹关联对 $(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ 成立的概率:

$$p(A_{ip,jq}) = \min(a_{ip}, a_{jq}) \quad (8)$$

(6) 计算航迹关联不确定度

可按照定义 2 计算航迹关联不确定度, 或按定义 3 或定义 4 计算简化的航迹关联不确定度.

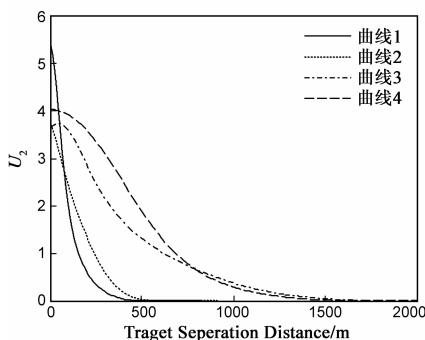


图3 航迹关联不确定度评定结果

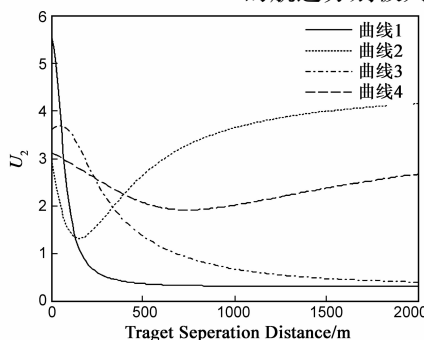


图4 航迹关联不确定度评定结果

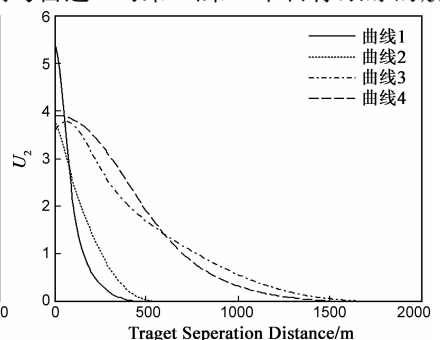


图5 航迹关联不确定度评定结果

3.2 评定结果及分析

仿真中, 以 2 部雷达对 5 个平行运动的目标进行跟踪. 其中, 雷达在各独立测量方向上的误差模型为:

$$e_m(t) = e_s(t) + e_c \cdot \sin(\beta(t) + C) + e_r(t) \quad (9)$$

其中, $e_s(t)$ 为常值系统误差项, e_c 为周期性系统误差的幅度, $\beta(t)$ 表示测量方位, C 为初始相位, $e_r(t)$ 为随机误差项.

在各数值实验中, 两雷达的距离 e_c 均取为 20m, 方位 e_c 均取为 0.3° , 距离 $e_c(t)$ 的标准差均取为 60m, 方位 $e_r(t)$ 的标准差均取为 0.2° , C 均取为 0° .

雷达、目标的分布如图 2 所示. 在剧情 1 中, 5 目标位于坐标原点的东向; 在剧情 2 中, 则位于坐标原点的北向; 目标距离坐标原点约 85km. 5 个目标从左至右依次编号为 1~5.

在 $e_s(t) = 0$ 的实验中, 当 5 个目标的航迹关联都正确时, 航迹关联不确定度的评定结果如图 3 所示. 其中, 曲线 1、曲线 2 分别为剧情 1 中雷达 1 对第 1、第 3 个目标跟踪的航迹所对应航迹关联对的简化航迹关联不确定度 $U_2(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$; 曲线 3、曲线 4 分别为剧情 2 中雷达 1 对第 1、第 3 个目标跟踪的航迹所对应航迹关联对的简化航迹关联不确定度 $U_2(\mathbf{y}_{ip}, \mathbf{y}_{jq})$ (为简化表述, 下文中均简称为航迹关联不确定度).

随着目标间距变大, 各航迹关联对的航迹关联不确定度应逐渐变小; 由于雷达在距离和方位方向上的跟踪精度不同, 剧情 2 中雷达对目标沿 x 轴的跟踪精度低于剧情 1, 致使剧情 2 中各航迹关联对的航迹关联不确定度应高于剧情 1. 从图 3 中可以看出, 各曲线均成下降趋势, 曲线 3、曲线 4 的值往往大于曲线 1、曲线 2, 仿真结果与预期相符.

在上述剧情中, 若雷达 1 对第 2、第 3 个目标跟踪的航迹分别被判与雷达 2 对第 3、第 2 个目标跟踪的航迹

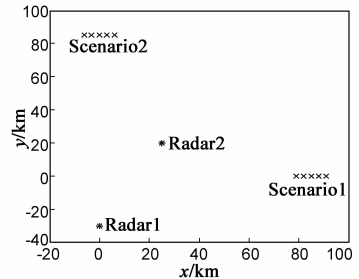


图2 雷达和目标分布示意图

迹关联,而其他航迹关联均正确时,图 3 中的 4 条曲线分别如图 4 所示.对比图 3、图 4 可知,错误关联的关联航迹对的航迹关联不确定度始终大于 1.0;由于存在错误的关联对,导致正确关联的关联航迹对的航迹关联不确定度也有所提升,但随着目标间距变大仍保持下降趋势.仿真结果表明,本文提出的评定方法能正确反映错误关联关系的影响.

当雷达存在系统误差(仿真中,取两雷达的距离系统均为 0,方位系统误差分别为 -1.5° 和 1°)、且所有航迹关联都正确时,图 3 中的 4 条曲线分别如图 5 所示.对比图 3、图 5 可知,无论传感器是否存在系统误差,对于相同的关联判决结果,本文提出的航迹关联不确定度评定方法能得出几乎相同的评定结果.

航迹关联不确定度评定模型和仿真结果表明,本文提出的航迹关联不确定度评定方法满足前文提出的 5 项基本要求.

4 结论

本文给出了航迹关联不确定度的定义,简要说明了航迹关联不确定度的应用方法,并提供了一种航迹关联不确定度评定的数学模型.仿真实验表明,该模型能够正确反映目标间隔距离、传感器测量误差、航迹关联的正确性等与航迹关联不确定度之间的关系;而且,无论传感器是否存在系统误差,对于相同的关联判决结果,本文提出的航迹关联不确定度评定方法能得出几乎相同的评定结果.研究表明,航迹关联不确定性是可以度量的,航迹关联不确定度是可以准确评定的.

参考文献

- [1] Hall D L, Llinas J. Handbook of Multi-sensor Data Fusion [M]. London: CRC Press LLC, 2001.
- [2] Blackman S. Multiple Target Tracking with Radar Applications [M]. Norwood, Ma: Artech House, Inc, 1986.
- [3] Klir K G. Uncertainty and Information: Foundations of Generalized Information Theory [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [4] 何友, 王国宏, 等. 多传感器信息融合及应用(第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
He Y, Wang G H, et al. Multi-Sensor Information Fusion with Applications(2nd Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
- [5] 韩崇昭, 周彬, 等. 共同杂波环境下多目标量测数据的误差传递与校正[J]. 自动化学报, 2007, 33(7): 771 - 774.
Han C Z, Zhou B, et al. Error transfer and correction between multi-target measurements in a common clutter environment [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(7): 771 - 774. (in Chinese)
- [6] 林洪桦. 测量误差与不确定度评估[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Lin H H. Error and Uncertainty Evaluation in Measurement [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)
- [7] ISO/IEC Guide 98: 1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement[S].
- [8] 陈世友, 李燕菲. 航迹关联不确定度评定方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 14 - 17.
Chen S Y, Li Y F. Evaluation method of track correlation uncertainty [J]. Journal Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2010, 38(1): 14 - 17. (in Chinese)
- [9] 张晶, 等. 集中交互式多传感器模糊联合概率数据互联算法[J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1655 - 1659.
Zhang J, et al. Centralized interacted multiple model multisensor fuzzy joint probabilistic data association algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(8): 1655 - 1659. (in Chinese)
- [10] 石 ■, 王钺, 王树刚, 等. 基于目标参照拓扑的模糊航迹关联方法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(4): 105 - 109.
Shi Y, Wang Y, Wang S G, et al. Fuzzy data association based on target topology of reference [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(4): 105 - 109. (in Chinese)
- [11] 杨哲, 韩崇昭, 李晨, 等. 基于目标之间拓扑信息的数据关联方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2357 - 2360.
Yang Z, Han C Z, Li C, et al. Data association based on target topology [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(9): 2357 - 2360. (in Chinese)
- [12] Bar-Shalom Y, Chen H. Multi-sensor track-to-track association for tracks with dependent errors [J]. Journal of Advances in Information Fusion, 2006, 1(1): 3 - 15.

作者简介

陈世友 男, 1972 年生于河南潢川, 博士, 主要研究方向为信息融合技术、信息系统技术、自动控制技术.

E-mail: chen. shiyu@163. com

肖厚 男, 1986 年生于湖北罗田, 硕士研究生, 主要研究方向为信息融合技术、信息系统技术. E-mail: xiaohoupi@126. com